

ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

Μεθοδολογία Υποδειγματικού Σχεδιασμού ενός Ολοκληρωμένου Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

Επιστημονικός Υπεύθυνος

Αναστάσιος Ι. Στάμου

Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ
ΤΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ (CLIMPACT)

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



Τίτλος Βιβλίου:

Μεθοδολογία Υποδειγματικού Σχεδιασμού ενός Ολοκληρωμένου Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής - Εθνικό Δίκτυο για την Κλιματική Αλλαγή και τις Επιπτώσεις της (CLIMPACT)

Επιμέλεια και διόρθωση κειμένων:

Αναστάσιος Ι. Στάμου

Γραφιστική επιμέλεια - Μακέτα εξωφύλλου:

Χατζημπεκιάρης Έκτωρ (ektorasxa@gmail.com)

Φωτογραφία εξωφύλλου:

Μ. Ανδρεαδάκης (ΕΚΠΑ)

Έκδοση:

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Copyright:

© Αναστάσιος Ι. Στάμου 2023

Εκτύπωση/Βιβλιοδεσία:

Mrlgraphics (m.vervita@mrlgraphics.eu)

1η έκδοση:

Φεβρουάριος 2023

ISBN: 978-618-85675-5-9

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Ερευνητικού Έργου «Εθνικό δίκτυο έρευνας για την κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις της», η οποία έχει ενταχθεί στο Υπόεργο 3 του έργου «Υποδομές εθνικών ερευνητικών δικτύων στους τομείς της ιατρικής ακρίβειας, των κβαντικών τεχνολογιών και της κλιματικής αλλαγής» με κωδ. αριθ. 2018ΣΕ01300001 του Εθνικού Σκέλους του ΠΔΕ της ΓΓΕΤ.

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού Νόμου (Ν. 2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε μέσο ή τρόπο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση η δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου η μέρους του έργου.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ, ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	17
1.1.1 Φυσικές καταστροφές και η σημασία των πλημμυρών	17
1.1.2 Οι τέσσερις φάσεις εξέλιξης μιας πλημμύρας	20
1.1.3 Οι ξαφνικές πλημμύρες	21
1.1.4 Επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών	21
1.1.5 Μέτρα διαχείρισης πλημμυρών	26
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ	26
1.2.1 Γενικά	26
1.2.2 Τα κύρια στοιχεία ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης	27
1.2.3 Τα Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης στην Ευρώπη	28
1.2.4 Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης για Πλημμύρες	28
1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	29
1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΈΚΘΕΣΗΣ	30
1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31
2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	33
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
2.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΑΠΟΡΡΟΗ	33
2.2.1 Υδρογράφημα απορροής	33
2.2.2 Γεωμετρική μορφή του υδρογραφήματος απορροής	35
2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος απορροής	35
2.3 ΕΙΔΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ	37
2.4 ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	38
2.5 ΚΡΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΈΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	40
2.5.1 Γενικά	40
2.5.2 Χειροκίνητα και αυτόματα τοπικά Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών	41
2.5.3 Συστήματα ALERT και IFLAWS	41
2.5.4 Σύστημα Καθοδήγησης για Ξαφνικές Πλημμύρες	44
2.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	49
2.6.1 Γενικά	49
2.6.2 Βήματα της μεθοδολογίας σχεδιασμού	49
2.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54
3 ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	57
3.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	57
3.2 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ	57
3.2.1 Γενικά	57
3.2.2 Μετρητές βροχόπτωσης	58

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (συνέχεια)

3.2.3	Μετρητές στάθμης της επιφάνειας ροής	59
3.2.4	Μετρητές χαρακτηριστικών ροής	61
3.2.5	Καμπύλες στάθμης - παροχής	62
3.3	ΔΙΚΤΥΑ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙΡΟΥ	63
3.3.1	Αρχή λειτουργίας των ραντάρ καιρού	63
3.3.2	Κύριοι τύποι των ραντάρ καιρού	63
3.3.3	Κύρια μέρη των ραντάρ καιρού	64
3.3.4	Μέτρηση χαρακτηριστικών βροχόπτωσης με τα ραντάρ καιρού	65
3.3.5	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ραντάρ καιρού	66
3.3.6	Ραντάρ καιρού και έγκαιρη προειδοποίηση πλημμυρών	66
3.4	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ	67
3.4.1	Σκοπός	67
3.4.2	Είδη δορυφόρων και παραγόμενες εικόνες	67
3.4.3	Εκτίμηση βροχόπτωσης με δορυφορικά δεδομένα	68
3.5	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ	69
3.5.1	Βασικές αρχές των μοντέλων πρόγνωσης καιρού	69
3.5.2	Φάσεις και χρονικοί ορίζοντες πρόγνωσης καιρού με μοντέλα πρόγνωσης καιρού	70
3.5.3	Επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων πρόγνωσης καιρού, υπολογιστικά πλέγματα και αρχικές συνθήκες	70
3.5.4	Παγκόσμια και περιοχικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού	71
3.5.5	Ευρέως εφαρμοζόμενα μοντέλα πρόγνωσης καιρού	71
3.5.6	Το μοντέλο πρόγνωσης καιρού IFS	72
3.5.7	Το μοντέλο πρόγνωσης καιρού GFS	74
3.6	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	75
3.6.1	Αξιοποίηση υφιστάμενων δικτύων παρακολούθησης	76
3.6.2	Βέλτιστη χωροθέτηση μετρητικών σταθμών	76
3.7	ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΤΟ ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ, Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	83
3.7.1	Οι ιδιαιτερότητες της Ελλάδας	83
3.7.2	Υφιστάμενα δίκτυα σταθμών στην Ελλάδα και αρμόδιες υπηρεσίες	83
3.7.3	Η σημερινή κατάσταση των δικτύων παρακολούθησης στην Ελλάδα	85
3.7.4	Νομικό πλαίσιο και προοπτικές ανάπτυξης ενός εθνικού δικτύου παρακολούθησης	87
3.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
4	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	93
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	93
4.2	ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	93
4.2.1	Γενικά	93
4.2.2	Υδρολογικά μοντέλα λεκανών απορροής	94
4.2.3	Μοντέλα διόδευσης πλημμύρας	95
4.2.4	Ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα	96
4.2.5	Μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα	99
4.3	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (συνέχεια)

ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	103
4.3.1 Κλιματική αλλαγή και πλημμύρες	103
4.3.2 Σενάρια κλιματικής αλλαγής	103
4.3.3 Κλιματικά μοντέλα	108
4.3.4 Μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών	114
4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	115
4.4.1 Σκοπός	115
4.4.2 Υπολογισμός της πλημμυρικής αιχμής με την ορθολογική μέθοδο	116
4.4.3 Υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος με τη χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος	119
4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	124
4.5.1 Σκοπός	124
4.5.2 Εξισώσεις υδροδυναμικών μοντέλων - SWE	124
4.6 ΕΥΡΕΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	130
4.6.1 Μοντέλα HEC	130
4.6.2 Μοντέλα MIKE	131
4.6.3 Μοντέλο LISFLOOD	131
4.6.4 Μοντέλο SAC-SMA	132
4.6.5 Μοντέλο TOPMODEL	132
4.6.6 Μοντέλο FLO-2D PRO	133
4.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	133
4.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133
5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	143
5.1 Η ΟΔΗΓΙΑ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	143
5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	143
5.2.1 Βασικές έννοιες	143
5.2.2 Αξιολόγηση επικινδυνότητας πλημμύρας	145
5.2.3 Αξιολόγηση της πλημμυρικής τρωτότητας	145
5.2.4 Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας και μέτρα μείωσης του κινδύνου πλημμύρας	146
5.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΑ ΣΧΕΔΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	147
5.3.1 Μεθοδολογία υπολογισμών	147
5.3.2 Εκτίμηση της επικινδυνότητας πλημμύρας	147
5.3.3 Εκτίμηση της πλημμυρικής τρωτότητας	148
5.3.4 Εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας	150
5.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ «ΚΤΙΡΙΑ»	151
5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	153
6 ΚΕΝΤΡΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	156
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	156
6.2 ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	156

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (συνέχεια)

6.3	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	157
6.3.1	Εξοπλισμός	157
6.3.2	Εφεδρείες και συντήρηση του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών	159
6.3.3	Λογισμικό του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών	159
6.4	ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	163
6.5	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΝΕΦΟΥΣ	163
6.5.1	Εισαγωγή	163
6.5.2	Κέντρα Πρόγνωσης Πλημμυρών σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους	164
6.6	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΜΕΤΡΗΤΕΣ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	167
6.6.1	Κριτήρια επιλογής της μεθόδου επικοινωνίας	167
6.6.2	Η απόσταση των μετρητών από το Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών ως παράγοντας επιλογής της μεθόδου επικοινωνίας των δεδομένων	167
6.6.3	Συχνότητα λήψης μετρήσεων και αποστολής δεδομένων	168
6.6.4	Αυτόνομα τοπικά συστήματα παραγωγής ενέργειας	168
6.6.5	Τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων και δίκτυα τηλεπικοινωνιών	169
6.6.6	Μετάδοση δεδομένων με την τεχνική του πληθοπορισμού	173
6.7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	174
7	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΕΩΝ – ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	176
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	176
7.2	ΔΟΜΗΣΗ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ	176
7.2.1	Χαρακτηριστικές στάθμες επιφάνειας ροής υδατορέματος και κατηγορίες πλημμύρας	176
7.2.2	Τύποι μηνυμάτων προειδοποίησης	178
7.2.3	Πρόγνωση μεταβολής στάθμης επιφάνειας ροής υδατορέματος	180
7.2.4	Χρόνοι έκδοσης μηνυμάτων	181
7.2.5	Διαθέσιμος χρόνος και ακρίβεια προειδοποίησης	181
7.2.6	Σύνταξη κειμένου μηνυμάτων προειδοποίησης	183
7.3	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ	185
7.4	ΛΗΨΗ, ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗ ΤΩΝ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΘΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ	186
7.4.1	Γενικά	186
7.4.2	Λόγοι αστοχίας μηνυμάτων	187
7.4.3	Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των ατόμων που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους σε περίπτωση πλημμύρας	188
7.4.4	Ενίσχυση της εμπιστοσύνης του κοινού στις προειδοποιήσεις	189
7.5	ΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΕΩΝ	190
7.6	ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	191
7.6.1	Γενικά	191
7.6.2	Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του κοινού	191
7.6.3	Σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες	194

7.7	Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	195
7.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	198
8	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΑΝΔΡΑΣ	202
8.1	ΒΗΜΑ 1: ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	202
8.1.1	Εισαγωγή	202
8.1.2	Τοπογραφικά δεδομένα	205
8.1.3	Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και συμβάντα πλημμυρών	205
8.1.4	Χρήσεις γης	212
8.1.5	Εδαφική διάβρωση των ρεμάτων	212
8.1.6	Δεδομένα οδικού δικτύου	214
8.1.7	Δεδομένα θέσεων υδροληψίας	217
8.1.8	Υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων	217
8.1.9	Δεδομένα πλημμυρικής τρωτότητας	218
8.2	ΒΗΜΑ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	222
8.2.1	Καθορισμός της περιοχής εφαρμογής	222
8.2.2	Προσδιορισμός και αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης	223
8.2.3	Βέλτιστη χωροθέτηση των υδρομετεωρολογικών και των υδρομετρικών σταθμών	223
8.2.4	Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μετρητικών σταθμών	231
8.3	ΒΗΜΑ 3: ΕΠΙΛΟΓΗ, ΔΟΜΗΣΗ, ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	233
8.3.1	Καθορισμός των ορίων της περιοχής υπολογισμών και δόμηση του 3D μοντέλου εδάφους	233
8.3.2	Επιλογή, δόμηση και εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου	234
8.3.3	Επιλογή, δόμηση και βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου	244
8.3.4	Βελτιστοποίηση του υδροδυναμικού μοντέλου	249
8.3.5	Επίδραση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στη συμπεριφορά της πλημμύρας του 2017	256
8.4	ΒΗΜΑ 4: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΥΨΗΛΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	261
8.4.1	Καθορισμός σεναρίων υπολογισμών - Επίδραση κλιματικής αλλαγής	261
8.4.2	Υπολογισμοί υδρολογικού μοντέλου - Επίδραση κλιματικής αλλαγής	261
8.4.3	Υπολογισμοί έκτασης των περιοχών κατάκλισης	262
8.4.4	Υπολογισμοί χαρακτηριστικών ροής	263
8.4.5	Υπολογισμοί πλημμυρικής επικινδυνότητας	265
8.4.6	Υπολογισμοί πλημμυρικής τρωτότητας	266
8.4.7	Υπολογισμοί του κινδύνου πλημμύρας	268
8.4.8	Υπολογισμοί κινδύνου πλημμύρας με τη μέθοδο των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας	270
8.4.9	Προσδιορισμός περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας	278
8.5	ΒΗΜΑ 5: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ	279
8.5.1	Εισαγωγή	279
8.5.2	Εκτίμηση τιμών Flash Flood Guidance	279
8.5.3	Εντοπισμός των κρίσιμων διατομών	283
8.5.4	Καμπύλες στάθμης επιφάνειας ροής - παροχής	285

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (συνέχεια)

8.6	ΒΗΜΑ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	286
8.6.1	Εισαγωγή	286
8.6.2	Σχεδιασμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους	287
8.7	ΒΗΜΑ 7: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ	288
8.7.1	Εισαγωγή	288
8.7.2	Μεθοδολογία	288
8.7.3	Χαρακτηριστικά των ερωτώμενων	289
8.7.4	Εμπειρία κατοίκων από πλημμύρες	290
8.7.5	Επίγνωση πλημμυρών	290
8.7.6	Εμπειρία των κατοίκων από την πλημμύρα του 2017	291
8.7.7	Ενημέρωση κατοίκων για τις πλημμύρες	291
8.7.8	Ετοιμότητα κατοίκων για την αντιμετώπιση μιας πλημμύρας	294
8.7.9	Προειδοποίηση κατοίκων για επικείμενη πλημμύρα	295
8.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	296

Πρόλογος και Ευχαριστίες



Οι πλημμύρες είναι αναμφίβολα από τους περισσότερο καταστροφικούς φυσικούς κινδύνους, που πλήττουν πολλές περιοχές στον κόσμο, την Ευρώπη και την Ελλάδα. Οι ζημιές που προκαλούν παρουσιάζουν έντονα ανοδική τάση κατά τις πρόσφατες δεκαετίες και αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αύξηση της έντασης των πλημμυρών εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Σε αρκετές περιπτώσεις δεν μπορούμε να αποφεύγουμε τις πλημμύρες, οπότε πρέπει να μάθουμε να ζούμε με αυτές και να τις διαχειριζόμαστε αποτελεσματικά. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε εφαρμόζοντας μέτρα πρόληψης, όπως π.χ. με καθαρισμούς των υδατορευμάτων, προστασίας, όπως με την κατασκευή τεχνικών έργων, και προετοιμασίας, όπως με τα Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ).

Στη χώρα μας πρακτικά δεν υπάρχουν ΣΕΠΠ. Τα τελευταία έτη, η Πολιτεία έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί τη σημασία της έγκαιρης προειδοποίησης των πλημμυρών και έχει πραγματοποιήσει σημαντικά βήματα στον τομέα της πολιτικής προστασίας, περιλαμβανομένων των αναγκαίων νομοθετικών και οργανωτικών ρυθμίσεων. Σήμερα, η προειδοποίηση πραγματοποιείται οργανωμένα με τη συμμετοχή στη διαδικασία έμπειρων εξειδικευμένων επιστημόνων, αλλά απέχει σημαντικά από τα απαιτούμενα αυτοματοποιημένα ΣΕΠΠ. Για να τα πλησιάσει, πρέπει να ξεκινήσει με πιλοτικά προγράμματα ΣΕΠΠ σε επιλεγμένες περιοχές με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας, οι οποίες σήμερα είναι γνωστές με βάση την αποκτηθείσα εμπειρία και τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας που έχουν συνταχθεί στο πλαίσιο της Οδηγίας για τις Πλημμύρες, και να τα χρησιμοποιήσει στη συνέχεια υποδειγματικά σε όλη τη χώρα.

Το πρώτο βήμα της δημιουργίας ενός ΣΕΠΠ είναι ο σχεδιασμός του, ο οποίος απαιτεί ειδικές γνώσεις και εμπειρία που διαθέτουν εξειδικευμένοι επιστήμονες σε αντικείμενα, όπως είναι η μετεωρολογία, η υδρολογία και η υδραυλική. Η χώρα μας διαθέτει αυτούς τους επιστήμονες στα επιστημονικά και ερευνητικά κέντρα, αλλά και στις υπηρεσίες που εμπλέκονται αρμοδίως στη διαδικασία της έγκαιρης προειδοποίησης. Αυτό όμως δεν αρκεί. Χρειάζεται ο απαραίτητος εξοπλισμός και η αποτελεσματικά συνεργασία μεταξύ των επιστημόνων και των φορέων τους. Ο εξοπλισμός αυτός αφορά τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη μέτρηση (α) της βροχόπτωσης που μπορεί να προκαλέσει πλημμύρα, και (β) της διαδρομής της από την ατμόσφαιρα, την απορροή της στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι και τη ροή της στα υδατορέματα στις περιοχές που πλημμυρίζουν. Αυτός ο εξοπλισμός περιλαμβάνει δορυφόρους, κυρίως μετεωρολογικά ραντάρ και δίκτυα υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών που σήμερα διατίθενται στη χώρα μας σε εξαιρετικά περιορισμένο βαθμό. Η Πολιτεία πρέπει να αντιμετωπίσει το θέμα αυτό δημιουργώντας ολοκληρωμένα δίκτυα παρακολούθησης και παράλληλα να δημιουργήσει τις ευκαιρίες δικτύωσης και συνεργασίας των επιστημονικών και ερευνητικών φορέων με τις δημόσιες, εθνικές υπηρεσίες που εμπλέκονται στη διαδικασία της έγκαιρης προειδοποίησης.

Το Εθνικό Δίκτυο για την Κλιματική Αλλαγή (CLIMPACT) είναι μια εμβληματική πρωτοβουλία της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Καινοτομίας (ΓΓΕΚ) του Υπουργείου Ανάπτυξης και Επενδύσεων. Αποτελεί μια προσπάθεια της Πολιτείας προς αυτή την κατεύθυνση που ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2019. Το CLIMPACT, στο οποίο συμμετέχουν έντεκα φορείς, έχει ως στόχο να αποτελέσει πόλο έγκυρης εμπειρογνομosύνης και συμβουλευτικό όργανο της Πολιτείας και της Κοινωνίας σε θέματα μελέτης και αντιμετώπισης της Κλιματικής Αλλαγής.

Η παρούσα «Μεθοδολογία Υποδειγματικού Σχεδιασμού ενός Ολοκληρωμένου Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής» είναι το κύριο παραδοτέο που συντόνισε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) στο πλαίσιο του CLIMPACT. Αποτελεί ένα εργαλείο-μεθοδολογία για τον

υποδειγματικό σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου ΣΕΠΠ σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Πρακτικά, είναι ένα εγχειρίδιο (manual) που απευθύνεται σε μηχανικούς και άλλους επιστήμονες που ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με το σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ.

Το εγχειρίδιο βασίστηκε σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία και εμπειρία. Αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, εκ των οποίων τα πρώτα επτά είναι γενικά και παρέχουν τις βασικές γνώσεις και τη μεθοδολογία σχεδιασμού των τμημάτων ενός ΣΕΠΠ. Στο όγδοο κεφάλαιο εφαρμόζεται πιλοτικά η μεθοδολογία σε μια περιοχή της Περιφέρειας Αττικής με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας που είναι η Μάνδρα. Στο τέλος του κάθε κεφαλαίου παρατίθεται κατάλογος με βιβλιογραφικές πηγές που παρέχει τη δυνατότητα στον αναγνώστη να εμβαθύνει στο τμήμα ενδιαφέροντός του. Το εγχειρίδιο χαρακτηρίζεται από την πρακτική σημασία του με την παρουσίαση των αναγκών, κυρίως τεχνολογικών, γνώσεων και μεθοδολογιών, συνήθως με τη μορφή εφαρμογής σειράς βημάτων. Οι πρακτικές αυτές γνώσεις τεκμηριώνονται ή/και συμπληρώνονται με σημαντικές πρωτότυπες πληροφορίες και γνώσεις εμβάθυνσης σε εξειδικευμένα θέματα, οι οποίες παρήχθησαν κατά την εφαρμοσμένη έρευνα. Αυτές συνοψίζονται κυρίως στο όγδοο κεφάλαιο του εγχειριδίου και αναλύονται στις 24 δημοσιεύσεις/ ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, των οποίων τα στοιχεία περιέχονται στα κεφάλαια της βιβλιογραφίας. Με βάση τα παραπάνω, το εγχειρίδιο μπορεί να αξιοποιηθεί και στη διδασκαλία μαθημάτων που σχετίζονται με ΣΕΠΠ, αλλά και στον εντοπισμό επιστημονικών ερωτημάτων που χρήζουν ερευνητικής αντιμετώπισης.

Για την ολοκλήρωση του παρόντος αφιερώθηκαν πολλές ανθρωποώρες, όχι μόνο από εμένα, αλλά και από συνεργάτες, φίλες και φίλους, που συμμετείχαν ως συσυγγραφείς ή/και κριτικοί αναγνώστες. Ευχαριστώ θερμά τον Ευάγγελο Μπατιά, τη Βασιλική Κοτρώνη, τον Κωσταντίνο Λαγουβάρδο, τον Κωνσταντίνο Καρτάλη, τον Μιχαήλ Διακάκη, τον Δημήτριο Καλογερά, τον Γεώργιο Μητσόπουλο, τον Γεώργιο Τζάνε, τον Απόδηλωνα Μπουρνά, τον Χάρη Χαλκιαδάκη, την Ελισάβετ Φελώνη, την Αιμιλία Θεοχάρη, τη Σοφία Σκρουφούτα, τον Αριστείδη Μπλούτσο, τον Χαράλαμπο Σαρόγλου, τον Ιωάννη Γκόλια, την Ελένη Βλάχογιάννη, και τον Ευθύμιο Λέκκα, που συμμετείχαν στη συγγραφή του παρόντος (η αναφορά των ονομάτων ακολουθεί τη σειρά εμφάνισής τους στο παρόν). Επίσης, ευχαριστίες απευθύνονται στον Ανδρέα Ευστρατιάδη, στον Αριστείδη Κουτρούλη, στον Χρήστο Γιαννακόπουλο, στον Αναστάσιο Παπαδόπουλο, στον Μιητιάδη Γυμνόπουλο, και στην Ειρήνη-Μαρία Σύρμου για την κριτική ανάγνωση του εγχειριδίου.

Με το παρόν υλοποιείται σε ικανοποιητικό βαθμό μια πρότασή μου που συζητήθηκε για πρώτη φορά το 2018 στο γραφείο του Πρύτανη του ΕΜΠ Ιωάννη Γκόλια με τον Πρόεδρο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) Μανώλη Πλειώνη σε εξαιρετικά θετικό κλίμα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στο Μανώλη Πλειώνη, Συντονιστή του CLIMPACT, χάρη στον οποίο υλοποιήθηκε η παραπάνω πρόταση ως τμήμα του εμβληματικού έργου CLIMPACT, το οποίο αποτέλεσε την απαρχή μια αποδοτικής συνεργασίας όχι μόνο μεταξύ του ΕΜΠ και του ΕΑΑ, αλλά και άλλων σημαντικών ερευνητικών φορέων της χώρας μας. Δεν μπορώ να παραλείψω την εξαιρετική συνεργασία που υπήρξε στη Συντονιστική Επιτροπή του CLIMPACT με τους Νικόλαο Μιχαλόπουλο (Επιστημονικό Υπεύθυνο του CLIMPACT), Δημήτριο Μεηλλά και Αριστομένη Καραγεώργη, χάρη στην οποία αντιμετωπίστηκαν αποτελεσματικά και δίκαια όσα θέματα ανέκυψαν.

Ελπίζω ότι το παρόν θα αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού για τους επιστήμονες που απασχολούνται με τη διαχείριση των πλημμυρών, όπως τους μηχανικούς και τεχνικούς του δημοσίου και του ιδιωτικού τομέα, αλλά και εκπαίδευσης και έρευνας των νέων επιστημόνων μας.

Αναστάσιος Ι. Στάμου

Ελληνικοί Όροι και Συντομογραφίες

Ελληνικοί όροι

Ανάλυση συχνότητας πλημμύρας	Flood Frequency Analysis
Διακομιστής δεδομένων	Data server
Διαλειτουργικότητα	Interoperability
Διόρθωση μεροληπτικών σφαλμάτων	Bias correction
Δρομολογητής δεδομένων	Data router
Εικονοστοιχείο	Pixel
Επικινδυνότητα	Hazard
Καταβιβασμός κλίμακας	Downscaling
Καταγραφέας δεδομένων	Data recorder
Καταχωρητής δεδομένων	Data logger
Κατώφλιο (παροχής) απορροής	Runoff Threshold
Κίνδυνος	Risk
Μικροϋπηρεσίες	Microservices
Μοντέλο που βασίζεται σε δεδομένα	Data-driven model
Μοντέλο φυσικής βάσης	Nature Based Model
Παλινδρόμηση	Regression
Πληθοπορισμός	Crowdsourcing
Ποιηλαπλής προσομοιώσεις	Ensemble forecasting
Πρόσθετη ακτινοβολία	Radiative forcing
Ραντάρ	RAdio Detecting And Ranging (RADAR)
Σύστημα Παρατήρησης της Γης	Earth Observing System
Σχήμα παραμετροποίησης	Parameterization scheme
Τρωτότητα	Vulnerability
Υπολογιστικό νέφος	Cloud Computing
Φυσικές προσεγγίσεις που βασίζονται στη φύση	Nature-Based Solutions (NBS)
Φυσική ασφάλεια	Physical security
Χάρτης επαγρύπνησης	Vigilance map
Χάρτης Επικινδυνότητας Πλημμύρας	Flood Hazard Map
Χάρτης Κινδύνου Πλημμύρας	Flood Risk Map
Χρόνος πρόγνωσης πλημμύρας	Forecast lead time

Συντομογραφίες

ΓΓΠΠ	Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας
ΔΠ	Δίκτυο Παρακολούθησης
ΕΔΕΚ	Έκτακτα Δελτία Επιδείνωσης Καιρού
ΕΔΠΕΚΦ	Έκτακτα Δελτία Πρόγνωσης Επικίνδυνων Καιρικών Φαινομένων
ΕΚΧΑ ΑΕ	Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση ΑΕ
ΕΛΚΕΘΕ	Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών
ΕΜΣΥ	Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (συνέχεια)

ΕΣΚΕ	Ενιαίο Συντονιστικό Κέντρο Επιχειρήσεων
ΕΣΚΕΔΙΚ	Εθνικό Συντονιστικό Κέντρο Επιχειρήσεων και Διαχείρισης Κρίσεων
ΕΥΓΕΠ	Εθνική Υποδομή Γεωχωρικών Πληροφοριών
ΖΔΥΚΠ	Ζώνη Δυστηκιά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας - Area of Potentially Significant Flood Risk (APSFR)
ΚΑ	Κλιματική Αλληλαγή
ΚΠΠ	Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών
ΛΑΠ	Λεκάνη Απορροής Ποταμού
Μοντέλο ANN	Μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων - Artificial Neural Network Model
Μοντέλο ANFIS	Μοντέλο νευροασαφών συστημάτων - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems Model
Μοντέλο DT	Μοντέλο δένδρων απόφασης - Decision Trees Model
Μοντέλο AI	Μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης - Artificial Intelligence Model
Μοντέλο AR	Μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης - Autoregressive Model
Μοντέλο ARIMA	Ολοκληρωμένο αυτοπαλινδρομικό μοντέλο κινητού μέσου όρου -AutoRegressive Integrated Moving Average Model
Μοντέλο ARMA	Αυτοπαλινδρομικό μοντέλο κινητού μέσου όρου - AutoRegressive Moving Average Model
Μοντέλο FLM	Μοντέλο ασαφούς λογικής - Fuzzy Logic Model
Μοντέλο FR	Μοντέλο διόδευσης πλημμύρας - Flood Routing Model
Μοντέλο kNN	Μοντέλο k-κοντινότερων γειτόνων - k-Nearest Neighbor Model
Μοντέλο MA	Μοντέλο κινητού μέσου όρου - Moving Average Model
Μοντέλο ML	Μοντέλο μηχανικής μάθησης - Machine Learning Model
Μοντέλο MLR	Μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης - Multiple Linear Regression Model
Μοντέλο RR	Μοντέλο βροχόπτωσης – απορροής - Rainfall-Runoff Model
Μοντέλο SVM	Μοντέλο μηχανής διανυσμάτων υποστήριξης - Support Vector Machines Model
Μοντέλο SVR	Μοντέλο παλινδρόμησης διανυσμάτων υποστήριξης - Support Vector Regression Model
ΜΠΚ	Μοντέλο Πρόγνωσης Καιρού – Weather Prediction Model
ΜΠΠ	Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών – Flood Prediction Model
ΜΥ	Μοναδιαίο Υδρογράφημα
ΟΠ	Οδηγία για τις Πλημμύρες
ΠΑΚΠ	Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας - Preliminary Flood Risk Assessment (PFRA)
ΠΥΚΠ	Περιοχή Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας
ΣΑΚ	Σχέδιο Ανάκαμψης από Καταστροφή - Disaster Recovery Plan
ΣΔΚΠ	Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας
ΣΕΠ	Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης
ΣΕΠΠ	Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών
ΣΜΥ	Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα
ΥΔ	Υδατικό Διαμέρισμα

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (συνέχεια)

AI	Artificial Intelligence - Τεχνητή νοημοσύνη
AIDR	Australian Institute Disaster Resilience - Αυστραλιανό Ινστιτούτο Ανθεκτικότητας σε Καταστροφές
ADVDM	Acoustic Doppler Velocity Meter - Ακουστικός μετρητής ταχύτητας (ροής) Doppler
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler – Ακουστικός ρευματογράφος Doppler
AHP	Analytic Hierarchy Process - Διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας
ALERT	Automated Local Evaluation in Real Time - Σύστημα αυτοματοποιημένης τοπικής αξιολόγησης σε πραγματικό χρόνο
AMS	American Meteorological Society - Αμερικανική Μετεωρολογική Εταιρεία
AR	Assessment Report - Έκθεση Αξιολόγησης
AUG	Alert Users Group
BLE	Bluetooth Low Energy
C3S	Copernicus Climate Change Service - Υπηρεσία Κλιματικής Αλληλαγής του Copernicus
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLC	CORINE Land Cover
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CN	Curve Number – Αριθμός Καμπύλης (Απορροής)
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - Κέντρο Έρευνας για την Επιδημιολογία των Καταστροφών
CRRPh	Convective Rainfall Rate with Microphysical Properties
DBMS	Database Management System – Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων
DEM	Digital Elevation Model - Ψηφιακό μοντέλο εδάφους
DG-ECHO	Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations - Γενική Διεύθυνση Ευρωπαϊκής Πολιτικής Προστασίας και Επιχειρήσεων Ανθρωπιστικής Βοήθειας
DHI	Danish Hydraulic Institute
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum – Γερμανικό Κέντρο Υπολογισμού Κλίματος
DRX	Discontinuous reception – Ασυνεχής λήψη
DSM	Digital Surface Model - Ψηφιακό μοντέλο επιφανείας
DWE	Diffusion Wave Equations - Εξισώσεις κύματος διάχυσης
E-HYPE	European Hydrological Predictions for the Environment
EC	European Commission - Ευρωπαϊκή Επιτροπή
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμης Πρόγνωσης Καιρού
EEA	European Environment Agency - Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
EFAS	European Flood Awareness System - Ευρωπαϊκό Σύστημα Ευαισθητοποίησης για τις Πλημμύρες
EMS	Emergency Management System - Σύστημα Διαχείρισης Έκτακτης Ανάγκης
EPA	Environmental Protection Agency – Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος
ERA5-Land	Reanalysis dataset – Δεδομένα επανανάληψης (κλίματος)

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (συνέχεια)

ERCC	Emergency Response Coordination Centre - Κέντρο Συντονισμού Αντιμετώπισης Έκτακτης Ανάγκης
ETL	Extract, Transform and Load – Εξαγωγή, μετασχηματισμός και φόρτωση (δεδομένων)
EUMETNET	European Meteorological Network - Δίκτυο των Ευρωπαϊκών Μετεωρολογικών Υπηρεσιών
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process - Διαδικασία Ασαφούς Αναλυτικής Ιεραρχίας
FCO	Flood Citizen Observatory - Παρατηρητήριο Πλημμυρών του Πολίτη
FDM	Finite Difference Method - Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
FFG	Flash Flood Guidance - Σύστημα Καθοδήγησης για Ξαφνικές Πλημμύρες
FFWS	Flood Forecasting and Warning Service – Υπηρεσία Πρόγνωσης και Προειδοποίησης Πλημμυρών
FVM	Finite Volume Method - Μέθοδος διαφορικών όγκων
GCM	Global Climate Model - Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο General Circulation Model - Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας
GeoHMS	Geospatial Hydrologic Modeling Extension of HEC
GFMS	Global Flood Monitoring System – Σύστημα Παγκόσμιας Παρακολούθησης Πλημμυρών
GFS	Global Forecast System - Σύστημα Παγκόσμιας Πρόγνωσης
GIS	Geographic Information System - Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών
GloFAS	Global Flood Awareness System - Παγκόσμιο Σύστημα Ευαισθητοποίησης για τις Πλημμύρες
GLOFFIS	Global Flood Forecasting and Information System - Παγκόσμιο Σύστημα Πρόγνωσης και Πληροφόρησης για τις Πλημμύρες
GPM	Global Precipitation Measurement – Παγκόσμια Μέτρηση Βροχόπτωσης
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System
HEFS	Hydrologic Ensemble Forecasting Service
HRC	Hydrological Research Center - Υδρολογικό Ινστιτούτο Ερευνών
HRU	Hydrologic Response Unit - Μονάδα υδρολογικής απόκρισης
HSSE	Health, Safety, Security and Environment
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I FLOWS	Integrated Flood Observing and Warning Systems - Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρατήρησης και Προειδοποίησης Πλημμυρών
IFS	Integrated Forecast System - Ολοκληρωμένο Σύστημα Πρόγνωσης
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (συνέχεια)

IR	Infrared satellite imagery – Υπέρυθρες δορυφορικές εικόνες
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JRC	Joint Research Centre - Κοινό Κέντρο Ερευνών
LAN	Local Area Network
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Low-Range Wireless Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long-Term Evolution
MIP	Model Intercomparison Project
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NB	Narrowband
NCAR	National Center for Atmospheric Research – Εθνικό Κέντρο Έρευνας της Ατμόσφαιρας
NCEP	National Centers for Environmental Prediction - Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης (των ΗΠΑ)
NCRS	Natural Resources Conservation Service – Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων
NHWC	National Hydrologic Warning Council - Εθνικό Συμβούλιο Υδρολογικής Προειδοποίησης
NOAA	(United States) National Oceanic and Atmospheric Administration - Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (των ΗΠΑ)
NWP	Numerical Weather Prediction – Πρόγνωση Καιρού με Μαθητικά Μοντέλα
NWS	National Weather Service - Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
NWSRFS	National Weather Service River Forecast System - Σύστημα Πρόγνωσης Ποταμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (των ΗΠΑ)
OpenHi.net	Open Hydrosystem Information Network - Δίκτυο Ανοιχτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων
OpenMI	Open Modelling Interface
OSM	OpenStreetMap
PAN	Personal Area Network
PSM	Power-saving mode - Λειτουργία Εξοικονόμησης Ενέργειας
RAM	Random Access Memory
RCM	Regional Climate Model - Περιοχικό Κλιματικό Μοντέλο
RCP	Representative Concentration Pathways - Αντιπροσωπευτικές Πορείες Συγκέντρωσης
RMSE	Root Mean Square Error - Μέσο τετραγωνικό σφάλμα
ROM	Read-Only Memory
SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting Model
SCS	Soil Conservation Service – Υπηρεσία Διατήρησης Εδάφους
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute - Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο
SOTER	Soil and Terrain Digital Database
SPI	Standardized Precipitation Index - Τυποποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (συνέχεια)

SPSS	Statistical Package for the Social Sciences - Στατιστικό Πακέτο για τις Κοινωνικές Επιστήμες
SRES	Special Report on Emissions Scenarios – (Ειδική Έκθεση για τα) Σενάρια Εκπομπών
SSP	Shared Socioeconomic Pathways - Κοινές Κοινωνικοοικονομικές Πορείες
TAU	Tracking Area Update
TDMA	Time Division Multiple Access
TOPMODEL	TOPOgraphy based hydrological MODEL
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TTN	The Things Network
UHF	Ultra-High Frequency
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction – Γραφείο Ηνωμένων Εθνών για τη Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών
UNEP	United Nations Environment Programme – Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat – Γραμματεία Διεθνούς Στρατηγικής για τη Μείωση των Καταστροφών των Ηνωμένων Εθνών
UPS	Uninterruptible Power Supply - Αδιάλειπτη Παροχή Ισχύος
USACE	United States Army Corps of Engineers - Σώμα Μηχανικών Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών
USGS	United States Geological Survey - Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών
UTP	Unshielded Twisted Pair
VGI	Volunteered Geographic Information - Εθελοντική Γεωγραφική Πληροφόρηση
VHF	Very High Frequency
VIS	Visible Satellite Imagery – Ορατές δορυφορικές εικόνες
VLSO	Very Large Scale Orthophotos Project
VM	Virtual Machine – Εικονικό μηχάνημα
WAN	Wide-Area Network
WiFi	Wireless Fidelity
WLC	Weighted Linear Composition - Σταθμισμένος Γραμμικός Συνδυασμός
WMO	World Meteorological Organization – Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός
WRF	Weather Research and Forecasting - Έρευνα και πρόγνωση καιρού
WRCP	World Climate Research Program - Παγκόσμιο Πρόγραμμα Έρευνας για το Κλίμα
3G	Third Generation (of connective/network technology)
4G	Fourth Generation

Εισαγωγή

Α. Ι. Στάμου

1.1 Κλιματική αλλαγή, φυσικές καταστροφές και πλημμύρες

1.1.1 Φυσικές καταστροφές και η σημασία των πλημμυρών

Η Κλιματική Αλλαγή (ΚΑ) αναφέρεται στις σημαντικές αλλαγές των μέσων συνθηκών των κλιματικών χαρακτηριστικών, όπως της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, και του ανέμου, οι οποίες συμβαίνουν σε μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως σε έτη, δεκαετίες, αιώνες ή ακόμα περισσότερο. Η ΚΑ περιλαμβάνει μακροπρόθεσμες τάσεις, όπως μετατοπίσεις προς θερμότερες, υγρότερες ή ξηρότερες συνθήκες, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος με την πάροδο του χρόνου, καθώς και από ανθρώπινες δραστηριότητες που εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, όπως π.χ. από την καύση ορυκτών καυσίμων για ενέργεια (EPA, 2022a). Η ΚΑ δημιουργεί φυσικούς κινδύνους που μπορεί να γίνουν φυσικές καταστροφές, όταν υπάρχει απώλεια της ζωής και των βιοτικών πόρων του ανθρώπου (WMO, 2022).

Σε παγκόσμια κλίμακα, με βάση τα στοιχεία του Κέντρου Έρευνας για την Επιδημιολογία των Καταστροφών (CRED, 2022), τα οποία συνοψίζονται στους Πίνακες 1.1 μέχρι 1.3 και δείχνουν τα κύρια χαρακτηριστικά των φυσικών καταστροφών κατά την πενταετία 2018-2022, διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Συνέβησαν 2008 φυσικές καταστροφές, το 87.4 % των οποίων σχετίζονται με το κλίμα. Οι πλημμύρες κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό τους (52.6 %).
- ▶ Περίπου 512 εκατομμύρια άνθρωποι επλήγησαν από φυσικές καταστροφές, που η συντριπτική τους πλειοψηφία (96.7 %) σχετίζεται με το κλίμα. Οι πλημμύρες είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό τους (37.0 %).
- ▶ Οι οικονομικές απώλειες εξαιτίας των φυσικών καταστροφών ήταν 888.7 δισ. δολάρια, με τις σχετιζόμενες με το κλίμα καταγίδες (55%), πλημμύρες (26%), πυρκαγιές (5%) και ξηρασίες (8%), να είναι υπεύθυνες για το 94 % των συνολικών οικονομικών απωλειών.

Πίνακας 1.1

Αριθμός φυσικών καταστροφών στον κόσμο						
Φυσική καταστροφή	2018	2019	2020	2021	2022	Σύνολο
Ξηρασία	17	15	12	16	14	74
Πλημμύρες	128	195	202	222	175	922
Θερμοκρασιακές μεταβολές	27	21	5	3	7	63
Πολύ ισχυροί άνεμοι/καταγίδες	97	91	128	119	107	542
Δασικές πυρκαγιές	10	14	9	19	15	67
Κατολισθήσεις	13	25	19	12	17	86
Σχετιζόμενες με το κλίμα	292	361	375	391	335	1754
Σύνολο	336	441	404	437	390	2008

Πίνακας 1.2

Αριθμός ατόμων που επηρεάστηκαν (εκατομμύρια)						
Φυσική καταστροφή	2018	2019	2020	2021	2022	Σύνολο
Ξηρασία	26	23	33	59	38	179
Πλημμύρες	34	35	34	30	57	190
Θερμοκρασιακές μεταβολές	0	0	0	0	0	0
Πολύ ισχυροί άνεμοι/ καταιγίδες	18	38	41	18	17	132
Δασικές πυρκαγιές	0.26	10	0.27	0.72	0.23	11.48
Κατολισθήσεις	0	0	0	0	0	0
Σχετιζόμενες με το κλίμα	78.26	106	108.27	107.72	112.23	512.48
Σύνολο	84	109.2	110.6	110.4	115.7	529.9

Πίνακας 1.3

Οικονομικές απώλειες (δισ. ευρώ)						
Φυσική καταστροφή	2018	2019	2020	2021	2022	Σύνολο
Ξηρασία	9.4	0.135	8.7	15.1	34.2	67.535
Πλημμύρες	19.7	36.82	51.45	75.96	44.39	228.32
Θερμοκρασιακές μεταβολές	0	0	0	5.6	0	5.6
Πολύ ισχυροί άνεμοι/ καταιγίδες	72.8	57.6	88.2	137.7	130.7	487
Δασικές πυρκαγιές	22.8	3.73	11.17	9.25	1.08	48.03
Κατολισθήσεις	0.93	0.2	0.13	0.25	0	1.51
Σχετιζόμενες με το κλίμα	125.63	98.485	159.65	243.86	210.37	838
Σύνολο	133.7	100.9	174.4	256.7	223	888.7

Στην Ευρώπη, η κοινωνία εκτίθεται ολοένα και περισσότερο στις φυσικές καταστροφές, καθώς τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται όλο και πιο συχνά και πιο σημαντικά. Η Γενική Διεύθυνση Ευρωπαϊκής Πολιτικής Προστασίας και Επιχειρήσεων Ανθρωπιστικής Βοήθειας (Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations, DG-ECHO) σημειώνει ότι η σοβαρότητα και η συχνότητα των φυσικών καταστροφών αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες στην Ευρωπαϊκή Ένωση εξαιτίας της ΚΑ, της αστικοποίησης, της αύξησης του πληθυσμού, και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης (ECHO, 2018). Επίσης, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (EEA, 2022a) αναφέρει ότι η Ευρώπη βιώνει έναν αυξανόμενο αριθμό καταστροφών, που προέρχονται από φυσικά φαινόμενα, τεχνολογικά ατυχήματα ή ανθρώπινες ενέργειες.

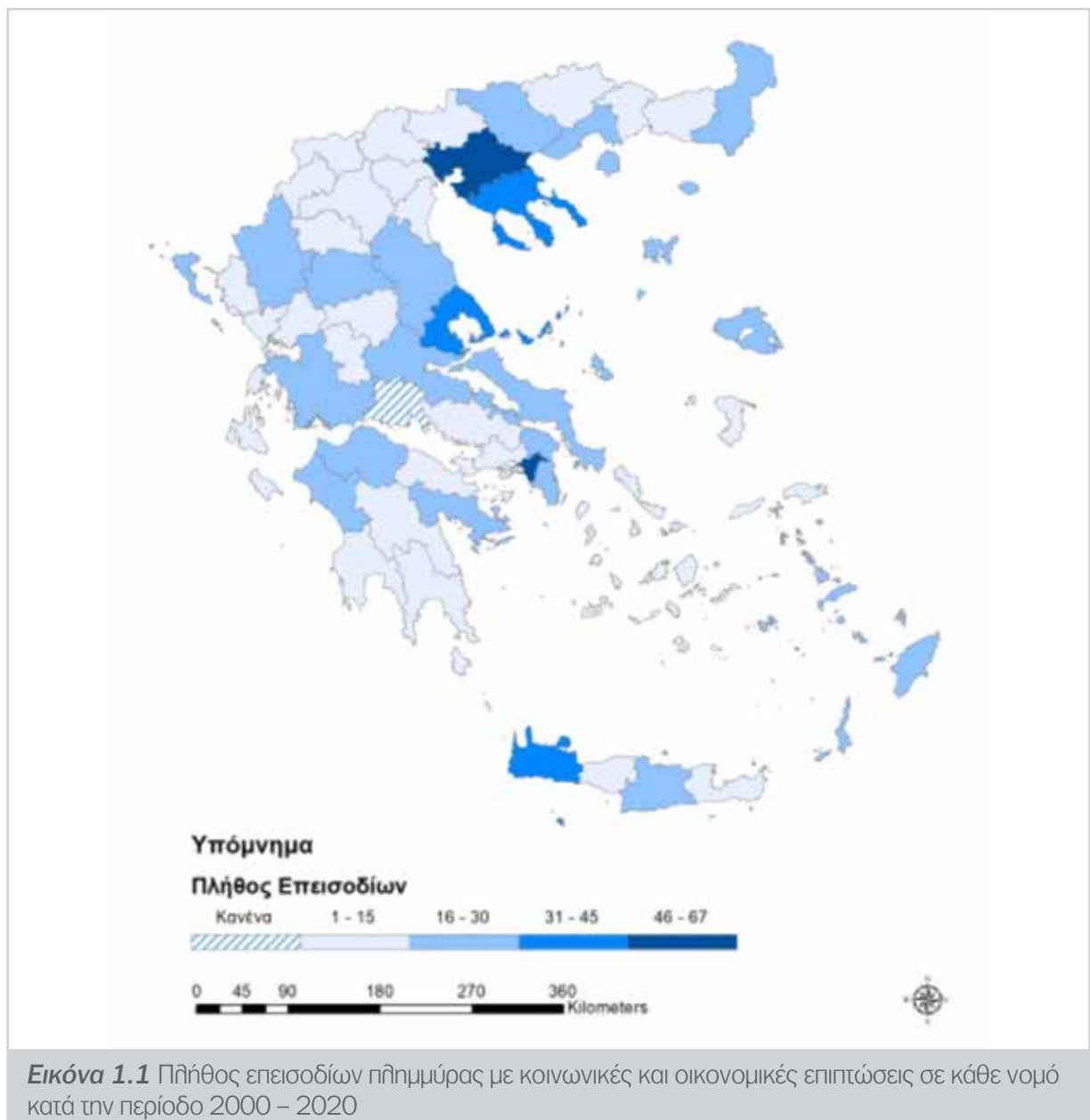
Τα κύρια συμπεράσματα εργασιών για τις πλημμύρες στην Ευρώπη είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Κατά την περίοδο 1870–2016 καταγράφηκαν 1564 συμβάντα πλημμυρών στην Ευρώπη που ήταν 870 (56%) ξαφνικές πλημμύρες, 606 (39%) πλημμύρες από υπερχειλίση ποταμών, 56 (4%) παράκτιες πλημμύρες και οι υπόλοιπες 23 (1.5%) συνδυασμός των παραπάνω (Paprotny et al., 2018).
- ▶ Κατά την περίοδο 2018–2022 καταγράφηκαν 269 συμβάντα πλημμυρών. Τα 77 από αυτά (15 των οποίων ήταν ξαφνικές πλημμύρες) αναγνωρίστηκαν ως πολύ σοβαρά, καθώς προκάλεσαν 415 θύματα, περισσότερους από 1300 τραυματίες και συνολικές οικονομικές απώλειες που ανέρ-

χονται σε 42.6 δισ. ευρώ. Από τα 77 αυτά συμβάντα τα 15 είναι ξαφνικές πλημμύρες (Alves, 2022· CRED, 2022).

- ▶ Κατά την περίοδο 1998-2009, η Ευρώπη υπέστη περισσότερες από 213 μεγάλες καταστροφικές πλημμύρες, στις οποίες περιλαμβάνονται οι πλημμύρες κατά μήκος των ποταμών Δούναβη και Έλβα το καλοκαίρι του 2002 (Ulbrich et al., 2003). Οι πλημμύρες αυτές προκάλεσαν περίπου 1126 θανάτους, τον εκτοπισμό περίπου μισού εκατομμυρίου ανθρώπων και τουλάχιστον 52 δισ.ευρώ σε ασφαλισμένες οικονομικές ζημιές (ΕΕΑ, 2011 και ΕΕΑ, 2022b), ενώ ακόμα και σήμερα συμβαίνουν καταστροφικές πλημμύρες (Cornwall, 2021).

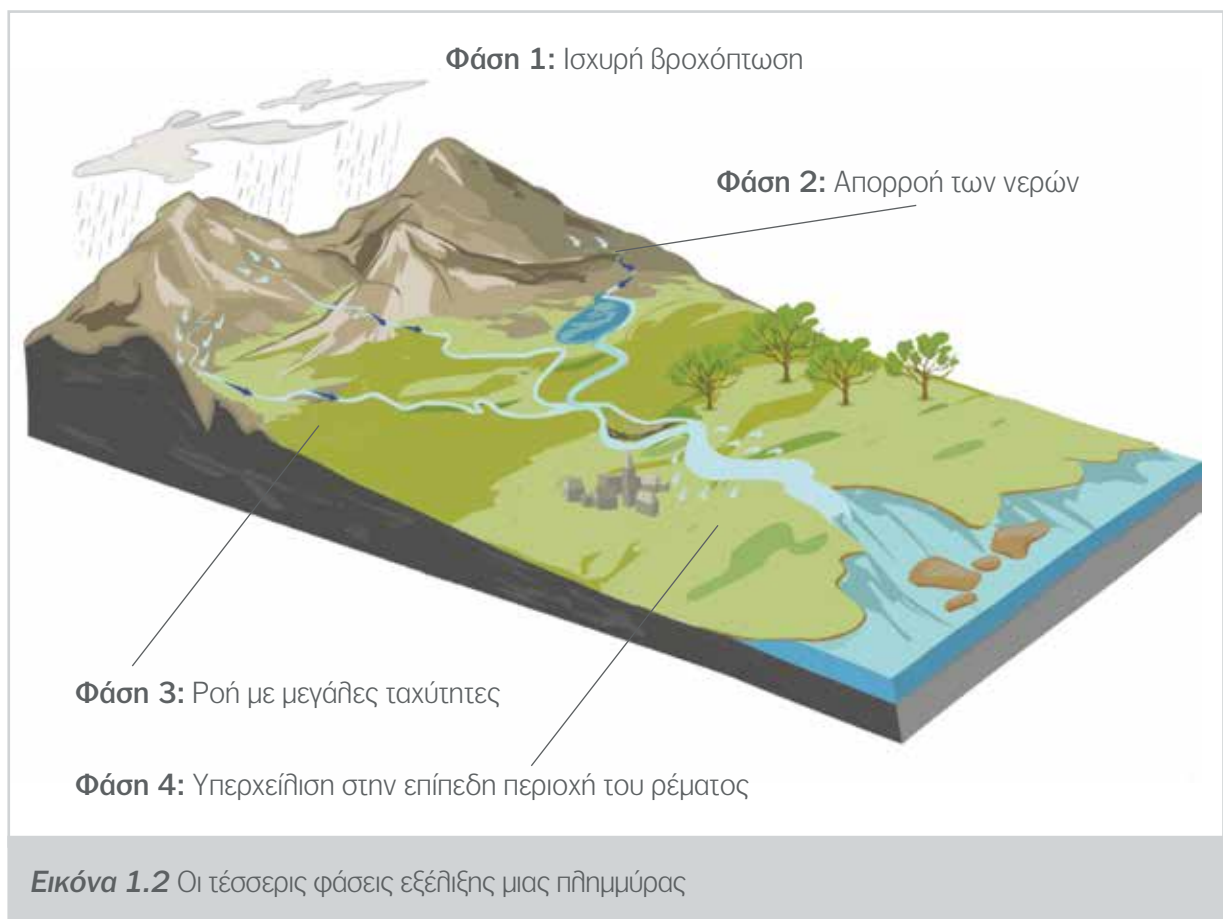
Στην Ελλάδα, κατά την περίοδο 1880–2010 αναγνωρίστηκαν 545 πλημμύρες, που προκάλεσαν 686 θύματα και εκτεταμένες ζημιές σε ολόκληρη τη χώρα, με τις περισσότερες να συμβαίνουν στις αστικές περιοχές κατά το μήνα Νοέμβριο (Diakakis et al., 2021). Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται το πλήθος των επεισοδίων πλημμύρας με κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις σε κάθε νομό για την περίοδο 2000 – 2020. Περισσότερα στοιχεία μπορεί να βρεθούν στις ιστοσελίδες του ΥΠΕΝ (2018) και του ΜΕΤΕΟ (2022), και στη βιβλιογραφία (Paragiannaki et al, 2022· Παπαγιαννάκη κ.ά., 2021).



1.1.2 Οι τέσσερις φάσεις εξέλιξης μιας πλημμύρας

Οι τέσσερις φάσεις εξέλιξης μιας πλημμύρας φαίνονται στην Εικόνα 1.2 και είναι οι ακόλουθες:

- ▶ **Φάση 1.** Δημιουργία επικίνδυνων καιρικών συνθηκών (π.χ. καταιγίδας) σε κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας και «μεταφορά» τους στην ευρύτερη περιοχή, όπου πραγματοποιείται ισχυρή βροχόπτωση.
- ▶ **Φάση 2.** Απορροή των νερών της βροχής πάνω στο έδαφος της λεκάνης απορροής μέχρι να καταλήξουν σε ένα (συντά ορεινό) υδατόρεμα.
- ▶ **Φάση 3.** Ροή των νερών στο υδατόρεμα με εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες ροής, εξαιτίας των μεγάλων κλίσεων του εδάφους, και σχετικά μικρά βάθη.
- ▶ **Φάση 4.** Ροή στην επίπεδη περιοχή του υδατορέματος, το οποίο υπερχειλίζει και πλημμυρίζει τους γειτονικούς δρόμους, βρίσκοντας συχνά τους ανθρώπους απροετοίμαστους και προξενώντας απώλεια ανθρώπινων ζώων και υλικές ζημιές.



Τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πλημμύρας είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, όπως είναι η ένταση (συνήθως εκφράζεται σε mm βροχής ανά ώρα), το συνολικό ύψος και η διάρκειά της.
- ▶ Τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως είναι η κλίση, η απορροφητικότητα και η βλάστηση του εδάφους, καθώς και η κατάσταση της κατά την έναρξη της βροχόπτωσης (συνθήκες υγρασίας). Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν το ύψος απορροής του νερού πάνω στη λεκάνη απορροής, την παροχή των νερών που καταλήγει στο υδατόρεμα, αλλά και το πόσο γρήγορα θα γίνει αυτό.

1.1.3 Οι ξαφνικές πλημμύρες

Η Αμερικανική Μετεωρολογική Εταιρεία (AMS) ορίζει τις πλημμύρες ταχείας απόκρισης ή απλά ξαφνικές πλημμύρες ως «τις πλημμύρες που προκαλούνται από ταχεία ανύψωση της στάθμης του νερού σε ποταμούς, ρέματα και χείμαρρους ή άλλους υδάτινους διαδρόμους (που σε κανονικές συνθήκες έχουν στεγνό πυθμένα), ή σε αστικές περιοχές, συνήθως ως αποτέλεσμα μιας έντονης βροχόπτωσης πάνω σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια ή μιας μέσης μέχρι έντονης βροχόπτωσης πάνω σε επιφάνειες πολύ κορεσμένου ή αδιαπέρατου εδάφους, και που γενικά συμβαίνει μέσα σε μερικά λεπτά ή ώρες μετά από ένα γεγονός βροχόπτωσης» (AMS, 2017).

Ο ορισμός αυτός δείχνει ότι τα κύρια χαρακτηριστικά των ξαφνικών πλημμυρών είναι:

- ▶ Πολύ έντονη βροχόπτωση.
- ▶ Πολύ γρήγορος ρυθμός ανύψωσης της επιφάνειας της ροής (μερικά m/h).
- ▶ Πολύ μεγάλος ρυθμός αύξησης της ταχύτητας ροής.
- ▶ Πολύ γρήγορη εξέλιξη της πλημμύρας. Οι περισσότερες ξαφνικές πλημμύρες προκαλούνται από ισχυρές βροχοπτώσεις και οι φάσεις 2, 3 και 4 πραγματοποιούνται σε λιγότερες από 3-6 ώρες.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις 9 Ιουνίου 1972 στο Black Hills της Dakota έπεσαν 381 mm σε 5 ώρες (υπήρξαν 238 νεκροί), ενώ στις 14 Ιουνίου 1990 στο Ohio έπεσαν 102 mm σε λιγότερο από 2 ώρες, προκαλώντας ένα πλημμυρικό κύμα - τοίχο νερού ύψους περίπου 10 m (υπήρξαν 26 νεκροί). Στη Μάνδρα το 2017 έπεσαν περισσότερα από 200 mm σε 6 ώρες και υπήρξαν 23 νεκροί, ενώ κατά τη διέλευση του κυκλώνα «Ιανός», τον Σεπτέμβριο του 2020, καταγράφηκαν τοπικά ύψη βροχόπτωσης που υπερέβησαν τα 500-600 mm σε 24 ώρες.

1.1.4 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών

Κύριες επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών

Για την αντιμετώπιση των πλημμυρών σε συνθήκες ΚΑ, είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς των πλημμυρών στις συνθήκες αυτές. Οι κύριες επιπτώσεις της ΚΑ στη συμπεριφορά των πλημμυρών είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

- ▶ Αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων βροχοπτώσεων, ειδικά σε περιοχές όπου αναμένεται να αυξηθούν οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις.
- ▶ Αύξηση της εδαφικής υγρασίας (αρχικές συνθήκες βροχόπτωσης) σε περιοχές όπου οι συνθήκες γίνονται περισσότερο υγρές με αποτέλεσμα οι πλημμύρες να γίνονται συχνότερες.
- ▶ Αύξηση της βροχόπτωσης στις περιοχές που χιονίζει και αντίστοιχη μείωση της χιονόπτωσης, εξαιτίας της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας.
- ▶ Έμμεσες επιδράσεις εξαιτίας άλλων διεργασιών, όπως π.χ. της μεταβολής του ισοζυγίου φερτών υλικών σε ένα υδατόρεμα.

Η συχνότητα και η ένταση των ακραίων βροχοπτώσεων σε συνθήκες ΚΑ μπορεί ενδεχομένως να αυξηθούν, ακόμη και σε περιοχές όπου η μέση βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί. Αυτό συμβαίνει συχνά σε χώρες της Μεσογείου (Lange, 2019), όπου τα τελευταία έτη καταγράφονται σύντομες και τοπικές έντονες βροχοπτώσεις που προκαλούν ξαφνικές πλημμύρες σε μικρές λεκάνες απορροής, πολλής από

τις οποίες βρίσκονται κοντά στις ακτές σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, παράγοντες που δεν σχετίζονται με την ΚΑ, όπως οι οθόνες αυξανόμενες λιγότερο διαπερατές επιφάνειες σε αστικές περιοχές και τα ελλιπώς σχεδιασμένα συστήματα διαχείρισης των όμβριων υδάτων συνεισφέρουν στην αύξηση του κινδύνου πλημμύρας (Cramer et al., 2018) με σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις στα κοινωνικοοικονομικά συστήματα και τις τοπικές κοινότητες (Cavicchia et al., 2018; Michaelides et al., 2018).

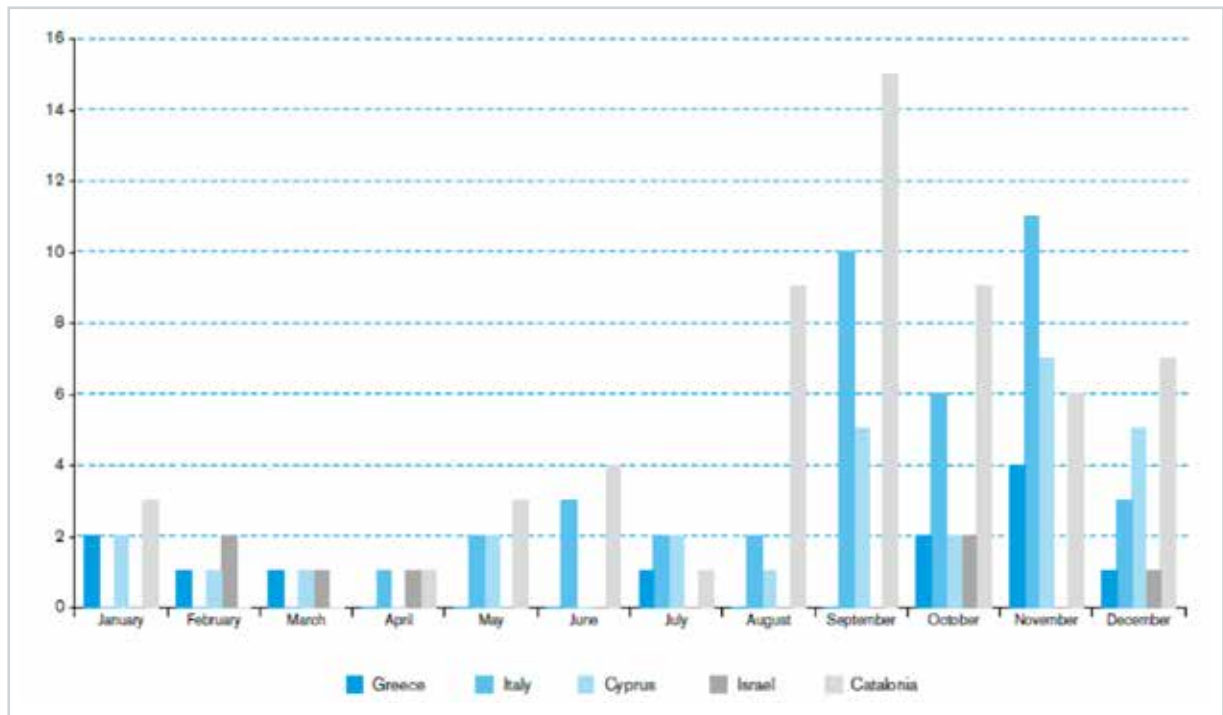
Επομένως, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των μελλοντικών πλημμυρών, θα πρέπει να προσδιοριστούν:

- ▶ οι αλληλαγές (α) των εποχιακών και των ετήσιων προτύπων βροχοπτώσεων, (β) των ακραίων βροχοπτώσεων, (γ) των αρχικών συνθηκών του εδάφους, (δ) των χιονοπτώσεων και (ε) της συμπεριφοράς των φερτών, και
- ▶ οι τρόποι αλληλεπίδρασης των παραπάνω παραγόντων.

Κλιματικά μοντέλα και σενάρια Κλιματικής Αλλαγής

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας πλημμύρας σε συνθήκες ΚΑ μπορεί να γίνει με την εφαρμογή κλιματικών μοντέλων για διάφορα σενάρια ΚΑ, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 4.3. Οι Roudier et al. (2016) προσδιόρισαν τις επιπτώσεις της ΚΑ στις ακραίες πλημμύρες και τις υδρολογικές ξηρασίες (συμβάντα με περίοδο επαναφοράς 10 και 100 έτη) στην Ευρώπη, εξαιτίας μιας αύξησης θερμοκρασίας του πλανήτη ίσης με 2°C. Αξιοποίησαν τις προσομοιώσεις έντεκα κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX (2022), με διόρθωση των μεροληπτικών σφαλμάτων, και τριών υδρολογικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα δείχνουν αρκετά αντικρουόμενα αποτελέσματα μεταξύ της βόρειας και της νότιας Ευρώπης. Τα μεγέθη των πλημμυρών αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά νότια των 60° Β, εκτός από ορισμένες περιοχές στη Βουλγαρία, Πολωνία, και νότια Ισπανία και οι επιπτώσεις να είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε μεγάλες περιοχές της Ρουμανίας, της Ουκρανίας, της Γερμανίας, της Γαλλίας και της βόρειας Ισπανίας. Βόρεια αυτής της γραμμής, οι πλημμύρες αναμένεται να μειωθούν στο μεγαλύτερο μέρος της Φινλανδίας, της βορειοδυτικής Ρωσίας και της βόρειας Σουηδίας, με εξαίρεση τη νότια Σουηδία και ορισμένες παράκτιες περιοχές στη Νορβηγία, όπου ενδέχεται να αυξηθούν οι πλημμύρες. Οι ερευνητές αυτοί καταλήγουν ότι τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι για ένα σημαντικό μέρος της Ευρώπης θα υπάρξει σαφής εντατικοποίηση των ακραίων υδρολογικών γεγονότων με αποτέλεσμα την αύξηση της ξηρασίας και των πλημμυρών. Οι ακραίες πλημμύρες προβλέπεται να είναι ιδιαίτερα επιζήμιες στην Ισπανία, την Ελλάδα, τη Γαλλία, την Ιρλανδία και την Αλβανία, οπότε είναι εξαιρετικά επείγον να ενσωματωθούν οι μελλοντικές αυτές αλληλαγές στην πολιτική της διαχείρισης των υδατικών πόρων και του σχεδιασμού των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας. Σε παρόμοια εργασία, οι Tramblay & Somot (2018) πραγματοποίησαν ένα σύνολο προσομοιώσεων με περιοχικά κλιματικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης και κατέληξαν σε συγκρίσιμα αποτελέσματα που δείχνουν σημαντικές αυξητικές τάσεις της ετήσιας μέγιστης βροχόπτωσης στις βόρειες μεσογειακές λεκάνες απορροής και αντίστροφα φθίνουσες τάσεις στις νότιες περιοχές. Στις περισσότερες προσομοιώσεις υπολογίστηκαν τα ίδια χωρικά μοτίβα, που φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητα από τα εξεταζόμενα σενάρια ΚΑ (RCP4.5 και RCP8.5, βλ. υποκεφάλαιο 4.3.3) και σύμφωνα με τους συγγραφείς αυτή η συμπεριφορά αποτελεί ισχυρή ένδειξη της επίδρασης της ΚΑ στην ετήσια μέγιστη βροχόπτωση.

Έτσι, οι πλημμύρες είναι και πιθανότατα θα παραμείνουν οι πιο επικίνδυνοι κλιματικοί κίνδυνοι που επηρεάζουν τις μεσογειακές χώρες και κατά συνέπεια τη χώρα μας. Κατά την περίοδο 1990-2006, οι ξαφνικές πλημμύρες οδήγησαν σε 4.566 θανάτους και προκάλεσαν συνολική ζημιά 29.14 δισ. ευρώ στην περιοχή της Μεσογείου (Llasat et al., 2010). Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του μέσου μηνιαίου αριθμού πλημμυρικών συμβάντων σε χώρες της Μεσογείου, από την οποία διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των συμβάντων πλημμυρών σε όλες τις εξετασθείσες περιοχές μεγιστοποιείται το φθινόπωρο (Σεπτέμβριος-Νοέμβριος). Η Καταλονία να είναι η περισσότερο πληγείσα περιοχή με 58 κρούσματα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.



Εικόνα 1.3 Χρονική εξέλιξη του μέσου μηνιαίου αριθμού πλημμυρικών συμβάντων σε χώρες της Μεσογείου (Πηγή: Llasat et al., 2010)

Κλιματικοί δείκτες πλημμυρών

Οι επιπτώσεις της ΚΑ στις πλημμύρες μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του υπολογισμού των τιμών κλιματικών δεικτών που τις χαρακτηρίζουν στις σημερινές και στις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Στους δείκτες αυτούς περιλαμβάνονται οι ακόλουθοι:

- ▶ Χαρακτηριστικά των έντονων βροχοπτώσεων που προκαλούν τις πλημμύρες, όπως είναι η συχνότητα εμφάνισης ή η περίοδος επαναφοράς τους ή η ποσότητα της βροχόπτωσης σε ένα χρονικό διάστημα (π.χ. τα mm βροχής σε ένα 24ωρο), βλ. π.χ. EPA (2022a).
- ▶ Χαρακτηριστικά των πλημμυρών, όπως είναι η ένταση τους. Αυτή χαρακτηρίζεται από την παροχή αιχμής, τη μέγιστη στάθμη πλημμύρας ή τον όγκο της πλημμύρας σε διάφορους χρόνους (24 ωρών, 72 ωρών και ολικό) (Wang et al., 2015· EPA, 2022a).

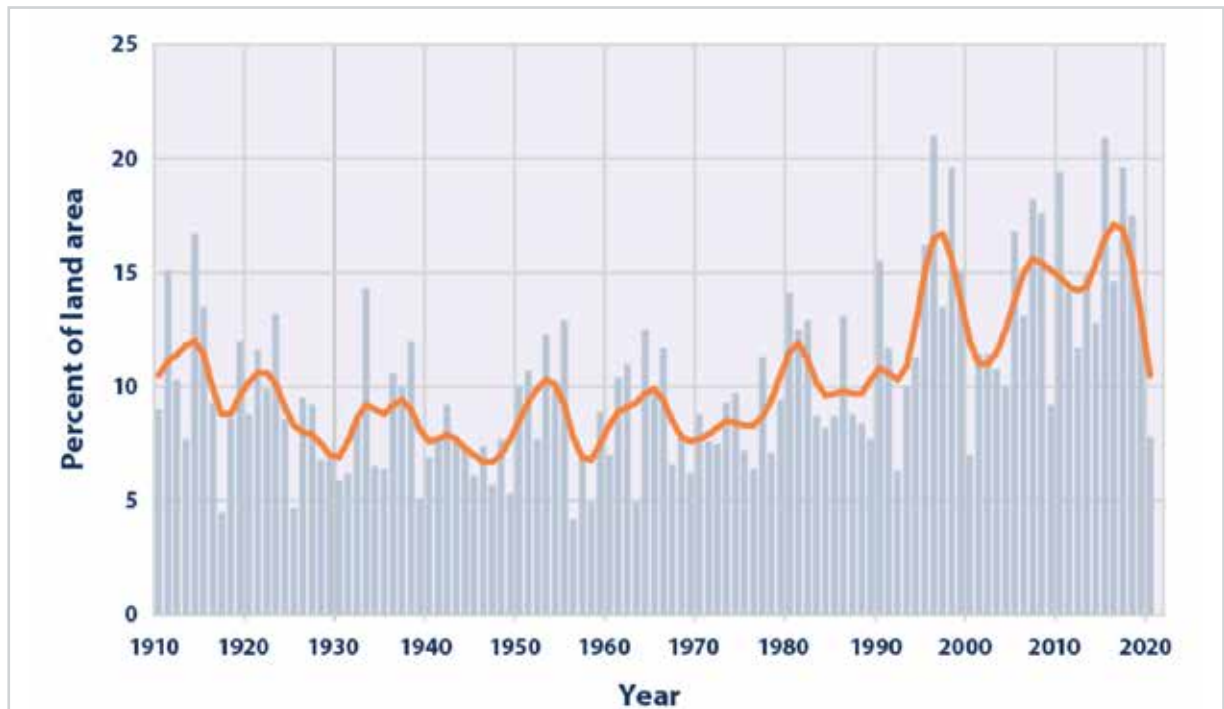
Στη συνέχεια περιγράφονται οι δείκτες της έντονης βροχόπτωσης και των πλημμυρών, οι οποίοι προτείνονται από την EPA (2022a και b).

Δείκτης έντονης βροχόπτωσης

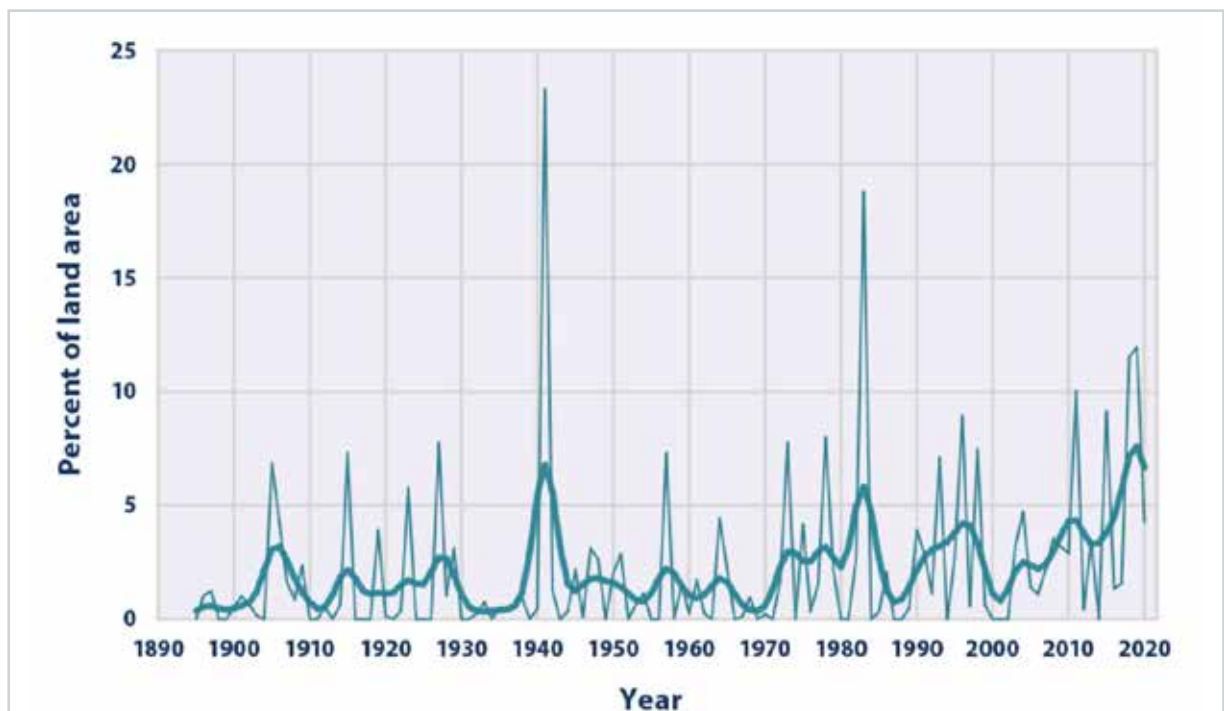
Ο δείκτης έντονης βροχόπτωσης (EPA, 2022a) μπορεί να εκφραστεί ως «το ποσοστό της συνολικής βροχόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος με τη μορφή ακραίων ημερήσιων γεγονότων». Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του ποσοστού της συνολικής έκτασης των 48 πολιτειών των ΗΠΑ, όπου ένα πολύ μεγαλύτερο από το κανονικό μέρος της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης προήλθε από ακραία μονοήμερα γεγονότα βροχόπτωσης.

Ο δείκτης αυτός μπορεί να διατυπωθεί ως Τυποποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης (SPI) όταν συγκρίνει την πραγματική συνολική ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή ενδιαφέροντος με το εύρος των αναμενόμενων αθροιστικών βροχοπτώσεων με βάση ιστορικά δεδομένα. Έτσι, όταν μια περιοχή δέχεται περισ-

σότερη βροχόπτωση από την αναμενόμενη κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, τότε η τιμή του SPI είναι θετική και στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητική. Ο SPI παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης περιπτώσεων διαφορετικών περιοχών και διαφορετικών περιόδων. Στην Εικόνα 1.5 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του ποσοστού της συνολικής έκτασης των 48 πολιτειών των ΗΠΑ, στην οποία η ετήσια τιμή του SPI είναι ίση ή μεγαλύτερη του 2.0.



Εικόνα 1.4 Χρονική εξέλιξη του ποσοστού της συνολικής έκτασης των 48 πολιτειών των ΗΠΑ στην οποία ένα πολύ μεγαλύτερο από το κανονικό μέρος της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης προήλθε από ακραία μονοήμερα γεγονότα βροχόπτωσης (Πηγή: EPA, 2022a)



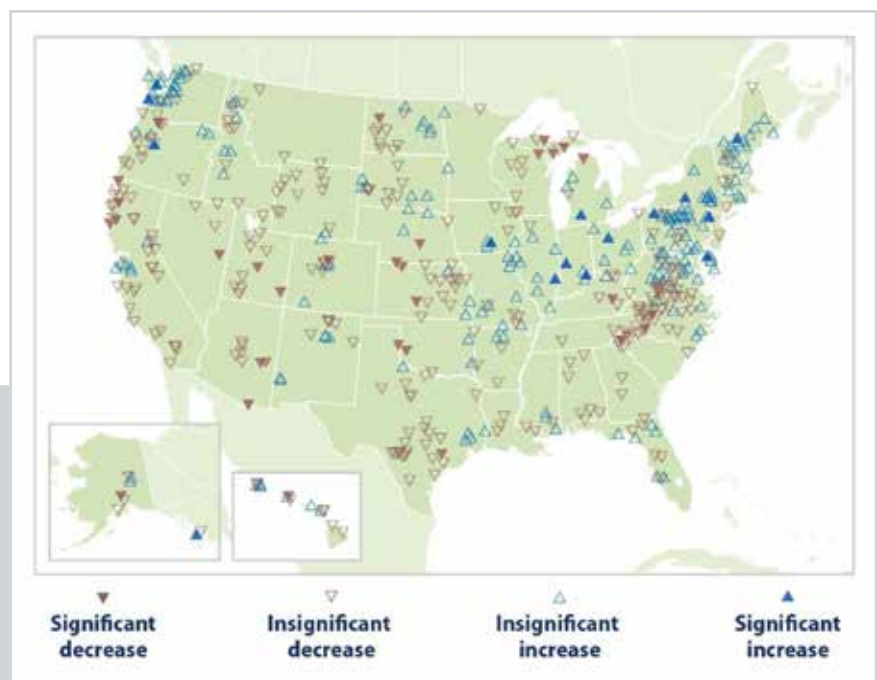
Εικόνα 1.5 Χρονική εξέλιξη του ποσοστού της συνολικής έκτασης των 48 πολιτειών των ΗΠΑ στην οποία η ετήσια τιμή του SPI ήταν ίση ή μεγαλύτερη του 2.0 (Πηγή: EPA, 2022b)

Δείκτης «Πλημμύρες Ποταμών»

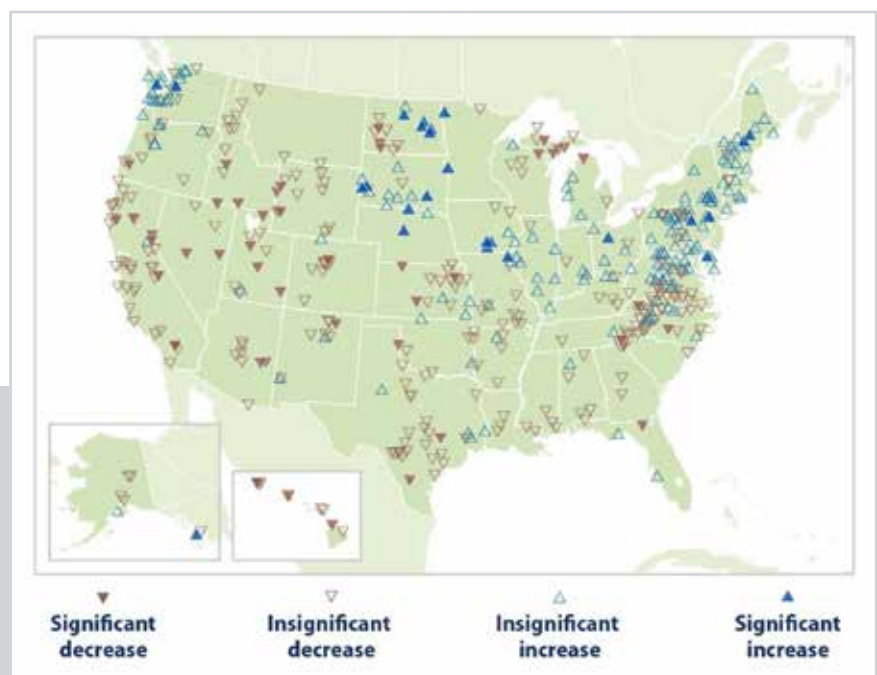
Ένας τρόπος για να προσδιοριστεί εάν το μέγεθος της πλημμύρας έχει αλλιάξει είναι μέσω του προσδιορισμού της χρονικής εξέλιξης του μεγαλύτερου συμβάντος πλημμύρας κάθε χρόνο. Ειδικότερα, είναι δυνατό να προσδιοριστεί σε διάφορες θέσεις η συμπεριφορά των παροχών αιχμής και να εκτιμηθεί έτσι εάν τα συμβάντα μεγάλων πλημμυρών έχουν γίνει περισσότερο ή λιγότερο συχνά με την πάροδο του χρόνου, με βάση τις ημερήσιες χρονοσειρές παροχών.

Στις Εικόνες 1.6 και 1.7 παρουσιάζονται οι μεταβολές του μεγέθους και της συχνότητας των πλημμυρών, αντίστοιχα, σε υδατορέματα των ΗΠΑ κατά την περίοδο 1965-2015. Με μπλε σύμβολα που δείχνουν προς τα πάνω σημειώνονται περιοχές, όπου οι πλημμύρες έχουν γίνει μεγαλύτερες, και με καφέ σύμβολα που δείχνουν προς τα κάτω περιοχές, όπου οι πλημμύρες έχουν γίνει μικρότερες. Με μονοχρωματικά σύμβολα σημειώνονται οι σταθμοί, όπου η αλλαγή ήταν στατιστικά σημαντική.

Εικόνα 1.6
Μεταβολές του μεγέθους των πλημμυρών σε υδατορέματα των ΗΠΑ κατά την περίοδο 1965-2015
(Πηγή: EPA, 2022c)



Εικόνα 1.7
Μεταβολές της συχνότητας των πλημμυρών σε υδατορέματα των ΗΠΑ κατά την περίοδο 1965-2015
(Πηγή: EPA, 2022c)



1.1.5 Μέτρα διαχείρισης πλημμυρών

Για την αποτελεσματική διαχείριση μιας πλημμύρας εφαρμόζονται μέτρα που κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- ▶ M1. Μέτρα πρόληψης, όπως π.χ. μέριμνα/έλεγχος ώστε οι κοίτες των υδατορεμάτων να είναι «καθαρές», δηλ. χωρίς επιχωματώσεις και κτίσματα.
- ▶ M2. Μέτρα προστασίας, τα οποία περιλαμβάνουν την κατασκευή των αναγκαίων τεχνικών έργων. Τα έργα αυτά είναι έργα ανάσχεσης στις ορεινές εκτάσεις (φράγματα συγκράτησης φερτών, κορμοδέματα και κορμοπλέγματα), έργα στην κύρια κοίτη των υδατορεμάτων (διευθέτηση), αλλιά και στην πλημμυρική κοίτη τους (φύτευση), και έργα διαχείρισης όμβριων υδάτων.
- ▶ M3. Μέτρα προετοιμασίας ώστε να υπάρχει ετοιμότητα για την αντιμετώπιση μιας επερχόμενης πλημμύρας. Αυτά περιλαμβάνουν την έγκαιρη προειδοποίηση του κοινού πριν από την πλημμύρα, την ενημέρωση και ετοιμότητά του, καθώς και την εφαρμογή Σχεδίου Δράσεων Έκτακτης Ανάγκης κατά την πλημμύρα.

Τα μέτρα αυτά (Πρόληψη – Προστασία – Προετοιμασία) που μπορεί χάρin απομνημόνευσης να χαρακτηριστούν ως τα 3Π των μέτρων που λαμβάνονται πριν συμβεί η πλημμύρα, για να ακολουθήσουν τα μέτρα αποκατάστασης μετά την πλημμύρα.

Η επιτυχία της εφαρμογής των παραπάνω μέτρων συναρτάται με τις αντίστοιχες προϋποθέσεις.

- ▶ Ύπαρξη οριοθέτησης του εξεταζόμενου ρέματος, δηλ. την επικύρωση του καθορισμού των οριογραμμών του με στόχο την εξασφάλιση της απρόσκοπτης απορροής των νερών και την περιβαλλοντική προστασία του.
- ▶ Πραγματοποίηση του σχεδιασμού των αναγκαίων τεχνικών έργων λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της ΚΑ και στις τρεις φάσεις της μελέτης: προκαταρκτική, προμελέτη και οριστική μελέτη.

Σήμερα, τα αντιπλημμυρικά έργα στη χώρα μας κατασκευάζονται συνήθως για περίοδο επαναφοράς ίση με 50 έτη, δηλ. πρακτικά για να «αντιμετωπίζουν» την ισχυρότερη πλημμύρα της 50-ετίας, η οποία αποκτά ολοένα και εντονότερα χαρακτηριστικά, εξαιτίας της ΚΑ.

Θα πρέπει να διαμορφωθούν κανονισμοί σχεδιασμού των έργων, στους οποίους να προδιαγράφεται επαρκώς η μεθοδολογία διερεύνησης των επιπτώσεων της ΚΑ, έτσι ώστε τα έργα αυτά να έχουν ανθεκτικότητα (resilience) και να προσαρμόζονται στις επιπτώσεις της ΚΑ (Stamou, 2022).

- ▶ Ύπαρξη ενός αποτελεσματικού Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ), με το οποίο πραγματοποιείται η πρόγνωση μιας πλημμύρας και η έγκαιρη προειδοποίηση του κοινού.

1.2 Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης

1.2.1 Γενικά

Τα Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης (ΣΕΠ) αποτελούν ένα βασικό μέτρο προσαρμογής στην ΚΑ και της μείωσης του κινδύνου καταστροφών. Στοχεύουν στην αποφυγή ή/και τη μείωση των ζημιών που προκαλούνται από κινδύνους, όπως πλημμύρες, καταιγίδες, ανέμους, δασικές πυρκαγιές, και καύσωνες.

Για να είναι αποτελεσματικά, τα ΣΕΠ πρέπει:

- ▶ να εμπλέκουν ενεργά τους ανθρώπους και τις κοινότητες που διατρέχουν κίνδυνο,
- ▶ να διευκολύνουν την εκπαίδευση και την ευαισθητοποίηση του κοινού για τον κίνδυνο,

- ▶ να διαδίδουν αποτελεσματικά τα μηνύματα και τις προειδοποιήσεις για επερχόμενο κίνδυνο, και
- ▶ να διασφαλίζουν μια σταθερή κατάσταση ετοιμότητας στους ανθρώπους για ενεργή και έγκαιρη δράση κατά του κινδύνου.

Τα ΣΕΠ για κινδύνους που σχετίζονται με το κλίμα, και κατ' επέκταση με την ΚΑ, πρέπει να βασίζονται στη σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία και να επικεντρώνονται σε άτομα ή τομείς που εκτίθενται στους κινδύνους. Αυτό συνεπάγεται την υιοθέτηση μιας συστημικής προσέγγισης που ενσωματώνει όλους τους σχετικούς παράγοντες κινδύνου, οι οποίοι αφορούν τους κλιματικούς κινδύνους ή την κοινωνική τρωτότητα.

Τα ΣΕΠ περιλαμβάνουν την ανίχνευση, την ανάλυση, την πρόγνωση του κινδύνου, και στη συνέχεια τη διάδοση προειδοποίησης που ακολουθείται από τη λήψη αποφάσεων για την απόκριση και την εφαρμογή ενεργειών με στόχο την αντιμετώπιση του κινδύνου. Τέτοια ΣΕΠ υπάρχουν σε πολλά μέρη του κόσμου, για την παρακολούθηση, την πρόγνωση και την προειδοποίηση των ανθρώπων, όπως π.χ. για τροπικούς κυκλώνες, πλημμύρες, καταιγίδες, τσουνάμι, χιονοστιβάδες, ανεμοστρόβιλους, ισχυρές καταιγίδες, ηφαιστειακές εκρήξεις, κύματα καυσώνων και ψύχους, δασικές πυρκαγιές, και ξηρασία (CLIMATE ADAPT, 2022).

1.2.2 Τα κύρια στοιχεία ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης

Για να είναι αποτελεσματικό ένα ΣΕΠ πρέπει να περιλαμβάνει τα τέσσερα αλληλοεπιδρώντα στοιχεία, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 1.4 (UNISDR, 2006). Η καρδιά ενός ΣΕΠ είναι το στοιχείο Σ2, δηλ. η αλληλοϋχία των ενεργειών «Παρακολούθηση – Πρόγνωση – Προειδοποίηση», που χάριν εύκολης απομνημόνευσης μπορεί να χαρακτηριστούν ως τα 3Π ενός ΣΕΠΠ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν είναι σημαντικά τα στοιχεία Σ1, Σ3 και Σ4.

Πίνακας 1.4

Τα κύρια στοιχεία ενός ΣΕΠ			
Σ1. Γνώση του κινδύνου	Σ2. Παρακολούθηση, πρόγνωση και προειδοποίηση	Σ3. Κοινοποίηση και κατανόηση των προειδοποιήσεων	Σ4. Ικανότητα απόκρισης
Συλλογή συστηματικών δεδομένων και εκτίμηση του κινδύνου.	Ανάπτυξη υπηρεσιών παρακολούθησης του κινδύνου και έγκαιρης προειδοποίησης.	Κοινοποίηση πληροφοριών και έγκαιρων προειδοποιήσεων.	Διαμόρφωση ικανοτήτων απόκρισης σε εθνικό και κοινοτικό επίπεδο.
Είναι γνωστοί οι κίνδυνοι και τα τρωτά σημεία; Ποια είναι τα μοτίβα και οι τάσεις αυτών; Είναι ευρέως διαθέσιμα οι χάρτες και τα δεδομένα κινδύνου;	Συστηματική παρακολούθηση των κρίσιμων μεγεθών. Υπαρξη καλής επιστημονικής βάσης για την πραγματοποίηση της πρόγνωσης. Δυνατότητα ακριβών και έγκαιρων προειδοποιήσεων.	Φτάνουν οι προειδοποιήσεις σε όλους όσους κινδυνεύουν; Γίνονται κατανοητοί οι κίνδυνοι και οι προειδοποιήσεις από αυτούς; Είναι οι πληροφορίες προειδοποίησης σαφείς και εύχρηστες;	Υπάρχουν σχέδια απόκρισης ενημερωμένα και δοκιμασμένα; Αξιοποιούνται οι ικανότητες και γνώσεις του τοπικού πληθυσμού; Είναι οι άνθρωποι προετοιμασμένοι και έτοιμοι να αντιδράσουν σωστά στις προειδοποιήσεις;

1.2.3 Τα Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη υπάρχει σημαντική εμπειρία για τα ΣΕΠ, ειδικά για αυτά που αφορούν τους κινδύνους πλημμυρών (περιλαμβανομένων των ξαφνικών πλημμυρών), καταιγίδων, δασικών πυρκαγιών, καυσώνων και ξηρασίας (CLIMATE ADAPT, 2022).

Τα ΣΕΠ σχετίζονται άμεσα με διάφορους τομείς που επηρεάζονται πρωταρχικά από κλιματικούς κινδύνους, όπως είναι η υγεία, η δασοκομία, τα κτίρια, οι παράκτιες και οι αστικές περιοχές. Μπορεί, όμως να αφορούν έμμεσα και άλλους τομείς, όπως είναι οι μεταφορές (όταν π.χ. οι δρόμοι ή οι σιδηροδρομικές γραμμές κλείνουν εκ των προτέρων ενόψει μιας σφοδρής κακοκαιρίας), ή ο τουρισμός (όταν π.χ. ομάδες τουριστών προειδοποιούνται να αποφεύγουν τις υπαίθριες δραστηριότητες κατά τη διάρκεια καύσωνα).

Ορισμένα ΣΕΠ παρέχουν υπηρεσίες και προϊόντα για περισσότερους από ένα κλιματικό κίνδυνο. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

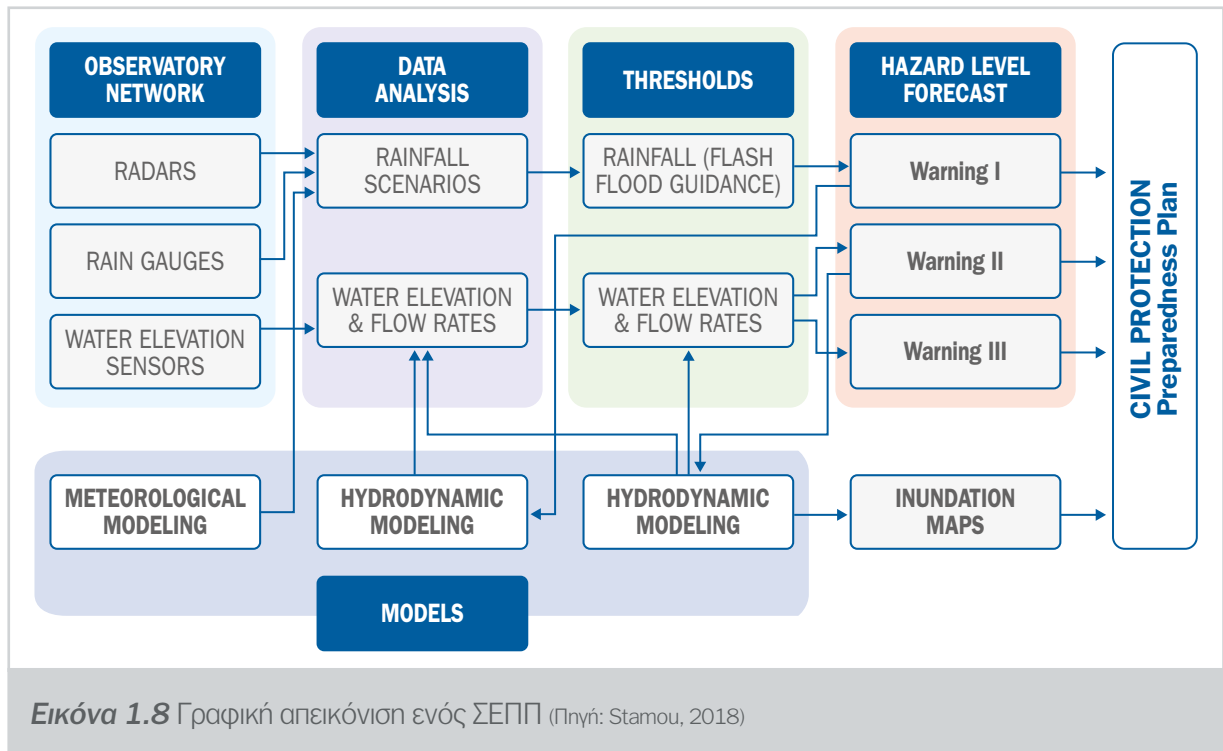
- ▶ **MeteoAlarm.** Αποτελεί μια κοινή προσπάθεια του Δικτύου των Ευρωπαϊκών Μετεωρολογικών Υπηρεσιών (EUMETNET, 2022) με την οποία παρέχονται ειδοποιήσεις στην Ευρώπη για ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως για ισχυρή βροχή με κίνδυνο πλημμύρας, ισχυρές καταιγίδες, θεελλιώδεις ανέμους, καύσωνες, δασικές πυρκαγιές, ομίχλη, χιόνι ή ακραίο κρύο με χιονοθύελλες, χιονοστιβάδες ή έντονες παράκτιες παλίρροιας.
- ▶ **Copernicus Climate Change Service.** Η Υπηρεσία Κλιματικής Αλλαγής του Copernicus (C3S, 2022) στοχεύει να υποστηρίξει τις ευρωπαϊκές πολιτικές και δράσεις για το κλίμα, συμβάλλοντας στην οικοδόμηση μιας ευρωπαϊκής κοινωνίας με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα έναντι της ΚΑ που προκαλείται από τον άνθρωπο. Το Copernicus (2022) είναι το Πρόγραμμα Παρατήρησης της Γης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αποτελείται από ένα σύνθετο σύνολο συστημάτων που συλλέγουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές, όπως δορυφόρους παρατήρησης της γης και αισθητήρες. Το Copernicus επεξεργάζεται αυτά τα δεδομένα και παρέχει στους χρήστες πληροφορίες μέσω ενός συνόλου υπηρεσιών που αφορούν έξι θεματικούς τομείς: ξηρά, θάλασσα, ατμόσφαιρα, ΚΑ, διαχείριση έκτακτης ανάγκης και ασφάλεια. Η C3S παρέχει αξιόπιστα και υψηλής ποιότητας κλιματικά δεδομένα και προσαρμοσμένες πληροφορίες για κοινωνικοοικονομικούς τομείς σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι οποίες είναι σημαντικές για την προσαρμογή στην ΚΑ.

1.2.4 Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης για Πλημμύρες

Τα κύρια στοιχεία των ΣΕΠ πλημμυρών (ΣΕΠΠ) είναι ίδια με αυτά των γενικών ΣΕΠ για ένα ή περισσότερους κινδύνους, που φαίνονται στον Πίνακα 1.4. Στην Εικόνα 1.8 παρουσιάζονται τα κύρια τμήματα ενός ΣΕΠΠ που αποτελούν τη βάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Στάμου, 2018· Σταμού, 2018).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο για τα ΣΕΠΠ, το Ευρωπαϊκό Σύστημα Ευαισθητοποίησης για τις Πλημμύρες (EFAS, 2022) υποστηρίζει προπαρασκευαστικά μέτρα πριν από την εμφάνιση μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων, ιδιαίτερα στις μεγάλες υπερεθνικές λεκάνες απορροής και σε ολόκληρη την Ευρώπη γενικότερα.

Το EFAS παρέχει συμπληρωματικές πληροφορίες για επερχόμενες πλημμύρες, όπως π.χ. πιθανολογικές, μεσοπρόθεσμες προγνώσεις πλημμυρών, δείκτες ξαφνικών πλημμυρών ή προγνώσεις των επιπτώσεων, στις αρμόδιες εθνικές και περιφερειακές αρχές. Επιπλέον, το EFAS ενημερώνει το Κέντρο



Συντονισμού Αντιμετώπισης Έκτακτης Ανάγκης (ERCC) για συνεχιζόμενα και πιθανώς επερχόμενα γεγονότα πλημμύρας σε όλη την Ευρώπη.

Η ανάπτυξη του EFAS ξεκίνησε το 1999 στο Κοινό Κέντρο Ερευνών (JRC) ως ερευνητικό έργο για ένα ΣΕΠΠ σε ευρωπαϊκή κλίμακα. Από το 2012 λειτουργεί πλήρως σε επιχειρησιακή μορφή στο πλαίσιο της Υπηρεσίας Διαχείρισης Έκτακτης Ανάγκης του Copernicus (EMS, 2022).

1.3 Στόχος της παρούσας έρευνας

Αν και υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία για τα ΣΕΠΠ, οι εργασίες που αφορούν μεθοδολογίες σχεδιασμού τους είναι πολύ περιορισμένες. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και εφαρμόζεται μια μεθοδολογία για τον υποδειγματικό σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ σε συνθήκες ΚΑ.

Η μεθοδολογία αυτή αποτέλεσε το κύριο αντικείμενο του Πακέτου Εργασίας του προγράμματος CLIMPACT (2022) που συντόνισε το ΕΜΠ, στο οποίο συμμετείχαν 28 ερευνητές από 11 ερευνητικές ομάδες: οκτώ του ΕΜΠ, δυο του ΕΚΠΑ και μια του ΕΑΑ.

Επιλέχθηκε ως περίπτωση εφαρμογής η πόλη της Μάνδρας εξαιτίας του υψηλού κινδύνου πλημμύρας στην περιοχή της, της ύπαρξης ικανοποιητικών δεδομένων από την καταστροφική πλημμύρα του Νοεμβρίου 2017 και της δυνατότητας διερεύνησης της επίδρασης των αντιπλημμυρικών έργων στον κίνδυνο πλημμύρας που ολοκληρώθηκαν πρόσφατα.

1.4 Διάρθρωση της Τεχνικής Έκθεσης

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελείται από επτά γενικά κεφάλαια που παρέχουν το βασικό υπόβαθρο των θεωρητικών και εφαρμοσμένων-πρακτικών γνώσεων που αφορούν τη μεθοδολογία σχεδιασμού ενός ΣΕΠΠ. Στο 8ο κεφάλαιο αξιοποιούνται οι γνώσεις αυτές με την εφαρμογή τους στην πόλη της Μάνδρας.

Το παρόν κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή, τα είδη των υπηρεσιών προειδοποίησης, ο χρόνος πρόγνωσης μιας πλημμύρας και τα βήματα της μεθοδολογίας σχεδιασμού ενός ΣΕΠΠ.

Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει την περιγραφή του σκοπού και των κύριων χαρακτηριστικών ενός Δικτύου Παρακολούθησης (ΔΠ) των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων και των συνιστωσών τους. Παρουσιάζονται οι μετρητές βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών ροής, τα δίκτυα των ραντάρ καιρού, οι μετεωρολογικοί δορυφόροι και τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Επίσης, περιγράφονται τα βήματα του βέλτιστου σχεδιασμού ενός ΔΠ και τα υφιστάμενα δίκτυα παρακολούθησης στην Ελλάδα.

Το κεφάλαιο 4 αναφέρεται στα Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ), τους τύπους τους, τους υπολογισμούς που πραγματοποιούν και τους τρόπους με τους οποίους προσομοιώνεται και εκτιμάται η επίδραση της ΚΑ στη συμπεριφορά των πλημμυρών. Περιγράφονται συνοπτικά τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ΜΠΠ, καθώς και τα συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών μεγάλης κλίμακας.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης του κινδύνου πλημμύρας.

Το κεφάλαιο 6 εστιάζει στα Κέντρα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ) και τις υποδομές τους. Παρουσιάζονται οι κτιριακές εγκαταστάσεις, ο εξοπλισμός και το προσωπικό τους, καθώς και ο τρόπος λειτουργίας τους σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους και οι μέθοδοι μετάδοσης των δεδομένων του ΔΠ προς το ΚΠΠ.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται η διαδικασία μετάδοσης και επικοινωνίας προειδοποιήσεων και η ετοιμότητα απόκρισης του κοινού. Σε αυτή περιλαμβάνονται η δόμηση, η μετάδοση των μηνυμάτων προειδοποίησης, και η λήψη, κατανόηση και αποδοχή τους για την πραγματοποίηση των ορθών αντιδράσεων. Επίσης, παρουσιάζονται τα θέματα των σφαλμάτων και της αβεβαιότητας των προειδοποιήσεων, η ικανότητα απόκρισης του κοινού και η διαδικασία προειδοποιήσεων για πλημμύρα στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο 8 εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία στο σχεδιασμό του ΣΕΠΠ της πόλης της Μάνδρας.

1.5 Βιβλιογραφία

1. AMS (2017). American Meteorological Society. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Flash_flood
2. Alves, B. (2022). Number of reported floods in Europe 2022. Statista. Retrieved February 2, 2023, from <https://www.statista.com/statistics/1340294/number-of-flood-events-europe/>
3. Cavicchia, L., Scocimarro, E., Gualdi, S., Marson, P., Ahrens, B., Berthou, S., Conte, D., Dell'Aquila, A., Drobinski, P., Djurdjevic, V., Dubois, C., Gallardo, C., Li, L., Oddo, P., Sanna, A., & Torma, C. (2018). Mediterranean extreme precipitation: A multi-model assessment. *Climate Dynamics*, 51(3), 901–913. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3245-x>
4. CLIMATE ADAPT (2022). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/establishment-of-early-warning-systems>
5. CLIMPACT (2022). <https://climpact.gr/main/>
6. Cornwall, W. (2021). Europe's deadly floods leave scientists stunned. *Science*, 373(6553), 372–373. <https://doi.org/10.1126/science.373.6553.372>
7. Copernicus (2022). <https://www.copernicus.eu/en/npou>
8. Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Pe uelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
9. CRED (2022). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. <https://www.cred.be>
10. C3S (2022). Copernicus Climate Change Service. <https://climate.copernicus.eu/about-us>.
11. Diakakis, M., Mavroulis, S., & Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards*, 62(2), 485–500. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0090-z>
12. ECHO (2018). ECHO Factsheet – European Disaster Risk Management, January 2018.
13. EEA (2022a). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/>
14. EEA (2022b). European Environment Agency. European Environment Agency Deaths related to flooding in Europe Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/people-per-million-population-affected-4>
15. EFAS (2022). European Flood Awareness System. <https://www.efas.eu/en>
16. EMS (2022). Emergency Management System. <https://emergency.copernicus.eu/>
17. EPA (2022a). Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/climatechange-science/frequently-asked-questions-about-climate-change#climate-change>
18. EPA (2022b). Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation>
19. EPA (2022c). Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation>
20. EUMETNET (2022). Network of European Meteorological Services. <https://www.eumetnet.eu>, επίσης: <http://www.emy.gr/emyl/el/warning/meteoalarm>
21. EURO-CORDEX (2022). <https://www.euro-cordex.net/>
22. Lange, M. A. (2019). Impacts of climate change on the Eastern Mediterranean and the Middle East and North Africa region and the Water–Energy Nexus. *Atmosphere*, 10(8), 455. <https://doi.org/10.3390/atmos10080455>

23. Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Prat, M. A., Porc, F., Price, C., Mugnai, A., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Katsanos, D., Michaelides, S., Yair, Y., Savvidou, K., & Nicolaidis, K. (2010). High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: The flash preliminary database. *Advances in Geosciences*, 23, 47–55. <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-47-2010>
24. Michaelides, S., Karacostas, T., Sanchez, J. L., Retalis, A., Pytharoulis, I., Homar, V., Romero, R., Zanis, P., Giannakopoulos, C., Bühl, J., Ansmann, A., Merino, A., Melcón, P., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bruggeman, A., Lopez-Moreno, J. I., Berthet, C., Katragkou, E., ... Nisantzi, A. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Research*, 208, 4–44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>
25. METEO (2022). <https://www.meteo.gr/>
26. Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., & Kotroni, V. (2013). A database of high-impact weather events in Greece: A descriptive impact analysis for the period 2001–2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 727–736. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-727-2013>
27. Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Napoles, O., & Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04253-1>
28. Roudier, P., Andersson, J. C., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., & Ludwig, F. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*, 135(2), 341–355. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>
29. Stamou, A. (2018). The Disastrous Flash Flood of Mandra in Attica-Greece and now what? *Civil Engineering Research Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.19080/cerj.2018.05.555677>
30. Stamou, A. (2022). Towards ‘Climate Proof’ Infrastructure Projects. *Civil Eng Res J*. 2022; 13(3): 555861. DOI: 10.19080/CERJ.2021.13.555861
31. Trambly, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
32. Ulbrich, U., Brücher, T., Fink, A. H., Leckebusch, G. C., Krüger, A., & Pinto, J. G. (2003). The Central European floods of August 2002: Part 1 – Rainfall Periods and flood development. *Weather*, 58(10), 371–377. <https://doi.org/10.1256/wea.61.03a>
33. UNISDR (2006). <https://www.unisdr.org/2006/ppew/whats-ew/basics-ew.htm>
34. Wang, L.-N., Chen, X.-H., Shao, Q.-X., & Li, Y. (2015). Flood indicators and their clustering features in Wujiang River, South China. *Ecological Engineering*, 76, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.018>
35. WMO (2022). World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction>
36. Παπαγιαννάκη, Κ., Κοτρώνη Β., & Λαγουβάρδος, Κ. (2021, Απρίλιος). Αθήνα, Απρίλιος 2021, Καιρικά επεισόδια με κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις στην Ελλάδα την περίοδο 2000-2020, Αθήνα.
37. Στάμου, Α. (2018). Η καταστροφική πλημμύρα της Μάνδρας. Ενέργειες για την αποφυγή παρόμοιας καταστροφής στο μέλλον. *Προμηθείας*, 9: 6-7, Μάιος - Ιούνιος 2018.
38. ΥΠΕΝ (2018). Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας. https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=504

Μεθοδολογία Σχεδιασμού Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών

Ε. Μπαλτάς, Α. Ι. Στάμου

2.1 Εισαγωγή

Ο στόχος μιας εθνικής υπηρεσίας πρόγνωσης πλημμυρών είναι να παρέχει ένα Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ) που καλύπτει όλη την επικράτεια της χώρας. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό δεν είναι δυνατό και συχνά επιδιώκεται ένας συμβιβασμός που περιλαμβάνει ένα τεχνολογικά πλήρες και εξελιγμένο ΣΕΠΠ, κυρίως για τις περιοχές υψηλού κινδύνου και λιγότερο εξελιγμένα και οικονομικότερα ΣΕΠΠ για τις περιοχές χαμηλού κινδύνου, τα οποία μπορεί να βελτιώνονται σταδιακά.

Για το σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ είναι απαραίτητο να είναι κατανοητά τα ακόλουθα:

- ▶ Οι διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή που συμβαίνουν σε μια λεκάνη απορροής.
- ▶ Το είδος της παρεχόμενης Υπηρεσίας του ΣΕΠΠ, λαμβάνοντας υπόψη τους οικονομικούς και τεχνολογικούς περιορισμούς της περίπτωσης που εξετάζεται.

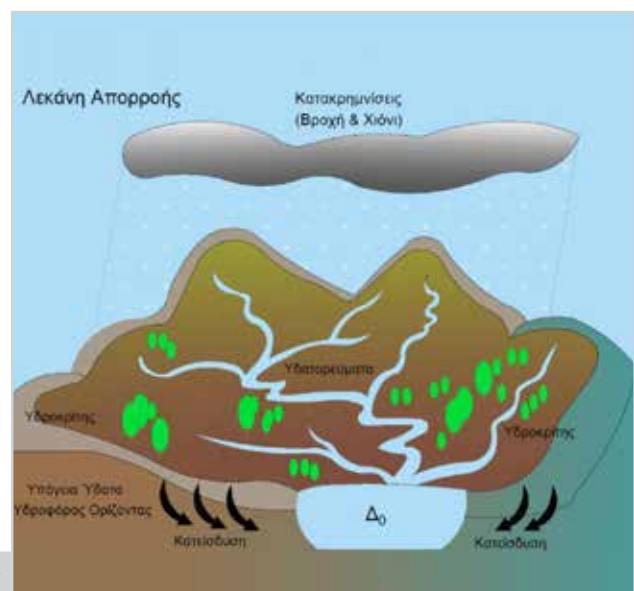
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή που οδηγούν στην παραγωγή του υδρογραφήματος απορροής. Αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών αυτών περιέχονται σε βιβλία και σημειώσεις ειδικευμένων επιστημόνων. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα: Μιμίκου et al. (2018), Ευστρατιάδης (2019), Κουτσογιάννης (1997), Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1997), Μαμάσης και Κουτσογιάννης (1999 και 2000), Μιμίκου (2006), Μιμίκου και Μπαλτάς (2013) και Τσακίρης (1995).

2.2 Διεργασία μετατροπής βροχόπτωσης σε απορροή

2.2.1 Υδρογράφημα απορροής

Στην Εικόνα 2.1 (α) παρουσιάζεται σκαρίφημα μιας υδρολογικής λεκάνης, στην οποία πέφτουν τα νερά της βροχής, απορρέουν πάνω σε αυτή και καταλήγουν στη διατομή ενός υδατορέματος ΔΟ που φαίνεται στις Εικόνες 2.1 (α) και (β). Ένα μέρος των νερών της βροχής αρχικά εμποδίζεται από τη χλωρίδα να φτάσει στο έδαφος και απορροφάται από αυτή ή εξατμίζεται ή καταλήγει στο έδαφος, και ένα άλλο αρχικά παγιδεύεται επιφανειακά στις μικρές κοιλιότητες του εδάφους και στη συνέχεια διηθείται στο έδαφος ή εξατμίζεται.

Εικόνα 2.1 (α): Το υδρογράφημα απορροής



Διακρίνονται τα είδη απορροής που φαίνονται στην Εικόνα 2.1 (β) και είναι τα ακόλουθα:

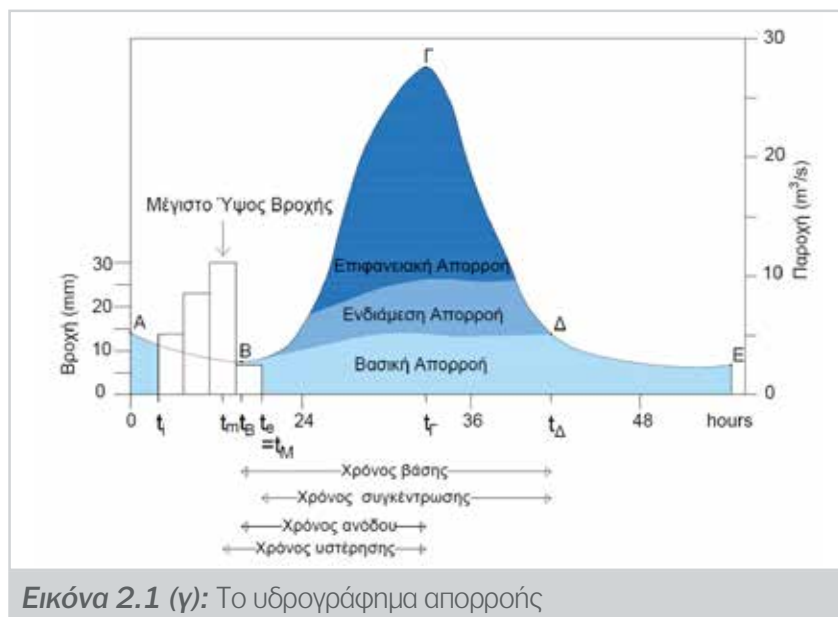
- ▶ Η επιφανειακή απορροή που αφορά το νερό που ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους.
- ▶ Η ενδιάμεση απορροή που περιλαμβάνει το νερό που κινείται πλευρικά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη και εμφανίζεται μετά από κάποια απόσταση πάλι στην επιφάνεια ή απευθείας στην κοίτη του υδατορέματος.
- ▶ Η βασική απορροή που περιλαμβάνει το νερό που προέρχεται από υπόγεια ροή από την κορεσμένη ζώνη.

Η επιφανειακή και η ενδιάμεση απορροή απαρτίζουν την άμεση απορροή.



Εικόνα 2.1 (β): Το υδρογράφημα απορροής

Στο αριστερό τμήμα (βλ. αριστερό κατακόρυφο άξονα) της Εικόνας 2.1 (γ), παρουσιάζεται το βροχογράφημα, δηλ. η χρονική διακύμανση του ύψους βροχής ενός συμβάντος βροχοπτώσεως, που ξεκινά τη χρονική στιγμή $t=t_i$, φτάνει τη μέγιστη τιμή του που είναι περίπου ίση με 30 mm τη χρονική στιγμή $t=t_m$ και σταματάει τη χρονική στιγμή $t=t_e$.



Εικόνα 2.1 (γ): Το υδρογράφημα απορροής

Στην Εικόνα 2.1 (γ), φαίνεται η χρονική μεταβολή της παροχής του υδατορέματος στη διατομή Δ0 (βλ. δεξιό κατακόρυφο άξονα), η οποία ξεκινά να αυξάνει τη χρονική στιγμή t_B , όταν τα νερά της βροχής που απορρέουν στη λεκάνη απορροής φτάνουν στη διατομή Δ0. Το διάγραμμα χρόνου – παροχής υδατορέματος καλείται **υδρογράφημα απορροής**, εκφράζει την απόκριση μιας λεκάνης απορροής σε μια

συγκεκριμένη βροχή, και αποτελεί το σημαντικότερο υδρολογικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας πρόγνωσης ενός ΣΕΠΠ. Υπολογίζεται με υδρολογικά μοντέλα (βλ. υποκεφάλαιο 4.2) και έχει πολύ μεγάλη σημασία η γεωμετρική μορφή του και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

2.2.2 Γεωμετρική μορφή του υδρογραφήματος απορροής

Στο υδρογράφημα της Εικόνας 2.1 (γ) διακρίνονται τα ακόλουθα τμήματα ή καμπύλες του:

- ▶ Καμπύλη ανόδου (ΒΓ). Η παροχή του υδατορέματος αρχίζει να αυξάνεται με έντονο ρυθμό μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της που καλείται παροχή αιχμής (περίπου ίση με $28 \text{ m}^3/\text{s}$) τη χρονική στιγμή t_r . Η μορφή της καμπύλης αυτής εξαρτάται από (1) τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που διαμορφώνουν την αναλογία των χρόνων διαδρομής του νερού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και τα υδατορέματα που καταλήγουν στο κύριο υδατόρεμα και (2) τα χαρακτηριστικά της βροχής, που είναι κυρίως η διάρκεια, η ένταση και το χρονικό προφίλ της. Στην αρχή, το τμήμα ΒΓ είναι κοίλο γιατί (1) μέρος μόνο της ΛΑΠ συνεισφέρει στην παραγωγή απορροής, και (2) η διηθητικότητα, η συγκράτηση του νερού στις κοιλιότητες του εδάφους, η εξάτμιση και η συγκράτηση νερού από τη φυτοκάλυψη, είναι αναλογικά μεγαλύτερες από ότι στη συνέχεια.
- ▶ Καμπύλη καθόδου (ΓΔΕ). Μετά τη μέγιστη τιμή της, η παροχή αρχίζει να μειώνεται συνεχώς. Τη χρονική στιγμή t_d σταματά η άμεση απορροή, αλλά συνεχίζει η βασική απορροή, σχηματίζοντας το τμήμα ΔΕ. Το σχήμα του τμήματος αυτού είναι πρακτικά ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις της έντασης της βροχής που προκάλεσε την απορροή και της διηθητικότητας του εδάφους, καθώς εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Το χρονικό διάστημα t_d-t_B καλείται **διάρκεια πλημμύρας** ή χρόνος βάσης.
- ▶ Το χρονικό διάστημα t_r-t_B καλείται **χρόνος ανόδου**.
- ▶ Το χρονικό διάστημα t_r-t_m καλείται **χρόνος υστέρησης** (αιχμής).
- ▶ Το χρονικό διάστημα t_d-t_m καλείται **χρόνος συγκέντρωσης**, όπου t_m είναι ο χρόνος λήξης της ενεργού βροχής, που μπορεί να ταυτίζεται και με τη χρονική στιγμή λήξης της βροχής t_e . Ως χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό που συμβάλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης απορροής στη διατομή εξόδου, δηλ. τη Δ_0 . Ο χρόνος συγκέντρωσης εμφανίζεται στην Εικόνα 2.1 (γ) ως η χρονική απόσταση από τη λήξη της ενεργού βροχής μέχρι τη λήξη της άμεσης απορροής.

2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος απορροής

Το σχήμα ενός υδρογραφήματος επηρεάζεται κυρίως από μετεωρολογικούς παράγοντες και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Γενικά, η καμπύλη ανόδου διαμορφώνεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της βροχής, τα οποία όμως επηρεάζουν ελάχιστα την καμπύλη καθόδου. Επιπλέον, σημαντική επίδραση μπορεί να έχουν και γεωλογικοί παράγοντες, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων και των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζουν κυρίως τον όγκο της απορροής, όπως π.χ. οι διαπερατές εδαφικές στρώσεις δημιουργούν βαθιά διήθηση, μικρό όγκο άμεσης απορροής και πολύ χαμηλή αιχμή του υδρογραφήματος απορροής (Μιμίκου & Μπαλιτάς, 2006).

Πίνακας 2.1

Παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα ενός υδρογραφήματος	
Κλιματικοί παράγοντες	Επίδραση στη μορφή του υδρογραφήματος
Ένταση, διάρκεια και χρονική κατανομή της βροχής	Βροχή μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας δημιουργεί: υψηλή αιχμή, καμπύλες ανόδου και καθόδου με απότομες κλίσεις και περιορισμένη διάρκεια επιφανειακής απορροής. Βροχή μικρής έντασης και μεγάλης διάρκειας (με το ίδιο ύψος): δημιουργεί χαμηλή αιχμή, καμπύλες ανόδου και καθόδου με μικρές κλίσεις και μεγαλύτερη διάρκεια επιφανειακής απορροής.
Κατανομή της βροχής πάνω στη λεκάνη απορροής	Βροχή με το μεγαλύτερο ύψος της να πέφτει κοντά στην έξοδο της λεκάνης απορροής δημιουργεί: υψηλή αιχμή και καμπύλες ανόδου και καθόδου με απότομες κλίσεις. Βροχή με το μεγαλύτερο ύψος της να πέφτει μακριά από την έξοδο της λεκάνης απορροής δημιουργεί: χαμηλότερη και πιο πεπλατυσμένη αιχμή, καμπύλη ανόδου με καθυστέρηση και καμπύλη καθόδου με σχετικά ομαλή κλίση.
Διεύθυνση κίνησης βροχής	Βροχή που κινείται από την έξοδο της λεκάνης απορροής προς τα ανάντη δημιουργεί: χαμηλότερη αιχμή και μεγαλύτερη διάρκεια επιφανειακής απορροής σε σχέση με βροχή που έχει διεύθυνση προς την έξοδο της λεκάνης απορροής. Σημείωση: Η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη σε λεκάνες απορροής με μακρόστενο σχήμα.
Μορφή κατακρημνίσματος	Η παρουσία πάγου δημιουργεί: μικρή αιχμή με μεγάλη διάρκεια, εξαιτίας της αργής τήξης του.
Τύπος βροχής	Ανοδικές βροχές (ανοιξιάτικες και καλοκαιρινές καταιγίδες): δημιουργούν υψηλή αιχμή σε μικρές λεκάνες απορροής, ενώ έχουν περιορισμένη επίδραση σε μεγάλες λεκάνες απορροής εξαιτίας της περιορισμένης τους έκτασης. Βροχές από εκτεταμένα μετωπικά συστήματα σε συνδυασμό με ορογραφικούς παράγοντες: δημιουργούν υψηλή και παρατεταμένη αιχμή.
Τοπογραφικοί παράγοντες	Επίδραση στη μορφή του υδρογραφήματος
Μέγεθος και σχήμα της λεκάνης απορροής	Μια λεκάνη απορροής με σχήμα που τα υδατορέματα έχουν μικρό μήκος και συγκλίνουν προς την έξοδο της δημιουργεί: απότομη καμπύλη ανόδου και υψηλή αιχμή (κυκλικές λεκάνες απορροής). Το αντίθετο συμβαίνει σε μακρόστενες λεκάνες απορροής.
Κατανομή και πυκνότητα του δικτύου των υδατορεμάτων	Μια λεκάνη απορροής με πυκνό και ομοιόμορφα καταμεμημένο δίκτυο υδατορεμάτων δημιουργεί: μικρότερες διαδρομές του νερού (και μικρότερους χρόνους) για να φτάσει στην έξοδο και κατά συνέπεια απότομη καμπύλη ανόδου και υψηλή αιχμή.
Κλίση πρανών της λεκάνης απορροής	Μια λεκάνη απορροής με απότομα πρανή δημιουργεί: μικρότερη βάση, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου και υψηλή αιχμή.
Κλίση κύριου υδατορέματος	Ένα κύριο υδατόρεμα με μεγάλη κλίση δημιουργεί: απότομη καμπύλη καθόδου.
Ανάγλυφο του εδάφους της λεκάνης απορροής	Μια λεκάνη απορροής με λίγες εδαφικές κοιλότητες δημιουργεί: μικρότερη βάση, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου και υψηλή αιχμή.
Ποσοστό και είδος της φυτοκάλυψης	Μια λεκάνη απορροής με μεγάλο ποσοστό φυτοκάλυψης από δέντρα με πυκνό φύλλωμα δημιουργεί: ομαλό υδρογράφημα με μεγάλη χρονική βάση και χαμηλή αιχμή.

2.3 Είδη υπηρεσιών προειδοποίησης

Ένα ΣΕΠΠ μπορεί να παρέχει διάφορες υπηρεσίες που συνήθως καθορίζονται από τις τεχνικές δυνατότητες πρόγνωσης του κινδύνου πλημμύρας και τις οικονομικές απαιτήσεις του για να προστατευτούν οι ευάλωτοι πληθυσμοί και οι υποδομές. Οι κύριοι τύποι υπηρεσίας προειδοποίησης για πλημμύρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 με αυξανόμενη πολυπλοκότητα και λεπτομέρεια εφαρμογής (WMO, 2011).

Πίνακας 2.2

Κύριοι τύποι υπηρεσίας προειδοποίησης για πλημμύρα (WMO, 2011)	
ΥΠ1	Συναγερμός με βάση την υπέρβαση ενός ορίου (threshold-based) υδροδυναμικών παραμέτρων σε ένα υδατόρεμα, όπως π.χ. της στάθμης ροής ή της παροχής ή του ρυθμού αύξησης τους. Για αυτή την απλή μορφή υπηρεσία, είναι απαραίτητη η διάθεση/ύπαρξη μετρήσεων των παραπάνω παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του υδατορέματος, από τις οποίες προσδιορίζεται με επέκταση των παρατηρούμενων τιμών στο χρόνο η χρονική στιγμή κατά την οποία αναμένεται η υπέρβαση ενός κρίσιμου ορίου.
ΥΠ2	Προειδοποίηση με πρόγνωση της πλημμύρας (flood forecasting) χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα. Αυτά μπορεί να είναι απλά, όπως στατιστικές καμπύλες, συσχετίσεις στάθμης της επιφάνειας ροής σε διάφορες θέσεις ενός υδατορέματος και εξισώσεις χρόνων διαδρομής, ή σύνθετα, όπως υδρολογικά-υδροδυναμικά που περιγράφουν τις διαδικασίες εξέλιξης της πλημμύρας σε μια λεκάνη απορροής (βλ. κεφάλαιο 4). Τα Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ) αποτελούν «ποσοτικά εργαλεία» για τη σταδιακή εφαρμογή προειδοποιήσεων για πλημμύρα όχι μόνο στην κοίτη ενός υδατορέματος, όπως στην περίπτωση του συναγερμού με βάση την υπέρβαση ορίου, αλλά και σε συγκεκριμένες περιοχές που πλημμυρίζουν.
ΥΠ3	Προειδοποίηση με χάρτες επαγρύπνησης (vigilance maps) σε συγκεκριμένες περιοχές που δομούνται με βάση μαθηματικά μοντέλα ή/και ιστορικά δεδομένα. Στους χάρτες επαγρύπνησης που δημοσιεύονται στο διαδίκτυο απεικονίζονται με χρώματα πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί, και κόκκινο η αύξηση της σφοδρότητας της αναμενόμενης πλημμύρας.
ΥΠ4	Προειδοποίηση με πρόγνωση των συγκεκριμένων περιοχών κατάκλισης που μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές, όπως π.χ. πυκνοκατοικημένες ή με κρίσιμες υποδομές, με υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, όταν είναι διαθέσιμο υπόβαθρο (π.χ. DEM) υψηλής ακρίβειας.

Για τους παραπάνω τύπους υπηρεσίας προειδοποίησης για πλημμύρα, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Η απλή υπηρεσία ΥΠ1 είναι ποιοτική και δεν βασίζεται σε κάποιας μορφής μαθηματικό μοντέλο, ενώ οι υπόλοιπες υπηρεσίες είναι ποσοτικές.
- ▶ Σε όλα τα είδη υπηρεσίας απαιτούνται δεδομένα/μετρήσεις πεδίου, όπως μετρήσεις στάθμης ροής σε υδατορέματα ή/και (ιστορικά) δεδομένα από παλαιότερες πλημμύρες. Στην ΥΠ1 χρησιμοποιούνται μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο για την εκτίμηση της υπέρβασης του ορίου.
- ▶ Στις ΥΠ2, ΥΠ3 και ΥΠ4 χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα, τα οποία ανεξάρτητα από το βαθμό πολυπλοκότητάς τους, πρέπει να βαθμονομούνται με μετρήσεις πεδίου και να ελέγχονται-τροποποιούνται τακτικά, ώστε να λαμβάνουν υπόψη ενδεχόμενες μεταβολές των χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής με την πάροδο του χρόνου, όπως π.χ. την αλλαγή χρήσεων γης ή την κατασκευή τεχνικών έργων.
- ▶ Στην ΥΠ1, η υπηρεσία περιορίζεται στις κοίτες των υδατορεμάτων και στις ΥΠ2, ΥΠ3 και ΥΠ4 επεκτείνεται και στις περιοχές κατάκλισης με αυξανόμενη πολυπλοκότητα και λεπτομέρεια.

Για την επιλογή του κατάλληλου είδους υπηρεσίας για την περίπτωση που εξετάζεται λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- ▶ Το κόστος των σύνθετων υπηρεσιών, ιδίως των ΥΠ3 και ΥΠ4 είναι συνήθως πολύ μεγάλο, και

οφείλεται κυρίως στις απαιτήσεις του Δικτύου Παρακολούθησης (βλ. κεφάλαιο 3) που αποτελείται από όργανα και διατάξεις που έχουν υψηλό αρχικό, αλλά και λειτουργικό κόστος. Άρα, οι υπηρεσίες αυτές πρέπει να εφαρμόζονται σε περιοχές με υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο ή/και είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε πλημμύρες. Οι περιοχές αυτές μπορούν να εντοπιστούν από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) και ιστορικά δεδομένα. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι εφικτό να προσφέρεται η ΥΠ4 σε ολόκληρη την επικράτεια, κυρίως εξαιτίας του πολύ υψηλού απαιτούμενου κόστους και της πολυπλοκότητας των εφαρμοζόμενων μαθηματικών μοντέλων.

- ▶ Σε περιοχές, όπου οι υδρομετεωρολογικές συνθήκες δεν προκαλούν συνήθως σημαντικά συμβάντα πλημμυρών, δεν είναι απαραίτητη η παροχή σύνθετων υπηρεσιών, όπως των ΥΠ2, ΥΠ3 και ΥΠ4.
- ▶ Αν και σε μεγάλο βαθμό είναι γνωστός ο τρόπος απόκρισης των λεκανών απορροής σε πλημμύρες, η διαθέσιμη υφιστάμενη τεχνολογία για (α) την παρακολούθησή τους (βλ. κεφάλαιο 3), και (β) τη προσομοίωσή τους με μαθηματικά μοντέλα (βλ. κεφάλαιο 4), δεν επιτρέπει ακόμα την πραγματοποίηση επαρκών και ακριβών προγνώσεων, κυρίως στις αστικές περιοχές, καθώς και σε μικρού μεγέθους λεκάνες με μικρό χρόνο απόκρισης (βλ. υποκεφάλαιο 2.4).
- ▶ Σημαντικό ρόλο στην παροχή των υπηρεσιών ΣΕΠΠ παίζουν οι αρμόδιες υπηρεσίες ενός κράτους ή μιας περιφέρειας, δήμου ή κοινότητας που τις παρέχουν. Συχνά, αυτές μπορεί εξαιτίας οικονομικών περιορισμών να μην υφίστανται ή να μην είναι επαρκώς στελεχωμένες.

2.4 Χρόνος πρόγνωσης πλημμύρας

Για την πρόγνωση μιας πλημμύρας απαιτείται ένα ικανό χρονικό διάστημα, που μεσοθαβεί από τη χρονική στιγμή πρόγνωσής της μέχρι τη χρονική στιγμή που αυτή συμβαίνει. Αυτό το χρονικό διάστημα καλείται **χρόνος πρόγνωσης της πλημμύρας** (forecast lead time). Σε αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να υπάρξει αντίδραση και να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες ενέργειες, που κατ' ελάχιστον είναι η αποτελεσματική προειδοποίηση του πληθυσμού με το ΣΕΠΠ και η λήψη των απαιτούμενων μέτρων προετοιμασίας. Σε ένα ΣΕΠΠ επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του χρόνου πρόγνωσης ώστε να είναι δυνατή η αποτελεσματική αντίδραση (WMO, 2011).

Ο χρόνος πρόγνωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, κυρίως το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, και του ΣΕΠΠ. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- ▶ Όταν είναι διαθέσιμες μόνο προγνώσεις που βασίζονται σε χρονοσειρές της στάθμης επιφάνειας ροής ή/και της παροχής υδατορέματος, είναι δυνατή η επέκταση του αντίστοιχου δείγματος για περίοδο λίγων ωρών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και της πλημμύρας.
- ▶ Όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από τηλεμετρικούς μετρητές βροχόπτωσης ή εκτιμήσεις βροχόπτωσης από ραντάρ, αυτά μπορούν να παρέχουν πρόσθετη προειδοποίηση πριν την πλημμύρα, αυξάνοντας έτσι τον χρονικό ορίζοντα και την ακρίβεια της πρόγνωσης. Σε αυτή την περίπτωση, ένας έμπειρος υδρολόγος μπορεί να υπολογίσει τον πιθανό χρόνο απόκρισης της πλημμύρας. Σε εξελιγμένα ΣΕΠΠ, τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία εισόδου του ΜΠΠ (βλ. κεφάλαιο 4).
- ▶ Όταν υπάρχει η δυνατότητα πρόγνωσης βροχόπτωσης από μια μετεωρολογική υπηρεσία, μπορεί

αυτή να αποτελέσει στοιχείο εισόδου του ΜΠΠ, αυξάνοντας περαιτέρω τον χρονικό ορίζοντα και την ακρίβεια της πρόγνωσης. Αυτό προϋποθέτει υψηλό επίπεδο συνεργασίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ της μετεωρολογικής υπηρεσίας που παράγει την πρόγνωση και της υπηρεσίας που χειρίζεται το ΣΕΠΠ.

Ο χρόνος αντίδρασης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περίπτωσης, όπως π.χ. της κοινότητας, της λεκάνης απορροής και του ΣΕΠΠ. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- ▶ Οι οικογένειες και οι επιχειρήσεις ενδεχομένως να χρειάζονται 1-2 ώρες για να μετακινήσουν τα πολύτιμα αντικείμενα στους υψηλότερους ορόφους ενός κτιρίου, και να τοποθετήσουν σάκους άμμου ή άλλα εμπόδια παρεμπόδισης εισροής των νερών της πλημμύρας.
- ▶ Η προστασία των μεγαλύτερων υποδομών, η δημιουργία εκτροπών στο οδικό δίκτυο, και η μετακίνηση ζώων σε ασφαλές μέρος ενδέχεται να απαιτούν χρόνους αντίδρασης της τάξης των μερικών ωρών.
- ▶ Σε μεγάλα υδατορέματα με σημαντικό χρόνο συγκέντρωσης, αλλά με υψηλό δυναμικό αντίκτυπο, ο χρόνος αντίδρασης για την εκκένωση των πληθυσμών που κινδυνεύουν μπορεί να είναι της τάξης των μερικών ημερών.

Θεωρείται μια σχετικά μεγάλη ΛΑΠ, στην οποία ο χρόνος πρόγνωσης είναι ίσος με περίπου μια εβδομάδα. Στο χρονικό αυτό διάστημα, η χρονική σειρά των ενεργειών που μπορεί να πραγματοποιηθούν είναι ενδεικτικά η ακόλουθη:

- ▶ Πριν 3–5 ημέρες: Συμβουλευτική ανακοίνωση για «επικείμενη περίοδο αυξημένου κινδύνου», συμμετοχή σε δραστηριότητες ευαισθητοποίησης μέσω των μέσων ενημέρωσης, κινητοποίηση οργανώσεων υποστήριξης για τις ευάλωτες ομάδες, και έναρξη «συμμετοχικής» ανταλλαγής πληροφοριών από τοπικούς οργανισμούς αντιμετώπισης πλημμυρών.
- ▶ Την προηγούμενη ημέρα: Έκδοση μηνύματος έγκαιρης προειδοποίησης (early warning) από το ΣΕΠΠ ή παρακολούθησης (watch), ενεργοποίηση μέτρων για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της πλημμύρας και την προστασία των υποδομών ζωτικής σημασίας, παροχή ενεργής υποστήριξης σε ευάλωτες ομάδες, και παροχή συμβουλών σε όσους βρίσκονται στις πιο ευάλωτες περιοχές.
- ▶ Μερικές ώρες πριν: Έκδοση προειδοποίησης πλημμύρας (flood warning), ενεργοποίηση μέτρων και ενεργειών απόκρισης έκτακτης ανάγκης, εκκένωση των περισσότερων ευάλωτων ομάδων όταν αυτό απαιτηθεί, και παροχή οδηγιών σε άτομα.

Η παραπάνω χρονική σειρά ενεργειών μπορεί να θεωρηθεί ιδανική για μια πλημμύρα σε μια λεκάνη απορροής μεγάλου μεγέθους. Όμως, σε πολλές λεκάνες απορροής, επειδή ο χρόνος πρόγνωσης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, μπορεί να χρειαστούν αρκετές ημέρες, μια ημέρα ή ακόμα και 6 ώρες για να φτάσει το κύμα πλημμύρας στις χαμηλές (συντά κατοικημένες) περιοχές. Επιπλέον, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις λεκανών απορροής με μικρούς χρόνους συγκέντρωσης της τάξης των 3–4 ωρών που μπορεί να μειωθούν περαιτέρω στην περίπτωση ξαφνικής πλημμύρας.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις λεκάνες απορροής ταχείας απόκρισης σε ορεινές λοφώδεις περιοχές στη νότια Γαλλία, ο χρόνος πρόγνωσης κυμαίνεται από 6 μέχρι 12 ώρες και ο χρόνος απόκρισης των λεκανών απορροής είναι περίπου 10 ώρες. Έτσι, η τοπική υπηρεσία προειδοποίησης μπορεί να παρέχει μια πρόγνωση του κινδύνου πλημμύρας με χρόνο αντίδρασης από 15 έως 20 ώρες, η οποία στη συνέχεια δημοσιεύεται με τη μορφή χαρτών επαγρύπνησης.

Στον Ελληνικό χώρο, οι πλημμύρες συνήθως οφείλονται σε καταρρακτώδεις βροχές, που συνοδεύουν τη διέλευση υφέσεων και σε ισχυρές τοπικές καταιγίδες. Το αποτέλεσμα αυτών, σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά των περισσότερων ελληνικών λεκανών απορροής (ανάπτυξη μεγάλου αριθμού υδατορεμάτων με μικρές σχετικά λεκάνες απορροής και έντονες κλίσεις επιφανείας που συντελούν στη γρήγορη αποστράγγισή τους), είναι η εκδήλωση **ξαφνικών πλημμυρών**. Γενικά, οι ξαφνικές πλημμύρες εμφανίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των λίγων ωρών ή λιγότερο. Έχουν ως αποτέλεσμα την ταχεία ανύψωση της επιφάνειας της ροής που κατά τη διέλευσή της μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές σε κατασκευές, όπως κτίρια και γέφυρες, να παρασύρει αυτοκίνητα, να ξεριζώσει δέντρα κ.ά.

Το κύριο χαρακτηριστικό των ξαφνικών πλημμυρών είναι η ραγδαία εξέλιξή τους. Εξαιτίας της εξαιρετικά περιορισμένης δυνατότητας έκδοσης έγκαιρης προειδοποίησης, έχουν προκαλέσει κατά το παρελθόν μεγάλες καταστροφές σε υποδομές, όπως π.χ. στο οδικό δίκτυο, σε αγροτικές περιοχές, σε κατοικίες, και έχουν θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, παρασύροντας πεζούς και οχήματα.

2.5 Κρατικά και τοπικά Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών

2.5.1 Γενικά

Συνήθως, υπάρχει μια αρμόδια κρατική υπηρεσία που διαχειρίζεται το ΣΕΠΠ σε εθνικό επίπεδο, όπως π.χ. μια εθνική μετεωρολογική υπηρεσία. Η υπηρεσία αυτή έχει την ευθύνη να παρέχει προγνώσεις πλημμυρών και προειδοποιήσεις για την υποστήριξη της πρωταρχικής της αποστολής που είναι η προστασία της ζωής και της περιουσίας. Αυτή παρακολουθεί τα μεγάλα υδατορέματα μιας χώρας εστιάζοντας σε αυτά με σημαντικό κίνδυνο πλημμύρας και γενικά δεν έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί κάθε μικρό υδατόρεμα. Αυτό συνήθως επαφίεται στις τοπικές αρχές, όπως τις περιφέρειες, τους δήμους και τις κοινότητες, οι οποίες αναπτύσσουν, συντηρούν και λειτουργούν τοπικά ΣΕΠΠ, και ενημερώνουν την κρατική υπηρεσία για τα δεδομένα των τοπικών ΣΕΠΠ υποστηρίζοντας έτσι την αποστολή της. Από τη μεριά της, η αρμόδια κρατική υπηρεσία παρέχει ορισμένες μορφές υποστήριξης, όπως τεχνικές συμβουλές, στις αρχές που διαθέτουν τοπικά ΣΕΠΠ.

Τα τοπικά ΣΕΠΠ διακρίνονται συνήθως με βάση τον τρόπο συλλογής των δεδομένων από το ΔΠ σε δύο βασικές κατηγορίες:

- ▶ χειροκίνητα τοπικά ΣΕΠΠ, και
- ▶ αυτόματα τοπικά ΣΕΠΠ.

Τα κριτήρια επιλογής περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- ▶ τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής,
- ▶ τις αναμενόμενες απώλειες από την πλημμύρα,
- ▶ τους διαθέσιμους χρόνους αντίδρασης, και
- ▶ την εξοικείωση των κοινοτικών υπαλλήλων με τις διαθέσιμες τεχνολογικές επιλογές ΣΕΠΠ, την ενημέρωσή τους για αυτές, π.χ. από παρουσιάσεις προμηθευτών, καθώς και την εμπειρία και γνώση που διαθέτουν από τα εγκατεστημένα ΣΕΠΠ σε γειτονικές κοινότητες.

2.5.2 Χειροκίνητα και αυτόματα τοπικά Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών

Πολλά ΣΕΠΠ που λειτουργούν σήμερα σε τοπικό επίπεδο είναι μη-αυτόματα και αποτελούνται από:

- ▶ το μη-αυτόματο Δίκτυο Παρακολούθησης (ΔΠ) που το διαχειρίζεται μια τοπική ομάδα, όπως π.χ. εθελοντές, που συλλέγει τις μετρήσεις χειροκίνητα,
- ▶ τον Συντονιστή Πλημμυρών της τοπικής κοινότητας,
- ▶ τη διαδικασία πρόγνωσης πλημμύρας που συνήθως είναι πολύ απλή στη χρήση,
- ▶ το δίκτυο επικοινωνίας για τη μετάδοση των προειδοποιήσεων, και
- ▶ το σχέδιο απόκρισης.

Η πρόγνωση της πλημμύρας γίνεται (α) με τη χρήση πινάκων ή/και γραφημάτων και (β) την εκάστοτε τιμή της πρόγνωσης βροχόπτωσης, με βάση τα οποία υπολογίζεται η μέγιστη τιμή ενός δείκτη πλημμύρας (βλ. υποκεφάλαιο 1.1.4), με την οποία εκτιμάται (α) αν θα συμβεί ή όχι η πλημμύρα και (β) πότε θα συμβεί αυτή. Οι πίνακες/γραφήματα και η πρόγνωση της βροχόπτωσης παρέχονται στο Συντονιστή από την αρμόδια κρατική μετεωρολογική υπηρεσία. Τα μη-αυτόματα ΣΕΠΠ είναι απλά και οικονομικά στη λειτουργία, αλλά είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε απομακρυσμένες περιοχές.

Τα αυτόματα ΣΕΠΠ με τα αντίστοιχα ΔΠ σχεδιάζονται, αναπτύσσονται και εφαρμόζονται συνήθως από κρατικούς φορείς, δήμους ή και εξειδικευμένους ιδιωτικούς φορείς. Οι αυτόματοι μετρητές του ΔΠ παρακολουθούν σε πρακτικά συνεχή βάση τη βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά της ροής και ειδοποιούν όταν οι τιμές των παραπάνω μεγεθών ή όταν ο ρυθμός μεταβολής τους υπερβεί μια μέγιστη τιμή. Ένα αυτόματο ΣΕΠΠ αποτελείται από:

- ▶ το σύστημα αυτόματης λήψης των μετρήσεων,
- ▶ το σύστημα επικοινωνίας-μετάδοσης των μετρήσεων,
- ▶ το σύστημα αυτόματης συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων, και
- ▶ το λογισμικό ανάλυσης και πρόγνωσης πλημμυρών.

2.5.3 Συστήματα ALERT και IFLOWS

Γενικά

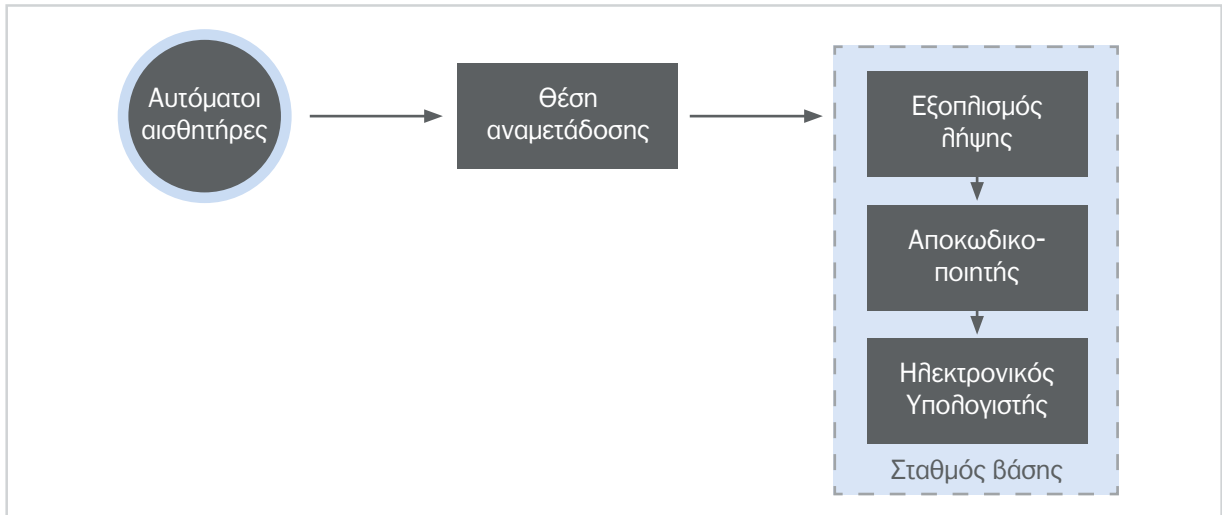
Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (NWS) είναι η αρμόδια υπηρεσία που διαχειρίζεται το ΣΕΠΠ σε εθνικό επίπεδο. Οι διάφορες κοινότητες μπορούν να υποστηρίξουν τη NWS εφαρμόζοντας τοπικά ΣΕΠΠ σε συνεργασία με το Πρόγραμμα Υδρολογικών Υπηρεσιών της NWS, το οποίο παρέχει ορισμένες μορφές υποστήριξης στις κοινότητες αυτές (NWS, 2010).

Δυο σημαντικά τοπικά αυτόματα ΣΕΠΠ στις ΗΠΑ είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Σύστημα Αυτοματοποιημένης Τοπικής Αξιολόγησης σε Πραγματικό Χρόνο (Automated Local Evaluation in Real Time, ALERT).
- ▶ Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρατήρησης και Προειδοποίησης Πλημμυρών (Integrated Flood Observing and Warning Systems, IFLOWS).

Το σύστημα ALERT

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, οι διαθέσιμες αυτοματοποιημένες μέθοδοι ήταν ακριβές και δεν παρείχαν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Το 1972 συνέβη μια ξαφνική πλημμύρα στο Rapid City στην Νότια Ντακότα των ΗΠΑ κατά την οποία υπήρξαν 237 θύματα και προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές. Το συμβάν αυτό πιθανότατα αποτέλεσε το έναυσμα για τη δημιουργία του συστήματος ALERT σε πρωτότυπη μορφή για δοκιμαστική λειτουργία στον American River της Καλιφόρνια το 1974 (Stewart, 1999). Στη συνέχεια, αυτό εξελίχθηκε στο τυπικό ΣΕΠΠ με ραδιοκύματα σε πραγματικό χρόνο που εφαρμόστηκε σε κοινότητες για σχεδόν 40 έτη. Τα συστήματα ALERT αποτελούν σε μεγάλο βαθμό στις ΗΠΑ και σε όλο τον κόσμο έναν προσιτό τρόπο ενίσχυσης των τοπικών ΣΕΠΠ.



Εικόνα 2.2: Κύρια μέρη ενός συστήματος ALERT (Πηγή: NWS, 2010)

Τα κύρια μέρη ενός σχετικά απλού συστήματος ALERT φαίνονται στην Εικόνα 2.2 και είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- ▶ **Αυτόματοι αισθητήρες ALERT.** Αυτοί μεταδίδουν κωδικοποιημένα σήματα μέσω ενός πομπού ραδιοφώνου (ραδιοκύματα VHF ή UHF), σε ένα σταθμό βάσης, συχνά μέσω ενός ή περισσότερων θέσεων αναμετάδοσης ή ραδιοφωνικών επαναλήψεων. Εάν η απόσταση ή η διαμόρφωση του εδάφους μεταξύ του πομπού και του σταθμού βάσης εμποδίζει την αξιόπιστη λήψη του σήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας σταθμός ραδιοφωνικού αναμεταδότη για την επέκταση της εμβέλειας.
- ▶ **Σταθμός βάσης.** Αποτελείται από εξοπλισμό λήψης ραδιοφώνου και έναν μικροεπεξεργαστή. Εκτελεί το λογισμικό ALERT, συλλέγει τα σήματα και τα αποκωδικοποιεί σε κατανοητά υδρομετεωρολογικά δεδομένα.
- ▶ **Θόνη ΗΥ.** Σε αυτή εμφανίζονται τα επεξεργασμένα δεδομένα σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια, με τους οπτικούς και ηχητικούς συναγερμούς να ενεργοποιούνται όταν πληρούνται αυτά τα κριτήρια. Ορισμένα συστήματα έχουν τη δυνατότητα αυτόματης ειδοποίησης ατόμων ή εκκίνησης άλλων προγραμματισμένων ενεργειών όταν υπερβαίνονται τα παραπάνω κριτήρια. Τα δεδομένα μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ΜΠΠ.

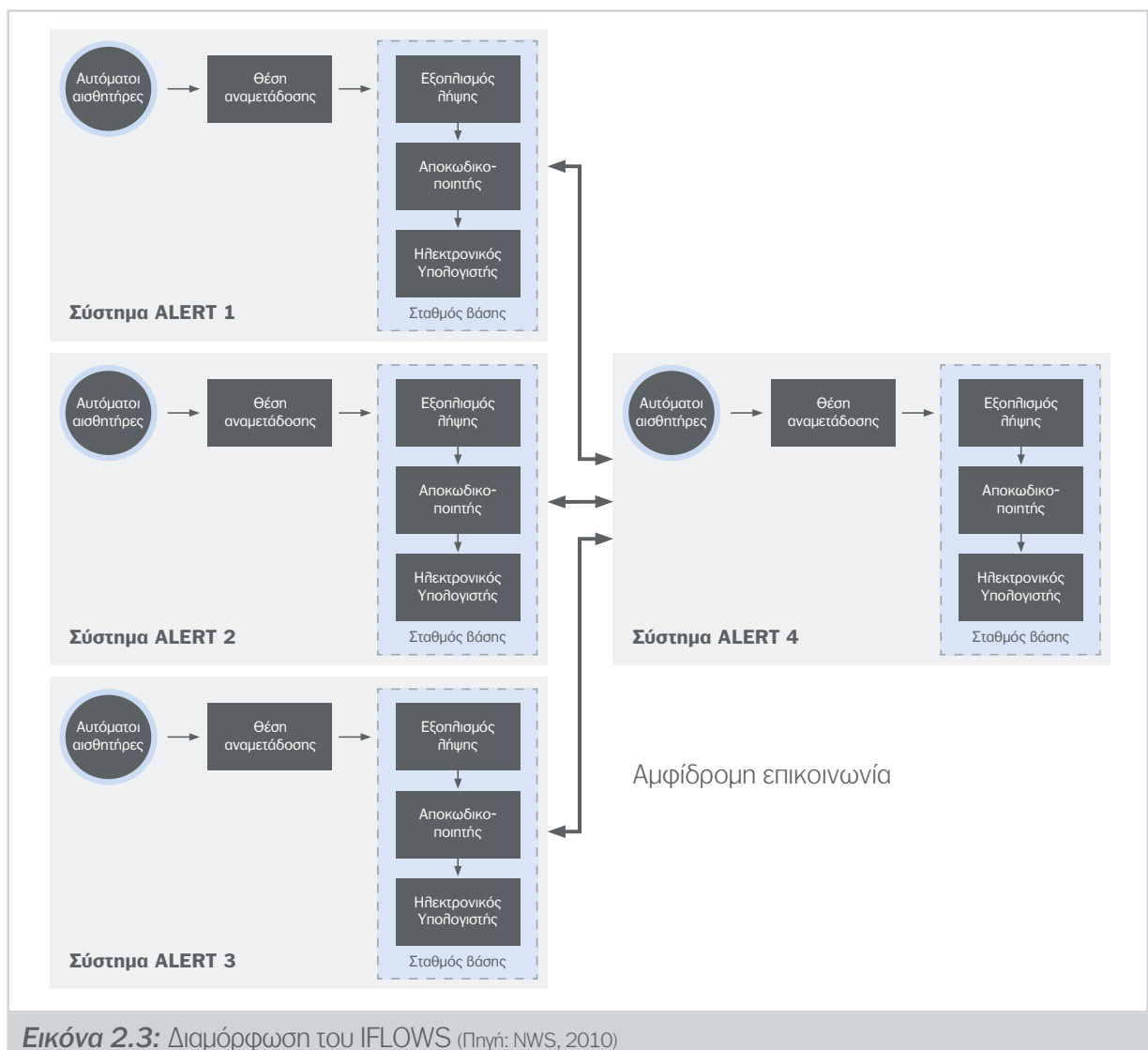
Ένα σύστημα ALERT μπορεί να αποτελείται από περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης που συνδέονται μέσω δικτύων για τη μετάδοση δεδομένων από τη μια ομάδα χρηστών στην άλλη. Ενδεικτικά, στην ιστοσελίδα του συστήματος ALERT του Σακραμέντο, το οποίο αποτελείται από δυο σταθμούς βάσης και 50 σταθμούς μέτρησης, παρέχεται πρόσβαση σε πληροφορίες για το ύψος βροχόπτωσης και τη στάθμη της επιφάνειας ροής υδατορεμάτων κατά τη διάρκεια καταιγίδων, όπως και ένας οδηγός εφαρμογής του. Περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα ALERT μπορεί να βρεθούν στην ιστοσελίδα της ομάδας χρηστών Alert Users Group (AUG, 2022).

Τα συστήματα ALERT χρηματοδοτούνται και υποστηρίζονται τοπικά, και ο εξοπλισμός τους δεν ανήκει συνήθως στη NWS. Πολλά συστήματα ανήκουν ή διατηρούνται από περισσότερους από έναν συμμετέχοντες οργανισμούς, με κάθε συμμετέχοντα να κατέχει ή να διατηρεί ένα μικρό μέρος ολόκληρου του συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, οι τοπικοί χορηγοί συστημάτων έχουν παράσχει εξοπλισμό στη NWS για χρήση στα γραφεία του πεδίου για να διασφαλίσουν ότι η NWS λαμβάνει έγκαιρα δεδομένα για τις προγνώσεις και τις προειδοποιήσεις του. Είναι σχετικά οικονομικά στην εγκατάσταση, απλά και στην επέκτασή τους, μιας και ένας νέος σταθμός κοστίζει μερικές χιλιάδες Ευρώ. Φυσικά, δεν πρέπει να αγνοείται το κόστος λειτουργίας τους, το οποίο πρέπει να περιορίζεται.

Το 2010 το Εθνικό Συμβούλιο Υδρολογικής Προειδοποίησης (NHWC) σε συνεργασία με το ALERT USERS GROUP έθεσε σε κυκλοφορία το ALERT2™. Αυτό, σε σχέση με το ALERT, είναι πολύ πιο γρήγορο, μεταφέρει περισσότερες πληροφορίες και λειτουργεί χωρίς σφάλματα. Χρησιμοποιώντας μια τεχνική κοινής χρήσης καναλιών που ονομάζεται TDMA, στην οποία κάθε πομπός έχει το δικό του σύντομο χρονικό διάστημα για τη μετάδοση, τα προβλήματα διαφωνίας μηνυμάτων και απώλειας δεδομένων του ALERT περιορίζονται (NHWC, 2023).

Το σύστημα IFLOWS

Το IFLOWS δημιουργήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 για να βοηθήσει τις επιρρεπείς σε πλημμύρες κοινότητες σε επτά πολιτείες των Απαλαχίων με την ανάπτυξη αυτόματων ΣΕΠΠ. Διοικητικά, το



Εικόνα 2.3: Διαμόρφωση του IFLOWS (Πηγή: NWS, 2010)

IFLOWS είναι μια συνεργασία επιμερισμού κόστους μεταξύ ομοσπονδιακών, πολιτειακών και τοπικών κυβερνητικών φορέων. Η NWS παρέχει οικονομική ενίσχυση σε συνεργαζόμενες υπηρεσίες στις πολιτείες, οι οποίες κατέχουν, λειτουργούν και διατηρούν τα δικά τους δίκτυα IFLOWS. Σήμερα, τα δίκτυα IFLOWS εκτείνονται σε 200 κομητείες και 13 πολιτείες.

Το σύστημα IFLOWS αποτελεί ένα δίκτυο ευρείας περιοχής συστημάτων ALERT με βελτιωμένη, πλήρη, αμφίδρομη δυνατότητα φωνητικής επικοινωνίας, δεδομένων και κειμένων. Εάν είναι επιθυμητό, το IFLOWS μπορεί να διαμορφωθεί για μια τοπική κοινότητα ως αυτόνομο σύστημα (NWS, 2010).

2.5.4 Σύστημα Καθοδήγησης για Ξαφνικές Πλημμύρες

Εισαγωγή

Το Σύστημα Καθοδήγησης για Ξαφνικές Πλημμύρες (Flash Flood Guidance, FFG) αναπτύχθηκε στις αρχές του 1970 από τη NWS στο πλαίσιο της αντιπλημμυρικής προστασίας των ΗΠΑ. Το 2001 το Υδρολογικό Ινστιτούτο Ερευνών (HRC) των ΗΠΑ σε συνεργασία με τη NWS, ξεκίνησε την ανάπτυξη ενός ευρύτερης κάλυψης συστήματος FFG με εφαρμογή σε διάφορες χώρες, όπως της Λατινικής Αμερικής. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκαν μέθοδοι που βασίζονται σε παγκόσμια κλίμακα δεδομένα, όπως δορυφορικά, για να παράγουν προειδοποιήσεις μέχρι και σε 6-ώρη βάση για λεκάνες απορροής εμβαδού μέχρι 300 km².

Η επιτυχία της προσπάθειας αυτής είχε ως αποτέλεσμα τη συνεργασία της NWS με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO, και με άλλες υπηρεσίες της Αμερικής για την επέκταση του συστήματος FFG παγκοσμίως (WMO, 2017).

Μέχρι σήμερα, οι περιοχές στις οποίες έχουν αναπτυχθεί συστήματα FFG περιλαμβάνουν τις χώρες της Κεντρικής Αμερικής, της Νότιας Αφρικής, της Νότιας Ασίας, της Ινδίας, της Κεντρικής Ασίας, της Μαύρης Θάλασσα, της Τουρκίας, και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, το σύστημα έχει αναπτυχθεί στην Τουρκία και στις χώρες των Βαλκανίων, εκτός της Ελλάδας.

Κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων FFG

Τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων FFG είναι τα ακόλουθα:

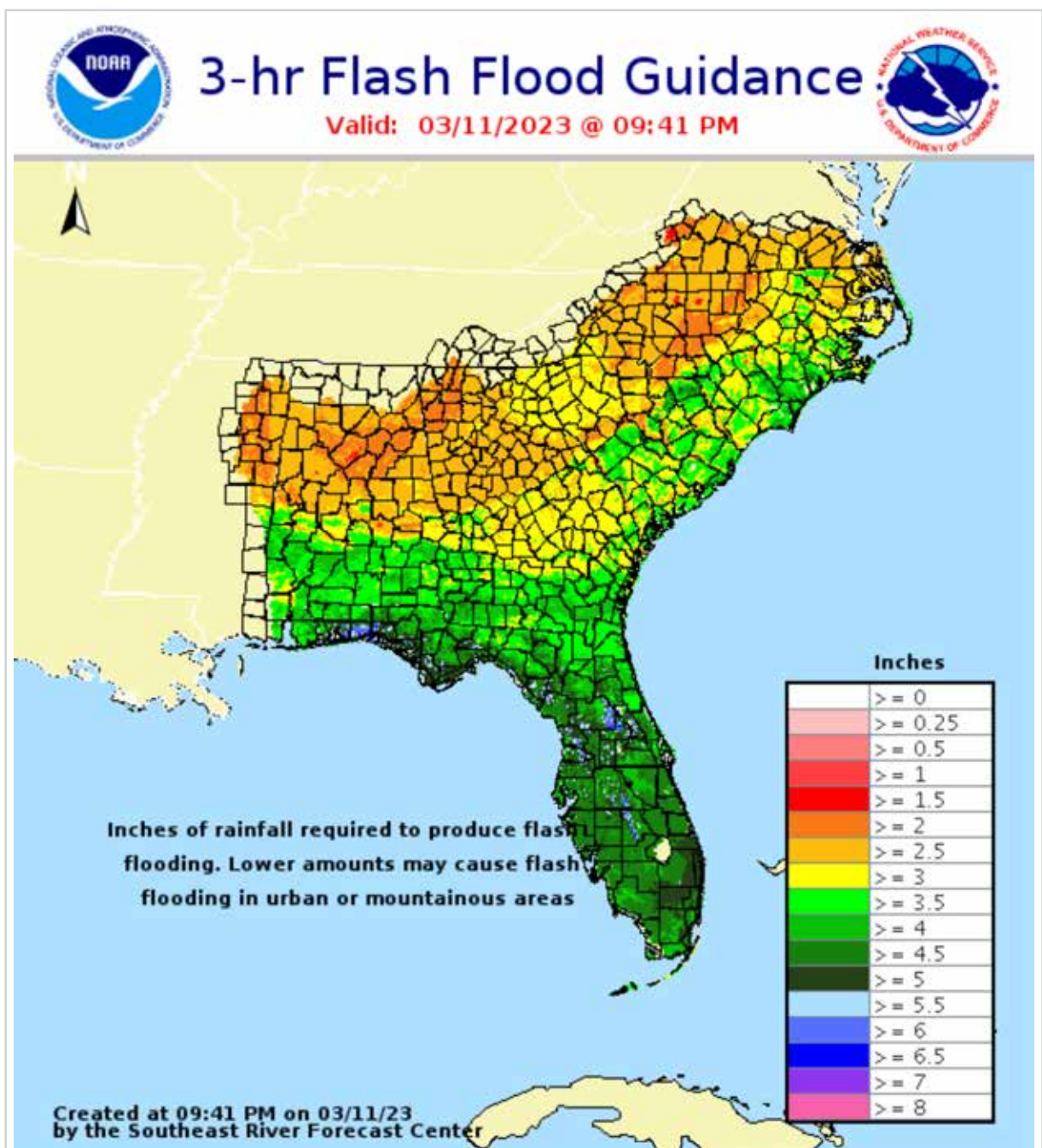
- ▶ Εφαρμόζονται για ξαφνικές πλημμύρες. Για τις πλημμύρες αυτές η ενεργοποίηση ενός ΣΕΠΠ με τις συμβατικές μεθόδους, όπως π.χ. με την παρακολούθηση της στάθμης της επιφάνειας ροής σε συγκεκριμένες θέσεις ενός υδατορέματος, συνήθως δεν δύναται να παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα εξαιτίας του μικρού χρονικού διαστήματος μεταξύ της έναρξης της βροχόπτωσης και της χρονικής στιγμής εμφάνισης της πλημμύρας. Για το λόγο αυτό, στο σύστημα FFG εφαρμόζονται μέθοδοι πρόγνωσης που συνδυάζουν τη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση καιρού με Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ) που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα για την εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας.
- ▶ Αποτελούν κυρίως εργαλεία εκτίμησης των υδρομετεωρολογικών συνθηκών της περιοχής εφαρμογής με κύριο σκοπό την υποβοήθηση στη λήψη αποφάσεων για την έκδοση προειδοποιήσεων. Τα αποτελέσματά τους εξετάζονται προσεκτικά από τον υπεύθυνο πρόγνωσης, ο οποίος με βάση την εμπειρία του και τοπικά δεδομένα, όπως π.χ. από κάμερες παρακολούθησης, μπορεί να κάνει καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης και να βελτιώσει την πρόγνωση.

Οι εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες που λαμβάνουν πληροφορίες από συστήματα FFG, μπορεί να τις συνεκτιμήσουν με τοπικές πληροφορίες και να εκδώσουν προειδοποιήσεις ή όχι μέσω των εθνικών ΣΕΠΠ.

Ορισμός της FFG και μεθοδολογία υπολογισμού της

Το σύστημα FFG βασίζεται στον υπολογισμό της FFG. Αυτή ορίζεται ως το ύψος της επιφανειακής αθροιστικής βροχόπτωσης δεδομένης διάρκειας, το οποίο απαιτείται για να προκληθεί μικρής έκτασης πλημμύρα στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής (Ntelekos et al., 2006; Georgakakos, 2006). Η τιμή της FFG είναι συνάρτηση της υπάρχουσας υγρασίας του εδάφους και των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και χρησιμοποιείται ως κατώφλι με το οποίο συγκρίνεται η προγνωσθείσα βροχόπτωση ίδιας διάρκειας. Όταν η τιμή της προγνωσθείσας βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη της FFG, τότε υπάρχει κίνδυνος πλημμύρας.

Ο υπολογισμός της FFG πραγματοποιείται για δεδομένες διάρκειες βροχόπτωσης που είναι συνήθως 1, 3 και 6 ώρες, σε προκαθορισμένη χωρική ανάλυση και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε μορφή χαρτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.

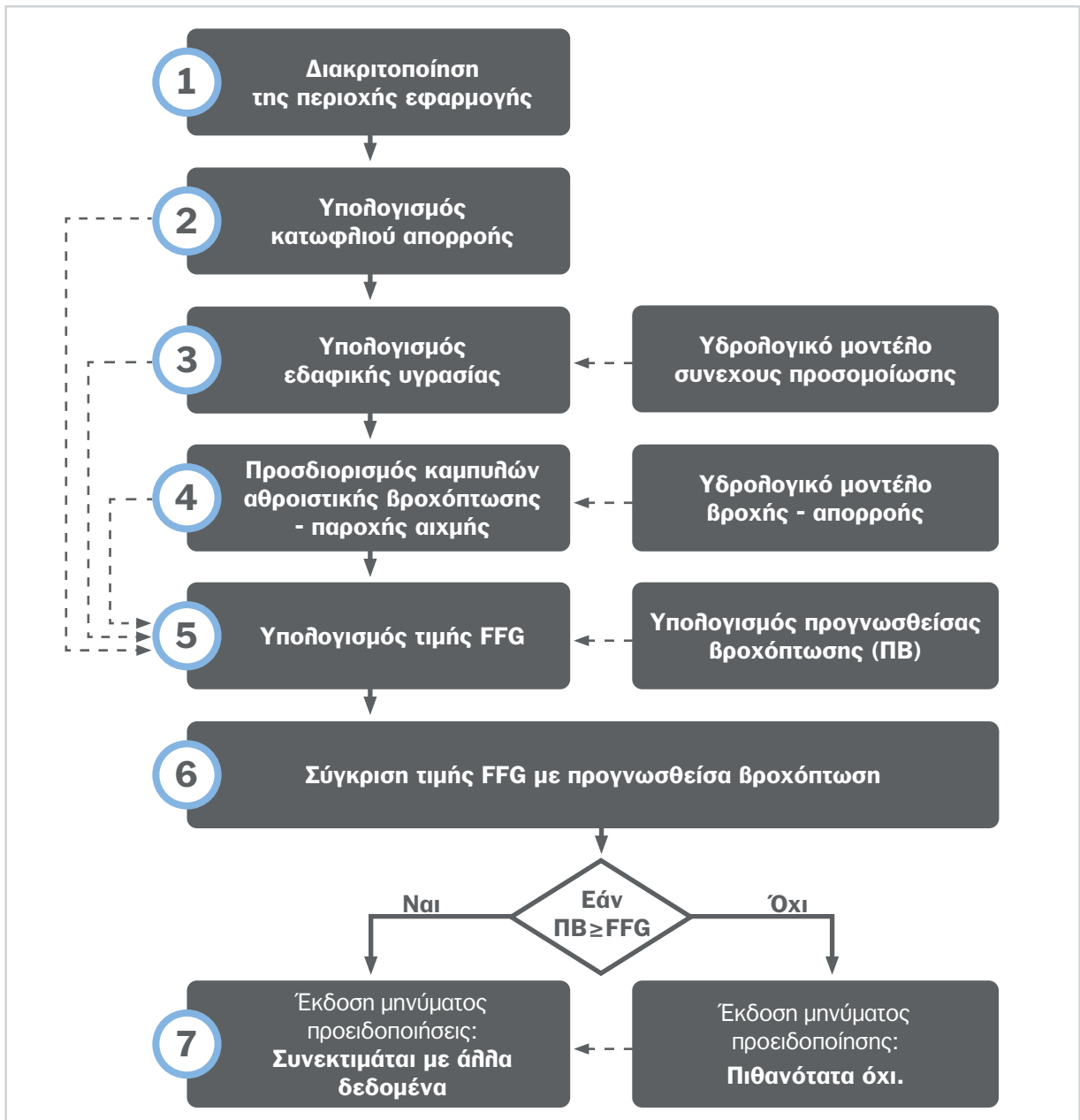


Εικόνα 2.4: Χάρτης τιμών FFG για τρίωρη βροχόπτωση (Πηγή: NWS, 2023)

Μεθοδολογία υπολογισμού της FFG

Η διαδικασία υπολογισμού των τιμών FFG φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Στην υπολογισμό αυτό διακρίνονται δύο επίπεδα. Τα βήματα της μεθοδολογίας υπολογισμού είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Βήμα 1.** Διακριτοποίηση της περιοχής εφαρμογής.
- ▶ **Βήμα 2.** Υπολογισμός του κατωφλιού απορροής.
- ▶ **Βήμα 3.** Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας.
- ▶ **Βήμα 4.** Προσδιορισμός των καμπυλών αθροιστικής βροχόπτωσης – παροχής αιχμής.
- ▶ **Βήμα 5.** Υπολογισμός της τιμής FFG.
- ▶ **Βήμα 6.** Σύγκριση της τιμής FFG με την προγνωσθείσα τιμή βροχόπτωσης.
- ▶ **Βήμα 7.** Έκδοση μηνύματος προειδοποίησης.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας υπολογισμού της FFG

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας.

Βήμα 1. Διακριτοποίηση της περιοχής εφαρμογής. Μπορεί να γίνει σε επιμέρους υδρολογικές μονάδες, όπως (α) υπολεκάνες απορροής, και (β) κελιά (κατανεμημένη μορφή). Σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία αυτή είναι η χωρική ανάλυση της διακριτοποίησης, η οποία πρέπει να είναι συμβατή (α) με το πεδίο βροχής που χρησιμοποιείται στην πρόγνωση, όπως π.χ. το σύστημα ενός δικτύου μετεωρολογικών ραντάρ που τροφοδοτεί την πρόγνωση, και (β) με το μέγεθος και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Στην περίπτωση της κατανεμημένης μορφής, συνιστάται η χρήση ίδιας ανάλυσης με αυτήν του πεδίου βροχής και στην περίπτωση των υπολεκάνων ενδείκνυται η χρήση με μέγεθος μικρότερο από 2000 km². Το ελάχιστο εμβαδόν πρέπει να είναι συμβατό με την γεωμορφολογία της περιοχής και με την ανάλυση του συστήματος πρόγνωσης. Γενικά, αν και η μεγαλύτερη ανάλυση ενδείκνυται για πιο αναλυτικά αποτελέσματα, πρέπει αυτή να είναι συμβατή με τις υδρολογικές διαδικασίες των υδρολογικών μοντέλων, όπως αυτών που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της παροχής κατώφλιου και της εδαφικής υγρασίας. Οι τιμές FFG υπολογίζονται για κάθε επιμέρους υδρολογική μονάδα ανεξάρτητα και δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες σε γειτονικές, ανάντη ή κατόντη μονάδες.

Βήμα 2. Υπολογισμός του κατώφλιου απορροής (threshold runoff). Το κατώφλιο (της παροχής) απορροής είναι η παροχή που προκαλεί μικρής έκτασης πλημμύρα στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής, καλύπτοντας οριακά τις όχθες ενός υδατορέματος. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται με τις παρακάτω τρεις μεθόδους (Carpenter et al., 1999):

- ▶ Υπολογισμός του κατώφλιου απορροής με την εξίσωση Manning (Chow et al., 1988). Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, είναι απαραίτητη η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διατομών του υδατορέματος. Αν τα δεδομένα δεν είναι επαρκή, αναπτύσσονται και εφαρμόζονται εξισώσεις παλινδρόμησης που συσχετίζουν τα γεωμετρικά μεγέθη των διατομών με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως π.χ. το εμβαδό, την κλίση και το μήκος των υδατορεμάτων της.
- ▶ Θεώρηση ότι το κατώφλιο απορροής είναι ίσο με την τιμή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 2 ετών. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η γνώση των παροχών για την εφαρμογή στατιστικής επεξεργασίας τους με μια συνάρτηση κατανομής. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται και εφαρμόζονται εξισώσεις παλινδρόμησης που συσχετίζουν την παροχή κατώφλιου με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (Carpenter et al., 1999· Reed et al., 2002).
- ▶ Θεώρηση ότι το κατώφλιο απορροής είναι ίσο με την παροχή αιχμής που εκτιμάται με υδρολογικό μοντέλο για περίοδο επαναφοράς 5 ετών (Schmidt et al., 2007· Erlingis et al., 2013). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν δεν διατίθενται δεδομένα μετρήσεων παροχής ή χαρακτηριστικών των διατομών. Προσθέτει αβεβαιότητα στον υπολογισμό της παροχής αιχμής και κατά συνέπεια της FFG, η οποία όμως είναι σχετικά μικρή, κυρίως στα μεγάλης έκτασης πλημμυρικά επεισόδια (Bournas & Baltas, 2022a).

Βήμα 3. Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας. Το ποσοστό υγρασίας του εδάφους μεταβάλλεται ανάλογα τις κλιματικές συνθήκες, την κατακρήμνιση των προηγούμενων ημερών, τη θερμοκρασία και την εξατμισοδιαπνοή, καθώς και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, τον τύπο και τη διηθητικότητα του εδαφικού στρώματος. Για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας σε εύλογα χρονικά βήματα προτείνεται η χρήση υδρολογικών μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης, τα οποία ενδείκνυται να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο.

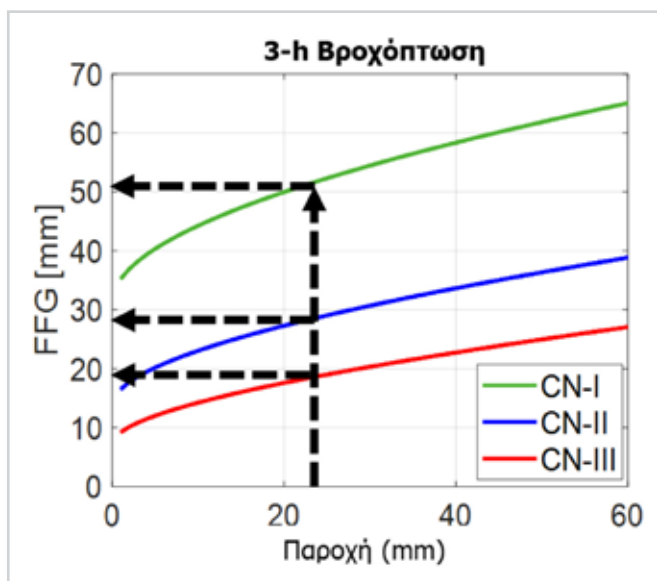
Στις υπάρχουσες εφαρμογές του συστήματος FFG χρησιμοποιείται συχνά το μοντέλο SAC-SMA (Burnash, 1995· Georgakakos, 2006· Bournas & Baltas, 2021), βλ. υποκεφάλαιο 4.6.4, με το

οποίο υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα η διαθέσιμη ποσότητα νερού στην άνω και στην κάτω στρώση του εδάφους. Γενικά, το μοντέλο αυτό είναι σχετικά σύνθετο με μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Διαθέτει, όμως, το πλεονέκτημα της εύκολης παραμετροποίησής του, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, καθώς οι τιμές των παραμέτρων δύναται να συσχετιστούν με τα χαρακτηριστικά του εδάφους (Koren et al. 2000· Koren et al., 2003). Σε κάθε περίπτωση, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορα μοντέλα εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας μετά από κατάλληλη παραμετροποίησή τους και συσχέτιση με το μοντέλο βροχής-απορροής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της FFG.

Βήμα 4. Προσδιορισμός καμπυλών αθροιστικής βροχόπτωσης – παροχής αιχμής για διάφορες τιμές εδαφικής υγρασίας. Το βήμα αυτό είναι προαιρετικό και διευκολύνει το γρηγορότερο υπολογισμό της FFG σε πραγματικό χρόνο. Οι καμπύλες αυτές προσδιορίζονται και σχεδιάζονται με την εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου βροχής-απορροής, για συγκεκριμένες διάρκειες αθροιστικής βροχόπτωσης που συνήθως είναι 1, 3 και 6 ώρες.

Βήμα 5. Υπολογισμός της FFG. Η τιμή της FFG υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο για κάθε υδρολογική μονάδα με δεδομένα (α) το κατώφλιο απορροής (βλ. βήμα 2), (β) την εδαφική υγρασία (βλ. βήμα 3), και (γ) τις καμπύλες αθροιστικής βροχόπτωσης – παροχής αιχμής (βλ. βήμα 4) και προσδιορίζεται η αθροιστική βροχόπτωση που θα προκαλέσει την παροχή κατωφλίου στην έξοδο, δηλ. την τιμή της FFG. Εναλλακτικά, όταν δεν πραγματοποιείται το βήμα 4, εφαρμόζεται το μοντέλο βροχής-απορροής σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα τα (α) και (β).

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της τιμής FFG για τριώρη διάρκεια βροχόπτωσης και τρεις συνθήκες εδαφικής υγρασίας: ξηρές (CN-I), μέσες (CN-II) και υγρές συνθήκες (CN-III) (Bournas et al., 2022b). Για τιμή κατωφλίου ίση με 22 mm, η τιμή της FFG υπολογίζεται ίση με 19, 28 και 51 mm για υγρές, μέσες και ξηρές συνθήκες, αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, όσο μεγαλύτερη είναι η εδαφική υγρασία, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της FFG ή αλλιώς για υγρές συνθήκες η ποσότητα βροχής που χρειάζεται για να προκληθεί πλημμύρα είναι μικρότερη από ότι σε μέσες ή ξηρές συνθήκες.



Εικόνα 2.6: Συσχέτιση τιμής κατωφλίου - FFG για τριώρη βροχόπτωση

Βήμα 6. Σύγκριση της υπολογισθείσας τιμής FFG με την προγνωσθείσα βροχόπτωση. Ο υπολογισμός της FFG γίνεται σε τακτές χρονικές στιγμές, ανάλογα με τις μεταβολές των δεδομένων υπολογισμού της FFG (βλ. βήμα 5) και των δεδομένων πρόγνωσης.

Σε κάθε χρονική στιγμή και για κάθε υδρολογική μονάδα συγκρίνονται οι τιμές της FFG για διάρκειες αθροιστικής βροχόπτωσης 1, 3 και 6 ωρών με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου πρόγνωσης. Όταν σε μια υδρολογική μονάδα η τιμή της πρόγνωσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της FFG, τότε αυτή σημειώνεται ως επικίνδυνη για ενδεχόμενη πλημμύρα στην περιοχή. Ο σχετικός κίνδυνος πλημμύρας μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη διαφορά μεταξύ της προγνωσθείσας τιμής βροχόπτωσης και της τιμής της FFG.

Βήμα 7. Έκδοση μηνύματος προειδοποίησης. Το σύστημα FFG υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων. Δεν αποτελεί ένα ντετερμινιστικό σύστημα με βάση το οποίο εκδίδεται προειδοποίηση. Ο υπεύθυνος πρόγνωσης παρακολουθεί συνεχώς τα δεδομένα και με βάση την εμπειρία του λαμβάνει αποφάσεις συνεκτιμώντας και άλλα χαρακτηριστικά, όπως την τρωτότητα του συστήματος και τους αντίστοιχους χρόνους αντίδρασης, δηλ. το διαθέσιμο χρονικό διάστημα μεταξύ της υλοποίησης των μέτρων από την στιγμή της έκδοσης της προειδοποίησης μέχρι τη στιγμή που αναμένεται να συμβεί το πλημμυρικό συμβάν (βλ. υποκεφάλαια 2.3 και 2.4).

2.6 Μεθοδολογία σχεδιασμού συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών

2.6.1 Γενικά

Αν και υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία για τα ΣΕΠΠ, οι εργασίες που αφορούν τη μεθοδολογία σχεδιασμού τους είναι περιορισμένες. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον υποδειγματικό σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής (ΚΑ) και εφαρμόζεται στην πόλη της Μάνδρας.

Η μεθοδολογία βασίζεται στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία και εμπειρία, και τμήματά της δημοσιεύτηκαν σε διάφορες μορφές της, βλ. Stamou (2022), Mitsopoulos et al. (2022), Στάμου και Μπαλιτάς (2022), και Καραμούστου και Στάμου (2019).

2.6.2 Βήματα της μεθοδολογίας σχεδιασμού

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού.

Βήμα 1: Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Πραγματοποιούνται η συλλογή και η επεξεργασία των απαιτούμενων δεδομένων, στα οποία περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Τοπογραφικά δεδομένα, όπως ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τοπογραφικές αποτυπώσεις.
- ▶ Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και συμβάντα πλημμυρών. Σε αυτά περιλαμβάνονται μετρήσεις υδρομετεωρολογικών παραμέτρων, μετρήσεις/εκτιμήσεις χαρακτηριστικών της ροής από συμβάντα πλημμυρών, όπως της έκτασης των περιοχών κατάκλισης (π.χ. με δορυφορικές μεθόδους), των μέγιστων βαθών ροής και των χρόνων άφιξης της πλημμύρας, και μετρήσεις από υφιστάμενα ΔΠ.
- ▶ Χρήσεις γης.
- ▶ Δεδομένα εδαφικής διάβρωσης των υδατορεμάτων. Τα στοιχεία αυτά είναι σημαντικά, όταν λαμβάνονται υπόψη στην περιγραφή της πλημμυρικής ροής με το υδροδυναμικό μοντέλο η διάβρωση των ρεμάτων και η στερεοπαροχή που δημιουργεί λασποροή.
- ▶ Σημαντικά έργα υποδομής, όπως έργα αντιπλημμυρικής προστασίας και δίκτυα υποδομών.
- ▶ Δεδομένα πλημμυρικής τρωτότητας.

Τα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν περιβαλλοντικά και οικολογικά χαρακτηριστικά, όπως των καιρικών συνθηκών και της ΚΑ, της περιβαλλοντικής και της οικολογικής κατάστασης των υδατορεμάτων κ.ά.

Βήμα 2: Σχεδιασμός του Δικτύου Παρακολούθησης

Ένα ΔΠ αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους δίκτυα:

- ▶ Δίκτυα μετρητών της βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών της ροής, που είναι κυρίως οι βροχογράφοι και οι μετρητές της ταχύτητας και του βάθους ροής
- ▶ Δίκτυα ραντάρ βροχόπτωσης.
- ▶ Μετεωρολογικοί δορυφόροι.

Χρησιμοποιώντας τα σχετικά δεδομένα μετρήσεων από τα παραπάνω δίκτυα και τα (μαθηματικά) μοντέλα (μετεωρολογικής πρόγνωσης) καιρού, μπορεί να γίνει η πρόγνωση της έλευσης μιας πλημμύρας.

Χρησιμοποιούνται δεδομένα των μετρητών βροχόπτωσης και χαρακτηριστικών της ροής για:

- ▶ τη βαθμονόμηση των ραντάρ,
- ▶ τη διόρθωση των εκτιμήσεων του πεδίου της βροχόπτωσης που αποτυπώνεται μέσω δορυφόρων,
- ▶ τη βαθμονόμηση των ΜΠΠ (βλ. Βήμα 3), και
- ▶ την εφαρμογή των ΜΠΠ για την εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας και των χαρακτηριστικών προειδοποίησης (βλ. Βήμα 5).

Σε κάθε περίπτωση, ο κύριος στόχος του ΔΠ είναι η έγκαιρη εκτίμηση των γεγονότων βροχόπτωσης που υπερβαίνουν συγκεκριμένες μέγιστες τιμές, δηλ. έχοντας σημαντικό διαθέσιμο χρόνο που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της πλημμύρας.

Για το σχεδιασμό ενός ΔΠ πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ Ο προσδιορισμός και η αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης. Αναλυτικότερα: (α) εξετάζονται οι δυνατότητες πρόγνωσης της βροχόπτωσης με μοντέλα καιρού και δίκτυα ραντάρ ή/και δορυφόρων, (β) εντοπίζονται μετρητές των χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης και της ροής υφιστάμενων δικτύων, και (γ) αξιοποιούνται τα (α) και (β) εντάσσοντάς τα στο σχεδιαζόμενο ΔΠ.
- ▶ Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού και των βέλτιστων θέσεων των απαιτούμενων μετρητών βροχόπτωσης και ροής.
- ▶ Ο προσδιορισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών των μετρητών και των απαιτήσεων συλλογής και μετάδοσης των μετρήσεων στο Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ).

Βήμα 3: Επιλογή, δόμηση, βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση του Μοντέλου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Ένα ΜΠΠ αποτελείται συνήθως από:

- ▶ το υδρολογικό μοντέλο, και
- ▶ το υδροδυναμικό μοντέλο.

Στο βήμα αυτό, πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ Καθορίζονται τα όρια της περιοχής εφαρμογής του ΜΠΠ και πραγματοποιείται η σύνθεση του 3D μοντέλου εδάφους με βάση τα δεδομένα του βήματος 1, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στις κύριες οδούς των κατοικημένων περιοχών που (ενδέχεται να) πλημμυρίζουν.
- ▶ Δομείται το υδρολογικό μοντέλο, αφού επιλεγεί από τα διαθέσιμα μοντέλα. Το μοντέλο βαθμονομείται και εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό των πλημμυρογραφημάτων στα ανάντη όρια της περιοχής υπολογισμών του υδροδυναμικού μοντέλου. Δίνεται μεγάλη σημασία στην επίδραση της υγρασίας του εδάφους και της ΚΑ.
- ▶ Δομείται το υδροδυναμικό μοντέλο, αφού επιλεγεί από τα διαθέσιμα μοντέλα. Το μοντέλο που επιλέγεται μπορεί να έχει τη δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης του υπόγειου ορίζοντα και της στερεομεταφοράς (Sant et al., 2021). Πριν τη βαθμονόμηση του μοντέλου (1) επιλέγονται οι αρχικές τιμές των συντελεστών τραχύτητας με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, και (2) πραγματοποιούνται υπολογισμοί ανεξαρτησίας του υπολογιστικού πλέγματος για οριστικοποιηθεί το υπολογιστικό πλέγμα. Έπειτα, βαθμονομείται το υδροδυναμικό μοντέλο και προσδιορίζονται οι τιμές τραχύτητας για τις οποίες επιτυγχάνεται ικανοποιητική συμφωνία των υπολογισμών του μοντέλου με τις διαθέσιμες μετρήσεις.
- ▶ Βελτιστοποιείται το υδροδυναμικό μοντέλο με στόχο τη μείωση του χρόνου υπολογισμών χωρίς αυτό να είναι σε βάρος της απαιτούμενης ακρίβειας των υπολογισμών, π.χ. με την αύξηση των διαστάσεων του πλέγματος υπολογισμών, κυρίως στις 2D περιοχές ενδεχόμενης κατάκλισης.

Βήμα 4: Εντοπισμός των Περιοχών Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

Για τις Περιοχές Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΠΥΚΠ) συνήθως διατίθενται δεδομένα, όπως συμβάντα πλημμυρών και οι Ζώνες Δυστηκτά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας και στο βήμα αυτό εντοπίζονται σε κλίμακα μικρών διαστάσεων, όπως 10-30 m. Για τον εντοπισμό τους, εφαρμόζεται μια τυπική μεθοδολογία προσδιορισμού του κινδύνου πλημμύρας, όπως π.χ. της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ και πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ Καθορίζονται τα σενάρια υπολογισμών, π.χ. για πλημμύρες χαμηλής (T=1000 έτη), μέσης (T=100 έτη) και υψηλής πιθανότητας (T= 20 έτη) υπέρβασης, κάνοντας τις απαιτούμενες επεκτάσεις και προσαρμογές ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση και πραγματοποιούνται τα επόμενα για όλα τα σενάρια.
- ▶ Εφαρμόζεται το υδρολογικό μοντέλο και προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, των πλημμυρών σχεδιασμού και των πλημμυρογραφημάτων στην περιοχή υπολογισμού του υδροδυναμικού μοντέλου. Για να ληφθεί υπόψη η επίπτωση της ΚΑ στα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μεθοδολογίες (Stamou, 2019, 2021a και b).
- ▶ Εφαρμόζεται το βαθμονομημένο υδροδυναμικό μοντέλο και υπολογίζονται οι ταχύτητες, τα βάθη ροής και οι περιοχές κατάκλισης.
- ▶ Προσδιορίζεται η χωρική κατανομή της επικινδυνότητας με βάση τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου.
- ▶ Προσδιορίζεται η χωρική κατανομή της τρωτότητας, με βάση τα δεδομένα πλημμυρικής τρωτότητας (βλ. βήμα 1).
- ▶ Προσδιορίζεται η χωρική κατανομή του κινδύνου πλημμύρας και εντοπίζονται οι ΠΥΚΠ.

Στο βήμα αυτό, μπορούν να εκτιμηθεί ποσοτικά η αναμενόμενη μείωση του κινδύνου πλημμύρας με αντιπλημμυρικά έργα που βρίσκονται στο στάδιο μελέτης ή/και κατασκευής, όπως π.χ. γκρι (από μπετόν) ή πράσινα, με φυσικές μεθόδους, όπως π.χ. με φύτευση της πλημμυρικής κοίτης (Παναγιωτάτου και Στάμου, 2022).

Βήμα 5: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών προειδοποίησης

Τα χαρακτηριστικά προειδοποίησης εξαρτώνται από τη μορφή της υπηρεσίας προειδοποίησης που προσφέρει το ΣΕΠΠ, η οποία μπορεί να είναι από εξαιρετικά απλή, όπως π.χ. με βάση την υπέρβαση ενός ορίου υδροδυναμικής παραμέτρου, π.χ. του βάθους ροής, που μετρείται σε ένα υδατόρεμα, μέχρι πολύ σύνθετη, όπως π.χ. με την λεπτομερή πρόγνωση και αποτύπωση των περιοχών κατάκλισης με βαθμονομημένα υδρολογικά - υδραυλικά μοντέλα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά προειδοποίησης που μπορούν να προσδιοριστούν είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Τιμές Flash Flood Guidance.
- ▶ Καμπύλες στάθμης - παροχής στις θέσεις του προτεινόμενου ΔΠ και στις κρίσιμες διατομές που υπερχειλίζουν πρώτες και κατακλύζουν τις γειτονικές περιοχές με σημαντικές επιπτώσεις.
- ▶ Χρόνοι διάδοσης (του μέγιστου βάθους ροής και της μέγιστης παροχής) της πλημμύρας και άφιξης της σε διάφορες θέσεις, ιδίως στις ΠΥΠΚ, με βάση τους οποίους μπορεί να γίνει η εκτίμηση των διαθέσιμων χρόνων προειδοποίησης.
- ▶ Συσχετίσεις της στάθμης της επιφάνειας ροής σε διάφορες θέσεις ενός υδατορέματος.

Σημειώνεται, ότι ο προσδιορισμός των παραπάνω χαρακτηριστικών γίνεται με βάση μετρήσεις, π.χ. του ΔΠ. Σε περίπτωση που αυτός ο προσδιορισμός γίνεται με μαθηματικά μοντέλα, θα πρέπει αυτά να βαθμονομούνται με μετρήσεις πεδίου και να ελέγχονται-τροποποιούνται τακτικά ώστε να λαμβάνουν υπόψη όλες τις μεταβολές των χαρακτηριστικών της περιοχής εφαρμογής.

Βήμα 6: Σχεδιασμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Ο σχεδιασμός του ΚΠΠ και των υποδομών του περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- ▶ Τις κτιριακές εγκαταστάσεις του ΚΠΠ.
- ▶ Τον εξοπλισμό του ΚΠΠ με τις εφεδρείες και τη συντήρησή του, και το λογισμικό του ΚΠΠ.
- ▶ Το προσωπικό του ΚΠΠ.
- ▶ Τη λειτουργία του ΚΠΠ, συνήθως σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους.
- ▶ Τη μετάδοση των δεδομένων από τους μετρητές-αισθητήρες στο ΚΠΠ.

Βήμα 7: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μηνυμάτων προειδοποιήσεων και της ετοιμότητας του κοινού

Η αποτελεσματική μετάδοση και επικοινωνία των προειδοποιήσεων του ΣΕΠΠ, καθώς και η ετοιμότητα απόκρισης του κοινού είναι ζωτικής σημασίας. Γενικά, περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- ▶ Σύνταξη του μηνύματος προειδοποίησης αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του ΜΠΠ και του ΔΠ.
- ▶ Μετάδοση του μηνύματος προειδοποίησης από το ΚΠΠ προς τους ενδιαφερόμενους μέσω κατάλληλων καναλιών επικοινωνίας.
- ▶ Λήψη και κατανόηση του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους.
- ▶ Αποδοχή του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους και πραγματοποίηση των ορθών ενεργειών με βάση την ετοιμότητα που διαθέτουν και το σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες.

Σημειώνεται, ότι είναι απαραίτητο τα άτομα που διατρέχουν κίνδυνο να λαμβάνουν και να ερμηνεύουν σωστά τις προειδοποιήσεις που εκδίδονται, ώστε να μπορούν να εξάγουν τα σωστά συμπεράσματα για τις ενέργειες που πρέπει να κάνουν. Όταν αυτά ενεργούν λανθασμένα μπορεί να προκληθούν θάνατοι. Πολλοί θάνατοι έχουν καταγραφεί σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς άτομα προσπαθούσαν να οδηγήσουν ή να περπατήσουν στα υδατορέματα χωρίς να γνωρίζουν ή να εκτιμούν σωστά τον κίνδυνο (Paragiannaki et al., 2021; Paragiannaki et al. 2022). Κατά συνέπεια, οι προειδοποιήσεις δεν πρέπει μόνο να γίνονται έγκαιρα, αλλά να είναι συμβατές με την αντίληψη της τοπικής κοινότητας σχετικά με τις πλημμύρες και τους παράγοντες που επηρεάζουν τις αντιδράσεις των μελών της που λαμβάνουν την προειδοποίηση. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της τοπικής κοινωνίας προσδιορίζονται συνήθως μέσω έρευνας με τη χρήση ερωτηματολογίων (Καραμούστου και Στάμου, 2019).

Τα βήματα της μεθοδολογίας συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3

Σύνοψη των βημάτων σχεδιασμού ενός ΣΕΠΠ
Βήμα 1: Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων
<ul style="list-style-type: none"> ✔ Τοπογραφικά δεδομένα. ✔ Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και συμβάντα πλημμυρών. ✔ Χρήσεις γης. ✔ Εδαφική διάβρωση των υδατορεμάτων. ✔ Περιβαλλοντικά και οικολογικά δεδομένα. ✔ Σημαντικά έργα υποδομής. ✔ Δεδομένα πλημμυρικής τρωτότητας.
Βήμα 2: Σχεδιασμός του Δικτύου Παρακολούθησης
<ul style="list-style-type: none"> ✔ Προσδιορισμός και αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης. ✔ Βέλτιστος σχεδιασμός του δικτύου παρακολούθησης. ✔ Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μετρητών και των απαιτήσεων συλλογής και μετάδοσης των μετρήσεων στο Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών.
Βήμα 3: Επιλογή, δόμηση, βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση του Μοντέλου Πρόγνωσης Πλημμυρών
<ul style="list-style-type: none"> ✔ Καθορισμός των ορίων της περιοχής υπολογισμών και δόμηση του 3D μοντέλου εδάφους. ✔ Επιλογή, δόμηση, βαθμονόμηση και εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου. ✔ Επιλογή, δόμηση και βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου. ✔ Βελτιστοποίηση του υδροδυναμικού μοντέλου.

<p>Βήμα 4: Εντοπισμός των Περιοχών Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας</p> <ul style="list-style-type: none"> ✔ Καθορισμός σεναρίων υπολογισμών. ✔ Υπολογισμοί υδρολογικού μοντέλου - Επίδραση κλιματικής αλλαγής. ✔ Υπολογισμοί έκτασης των περιοχών κατάκλισης. ✔ Υπολογισμοί χαρακτηριστικών ροής. ✔ Υπολογισμοί πλημμυρικής επικινδυνότητας. ✔ Υπολογισμοί πλημμυρικής τρωτότητας. ✔ Υπολογισμοί του κινδύνου πλημμύρας. ✔ Προσδιορισμός περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας.
<p>Βήμα 5: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών προειδοποίησης</p> <ul style="list-style-type: none"> ✔ Τιμές Flash Flood Guidance. ✔ Καμπύλες στάθμης-παροχής. ✔ Χρόνοι διάδοσης της πλημμύρας και άφιξής της σε διάφορες θέσεις. ✔ Συσχετίσεις της στάθμης της επιφάνειας ροής σε διάφορες θέσεις ενός υδατορέματος.
<p>Βήμα 6: Σχεδιασμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών και των υποδομών του</p> <ul style="list-style-type: none"> ✔ Κτιριακές εγκαταστάσεις. ✔ Εξοπλισμός με τις εφεδρείες και τη συντήρησή του. ✔ Προσωπικό. ✔ Λειτουργία σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους. ✔ Μετάδοση των δεδομένων από τους μετρητές-αισθητήρες στο Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών.
<p>Βήμα 7: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μηνυμάτων προειδοποιήσεων και της ετοιμότητας του κοινού</p> <ul style="list-style-type: none"> ✔ Σύνταξη του μηνύματος προειδοποίησης. ✔ Μετάδοση του μηνύματος προειδοποίησης από το Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών προς τους αποδέκτες μέσω κατάλληλων καναλιών επικοινωνίας. ✔ Λήψη και κατανόηση του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους. ✔ Αποδοχή του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους και πραγματοποίηση των ορθών ενεργειών με βάση την ετοιμότητα που διαθέτουν και το σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες.

2.7 Βιβλιογραφία

1. AUG (2022). ALERT Users Group. <http://www.alertsystems.org>
2. Bournas, A., & Baltas, E. (2021). Increasing the efficiency of the Sacramento model on event basis in a Mountainous River Basin. *Environmental Processes*, 8(2), 943–958. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00504-4>
3. Bournas, A., & Baltas, E. (2022a). Investigation of the gridded flash flood guidance in a peri-urban basin in Greater Athens area, Greece. *Journal of Hydrology*, 610, 127820. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127820>
4. Bournas, A., Baltas, E., & Stamou, A. (2022b). Implementation of the gridded flash flood guidance method in the Mandra basin in west Attica, Greece. *Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress*. Athens, Greece.
5. Burnash, R. (1995). The NWS river forecast system-catchment modeling. In: Singh V. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 311-366), Water Resources Publication, Colorado.

6. Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T., & Fread, D. L. (1999). National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of Operational Flash Flood Warning Systems. *Journal of Hydrology*, 224(1-2), 21–44. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(99\)00115-8](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(99)00115-8)
7. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
8. Erlingis, J. M., Gourley, J. J., & Hong, Y. (2013). Relationships between Return Period and Flash Flooding in the United States. *Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts 2013:H51Q-04*.
9. Georgakakos, K. P. (2006). Analytical results for Operational Flash Flood Guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1-2), 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.009>
10. Koren, V., Smith, M., & Duan, Q. (2003). Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models. *Water Science and Application*, 239–254. <https://doi.org/10.1029/ws006p0239>
11. Koren, V., Smith M., Wang, D., Zhang, Z. (2000). Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters. *Proceedings of the 15th Conference on Hydrology*, AMS, January 9-14, 2000, Long Beach, CA.
12. Mimikou, M., Baltas, E. & Tsihrintzis, V. A. (2018). *Hydrology and Water Resource Systems Analysis*. Textbook 448 Pages, CRC Press, Taylor and Francis Group, ISBN 9781466581302.
13. Mitsopoulos G., Bloutsos A., Panagiotatou E., Baltas, E. & Stamou A. (2022). Design Aspects of an Early Warning System for Flash Floods: The Case of the Town of Mandra in Attica. *Proceedings of the 39th IAHR World Congress 19-24 June 2022 Granada, Spain*. ISSN-L 2521-7119.
14. Ntelekos, A. A., Georgakakos, K. P., & Krajewski, W. F. (2006). On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 896–915. <https://doi.org/10.1175/jhm529.1>
15. NHWC (2023). National Hydrologic Warning Council. https://www.hydrologicwarning.org/content.aspx?page_id=22&club_id=617218&module_id=83216
16. NWS (2010). National Weather Service. Flood warning systems manual. National Weather Service Manual 10-942, February 10, 2010, Operations and Services Hydrologic Services Program, NWSPD 10-9, <https://www.nws.noaa.gov/directives/O10/archive/pd01009042c.pdf>
17. NWS (2023). National Weather Service. https://www.weather.gov/images/serfc/FFG_3HR.png
18. Papagiannaki, K., Diakakis, M., Kotroni, V., Lagouvardos, K., & Papagiannakis, G. (2021). The role of water depth perception in shaping car drivers' intention to enter floodwaters: Experimental evidence. *Sustainability*, 13(8), 4451. <https://doi.org/10.3390/su13084451>
19. Papagiannaki, K., Petrucci, O., Diakakis, M., Kotroni, V., Aceto, L., Bianchi, C., Brzdil, R., Gelabert, M. G., Inbar, M., Kahraman, A., Kılıç, Ö., Krahn, A., Kreibich, H., Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Macdonald, N., de Brito, M. M., Mercuri, M., Pereira, S., ... Zêzere, J. L. (2022). Developing a large-scale dataset of flood fatalities for territories in the Euro-Mediterranean region, FFEM-DB. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01273-x>
20. Reed, S., Koren, V., Zhang, Z., Smith, M., & Seo, D. J. (2002). Distributed modeling for improved NWS river forecasts. *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, NV.
21. Sant, V., Mitsopoulos, G., Bloutsos, A. & Stamou, A. (2021). Modelling Sediment Transport in the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10561.
22. Schmidt, J. A., Anderson, A. J., & Paul, J. H. (2007). Spatially-variable, physically-derived flash flood guidance. In *Preprints, 21st Conf. on Hydrology*, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc. B (Vol. 6).

23. Stamou A. I. (2019). Adapting Civil Engineering Design to Climate Change, HELLASCO Conference, The Consulting Industry facing new markets, requirements and instruments, 26-27 September 2019, Athens. https://segm.gr/wp-content/uploads/2019/09/Hellasco_Conf-2019_G.Stamou.pdf
24. Stamou A. I. (2021a). Keynote presentation: Climate change and infrastructure projects, Empowering science to deliver change, 17th International Conference on Environmental Science and Technology, 1 - 4 September 2021, Athens.
25. Stamou A. I. (2021b). Climate Change and Green Infrastructure, HELLASCO Conference, The Consulting Industry catalyst for development, 30 September - 1 October 2021, Athens.
26. Stamou A. I. (2022). Methodology for the design of Flood Early Warning Systems in Climate Change Conditions– Application in the town of Mandra, Attica, Greece, Common Teaching and Research on “WaTerResources Management for Cllmate Change AdapTatiON (TRITON)”, Workshop “Teaching and Research on Floods and Droughts in Europe”, IFAT, Munich, June 1, 2022.
27. Stewart, K. G. (1999). Managing and distributing real-time and archived hydrologic data from the urban drainage and flood control district’s alert system. Proceedings of the 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Tempe, AZ. [https://doi.org/10.1061/40430\(1999\)238](https://doi.org/10.1061/40430(1999)238)
28. WMO (2011). World Meteorological Organization. Manual on Flood Forecasting and Warning, WMO-No. 1072.
29. WMO (2017). World Meteorological Organization. South-East Europe Flash Flood Guidance System (SEFFGS) - Forecaster Guide.
30. Ευστρατιάδης, Α. (2019). Σημειώσεις Αστικής Υδρολογίας: Αστικές αποχετεύσεις. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
31. Καραμούστου, Π. και Στάμου, Α. (2019). Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ξαφνικών πλημμυρών και η τοπική κοινωνία – Η περίπτωση της Μάνδρας Αττικής. Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.
32. Κουτσογιάννης, Δ. (1997). Στατιστική Υδρολογία. 4η έκδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. 10.13140/RG.2.1.5118.2325
33. Κουτσογιάννης, Δ. & Ξανθόπουλος, Θ. (1997). Τεχνική Υδρολογία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
34. Μαμάσης, Ν. & Κουτσογιάννης, Δ. (1999). Σημειώσεις Προχωρημένης Υδρολογίας - Μέρος 2. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
35. Μαμάσης, Ν. & Κουτσογιάννης, Δ. (2000). Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος 2. 2η έκδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
36. Μιμίκου, Μ. (2006). Τεχνολογία υδατικών πόρων. 3η έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα ISBN-13: 9789607530790.
37. Μιμίκου, Μ. & Μπαϊτάς, Ε. (2006). Τεχνική Υδρολογία. 6η έκδοση, Εκδ. Παπασωτηρίου, ISBN 9789604911257.
38. Παναγιωτάτου, Ε. & Στάμου, Α. (2022). Μαθηματική προσομοίωση φυσικών μεθόδων μείωσης πλημμυρικού κινδύνου σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Πρακτικά 15ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2-3 Ιουνίου 2022.
39. Στάμου, Α. & Μπαϊτάς, Ε. (2022). Σχεδιασμούς συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Εφαρμογή στην πόλη της Μάνδρας. Πρακτικά 15ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2-3 Ιουνίου 2022.
40. Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί Πόροι : Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Δίκτυα Παρακολούθησης

*Ε. Μπαλτάς, Β. Κοτρώνη, Κ. Λαγουβάρδος, Κ. Καρτάλης, Μ. Διακάκης,
Δ. Καλογεράς, Α. Ι. Στάμου*

3.1 Σκοπός και κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων παρακολούθησης

Η παρακολούθηση είναι η πρώτη συνιστώσα ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ), βλ. υποκεφάλαιο 1.2, με την οποία πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- (α) Παρακολουθούνται οι προγνώσεις καιρού για να εντοπιστεί η επικίνδυνη βροχόπτωση που μπορεί να προκαλέσει πλημμύρα στην περιοχή εφαρμογής. Η παρακολούθηση αυτή μπορεί να ξεκινήσει αρκετά νωρίτερα μέσω της χρήσης των μαθηματικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού ή απλά μοντέλων πρόγνωσης καιρού (βλ. υποκεφάλαιο 3.5). Με αυτά μπορεί να εκτιμηθεί η εμφάνιση μιας ισχυρής βροχόπτωσης αρκετές ημέρες πριν, και τότε αυτή θα πλήξει την περιοχή εφαρμογής.
- (β) Όταν ένα βροχοφόρο σύστημα πλησιάζει (ή δημιουργείται) στην εξεταζόμενη περιοχή, μπορεί να εντοπιστεί με τους δορυφόρους και τα ραντάρ καιρού (βλ. υποκεφάλαιο 3.3), τα οποία εκτιμούν την ένταση της βροχόπτωσης σε μεγάλες εκτάσεις με υψηλή χρονική και χωρική ακρίβεια, αρκεί να είναι κατάλληλα χωροθετημένα στο έδαφος και με την απαιτούμενη πυκνότητα. Οι δορυφόροι και τα ραντάρ αποτελούν την πλατφόρμα τηλεπισκόπησης του Δικτύου Παρακολούθησης (ΔΠ) του ΣΕΠΠ, που έχει πολύ μεγάλη σημασία για την πρόγνωση μιας ξαφνικής πλημμύρας.
- (γ) Όταν πλέον έχει ξεκινήσει η βροχόπτωση, μπορεί να μετρηθεί με τους μετρητές βροχόπτωσης που τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις της λεκάνης απορροής και να επιβεβαιωθούν (ή όχι) οι εκτιμήσεις των ραντάρ. Στη συνέχεια, όταν η απορροή καταλήγει στα υδατορέματα της εξεταζόμενης περιοχής, μπορεί να μετρηθεί η άνοδος της στάθμης της επιφάνειας ροής, αλλά και η ταχύτητα και η παροχή τους με τους μετρητές των χαρακτηριστικών ροής (βλ. υποκεφάλαιο 3.2). Οι μετρητές βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών ροής αποτελούν το επίγειο τμήμα του ΔΠ.

Ο κύριος σκοπός ενός ΔΠ είναι η εκτίμηση των γεγονότων βροχόπτωσης που υπερβαίνουν συγκεκριμένες μέγιστες τιμές έγκαιρα, δηλ. έχοντας σημαντικό διαθέσιμο χρόνο που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της πλημμύρας.

Ένα ΔΠ αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους δίκτυα:

- ▶ Δίκτυα μέτρησης χαρακτηριστικών βροχόπτωσης και ροής.
- ▶ Δίκτυα ραντάρ βροχόπτωσης.
- ▶ Δίκτυα μετεωρολογικών δορυφόρων.

3.2 Μετρητές βροχόπτωσης και χαρακτηριστικών ροής

3.2.1 Γενικά

Ο σκοπός των δικτύων μετρητών της βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών ροής είναι να παρέχουν ακριβείς και σε πραγματικό χρόνο μετρήσεις στο ΣΕΠΠ, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τα ακόλουθα:

- ▶ τη διόρθωση/προσαρμογή των εκτιμήσεων βροχόπτωσης από τα ραντάρ και τους δορυφόρους,
- ▶ την παροχή δεδομένων εισόδου στα Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ), βλ. κεφάλαιο 4, και
- ▶ την υποστήριξη των προγνώσεων του καιρού και των πλημμυρών.

Τα κύρια τμήματα ενός μετρητή της βροχόπτωσης ή των χαρακτηριστικών ροής είναι:

- ▶ ο αισθητήρας που πραγματοποιεί τη μέτρηση,
- ▶ ο καταγραφέας που λαμβάνει τη μέτρηση από τον αισθητήρα, την καταγράφει ηλεκτρονικά ή μηχανικά, και την αποθηκεύει σε καταχωρητή δεδομένων, και
- ▶ η επικοινωνιακή υποδομή, όπως π.χ. δρομολογητές και κεραίες, με την οποία μεταφέρονται οι μετρήσεις τηλεμετρικά στο Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ).

Οι απλοί μετρητές, όπως τα βροχόμετρα και τα σταθμήμετρα, δεν διαθέτουν καταγραφέα και οι ενδείξεις τους απαιτούν επιτόπια ανάγνωση. Η χρησιμοποίησή τους περιορίζει τις δυνατότητες ενός ΣΕΠΠ.

3.2.2 Μετρητές Βροχόπτωσης

Παραδοσιακά, η βροχόπτωση μετρείται χρησιμοποιώντας μετρητές που διαβάζονται χειροκίνητα ή που στέλνουν αυτόματα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε ένα δίκτυο τηλεμετρίας χρησιμοποιώντας ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία (βλ. κεφάλαιο 6). Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενοι τύποι μετρητών βροχόπτωσης είναι τα βροχόμετρα και οι βροχογράφοι (Μπαητάς, 2013· Lagouvardos et al, 2017). Κατά την τελευταία εικοσαετία, τα περισσότερα δίκτυα είναι σύγχρονα και αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από βροχογράφους με ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία που επιτρέπουν τη μέτρηση της βροχής σε πραγματικό χρόνο.

Βροχόμετρα

Τα βροχόμετρα είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, τα οποία εγκαθίστανται σε κατάλληλες θέσεις και συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση. Μετρούν την ολική σημειακή βροχόπτωση και το ισοδύναμο ύψος νερού μιας βροχόπτωσης/χιονόπτωσης ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα που είναι συνήθως 8ωρο, 12ωρο ή 24ωρο, με την ανάγνωση της ένδειξης από παρατηρητή. Ο κλασικός τύπος βροχόμετρου έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελείται από το συλλέκτη, το χωνί και τον αποδέκτη. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι βροχόμετρου είναι το ογκομετρικό και το δεκαπλάσιαστικό βροχόμετρο.

Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται ένα δεκαπλάσιαστικό βροχόμετρο (Μπαητάς, 2013).



Εικόνα 3.1: Τυπικό δεκαπλάσιαστικό βροχόμετρο (Πηγή: Μπαητάς, 2013)

Βροχογράφοι

Οι βροχογράφοι είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής που εγκαθίστανται σε κατάλληλες θέσεις και συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση. Καταγράφουν σε χαρτί καταγραφής με απλό ωρολογιακό μηχανισμό τη χρονική μεταβολή του ύψους της βροχής ανά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλοι για τη μελέτη της διακύμανσης της έντασης μιας βροχής. Οι κύριοι τύποι βροχογράφων είναι (α) με ανατρεπόμενο κάδο, (β) ο σταθμιστικός βροχογράφος και (γ) με πλωτήρα.

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ένας τυπικός βροχογράφος.

Η σημερινή τεχνολογία μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα μετατροπής της κίνησης του μηχανισμού αυτοματισμού της μέτρησης σε ψηφιακό σήμα. Η μέτρηση αντί να καταγράφεται σε χαρτί μπορεί να αποθηκεύεται σε ηλεκτρονικό καταχωρητή δεδομένων. Στη συνέχεια, το ψηφιακό σήμα μεταδίδεται με τηλεμετρία ασύρματα (μέσω ραδιοπομπού ή και δορυφόρου) ή ενσύρματα (μέσω τηλεφωνικής γραμμής) στο ΚΠΠ.

Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ένας βροχογράφος με ανατρεπόμενο κάδο που διαθέτει καταχωρητή δεδομένων και δυνατότητα τηλεμετρίας μέσω GPRS.



Εικόνα 3.2: Τυπικός βροχογράφος (Πηγή: Μπαϊτάς, 2013)



Εικόνα 3.3: Βροχογράφος με ανατρεπόμενο κάδο, καταχωρητή δεδομένων και δυνατότητα τηλεμετρίας μέσω GPRS (Πηγή: Detectronic, 2022)

3.2.3 Μετρητές στάθμης της επιφάνειας ροής

Σκοπός και κύριοι τύποι μετρητών στάθμης

Οι μετρητές στάθμης είναι διατάξεις που προσδιορίζουν ή ανιχνεύουν αυτόματα τη θέση της επιφάνειας ροής. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι μετρητών στάθμης της επιφάνειας ροής:

- ▶ με επαφή, όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε επαφή με τη ροή, και
- ▶ ανέπαφα, όταν ο αισθητήρας δεν έρχεται σε επαφή με τη ροή.

Αναλυτικές πληροφορίες για μετρητές στάθμης της επιφάνειας ροής μπορεί να βρεθούν στη βιβλιογραφία, βλ. USGS (2010a).

Μετρητές στάθμης με επαφή

Οι περισσότερο απλοί μετρητές στάθμης με επαφή χωρίς καταγραφή είναι τα σταθμήμετρα. Αυτά είναι σταδίες με υποδιαίρεσεις του μέτρου, οι οποίες είναι αναρτημένες από μια μόνιμη κατασκευή στην πε-

ριοχή ενός υδατορέματος, όπως π.χ. μια γέφυρα.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διάταξη μέτρησης στάθμης με καταγραφή φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Ο μετρητής τοποθετείται σε ένα στεγανό φρεάτιο ηρεμίας, του οποίου ο πυθμένας βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από το υψόμετρο του πυθμένα του υδατορέματος. Το φρεάτιο επικοινωνεί με το υδατόρεμα μέσω οριζόντιων σωλήνων και η στάθμη του νερού σε αυτό είναι ίδια με τη στάθμη της επιφάνειας ροής του υδατορέματος (συγκοινωνούντα δοχεία). Η στάθμη του νερού στο φρεάτιο μετρείται μέσω μιας διάταξης με πλωτήρα (βλ. Εικόνα 3.4) και καταγράφεται σε χαρτί ή ηλεκτρονικά, συνήθως κάθε 15 min.

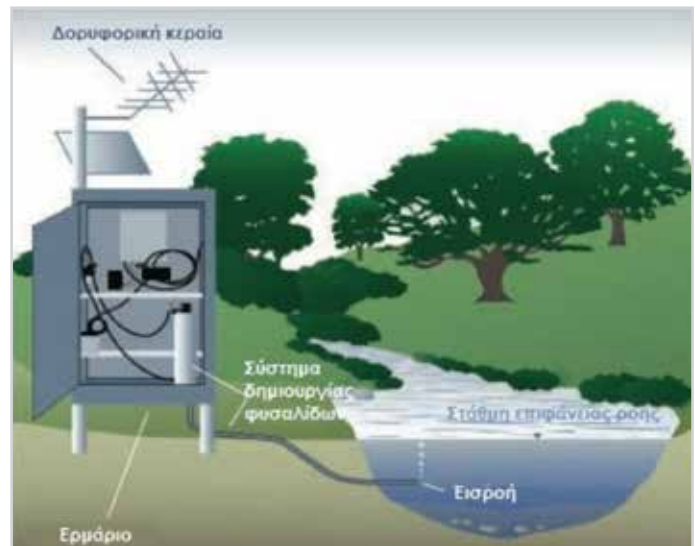
Συχνά, εφαρμόζονται μέθοδοι μέτρησης της στάθμης ροής με αισθητήρες πίεσης, όπως με βυθισμένους αισθητήρες πίεσης ή με φυσαλίδες. Στους βυθισμένους αισθητήρες μετρείται η πίεση στη θέση που είναι αυτοί βυθισμένοι και μετατρέπεται σε στάθμη της επιφάνειας ροής. Στους μετρητές με φυσαλίδες (βλ. Εικόνα 3.5), διοχετεύεται αέριο με πίεση στη ροή του υδατορέματος μέσω σωλήνων, το οποίο δημιουργεί φυσαλίδες στη ροή και οι αισθητήρες που τοποθετούνται εκτός της ροής, μετρούν την πίεση που απαιτείται για την ώθηση του αέρα στη ροή του υδατορέματος.

Ανέπαφοι μετρητές στάθμης

Η ανέπαφη μέτρηση στάθμης μπορεί να γίνει με κύματα υπερήχων, ραντάρ, ή οπτικά. Βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζονται τα εκπεμπόμενα κύματα από τον αισθητήρα να προσπέσουν στην επιφάνεια ροής, να ανακλαστούν και να επιστρέψουν σε αυτόν. Από το χρόνο αυτό, προσδιορίζεται αρχικά το μήκος της διαδρομής που διένυσαν τα κύματα και στη συνέχεια, υπολογίζεται η απόσταση αισθητήρα – στάθμης ροής. Στην Εικόνα 3.6 φαίνεται ένας μετρητής στάθμης παλμικού ραντάρ.



Εικόνα 3.4: Μετρητής στάθμης της επιφάνειας ροής με πλωτήρα (Πηγή: USGS, 2022a)



Εικόνα 3.5: Μετρητής στάθμης της επιφάνειας ροής με φυσαλίδες (Πηγή: USGS, 2022b)



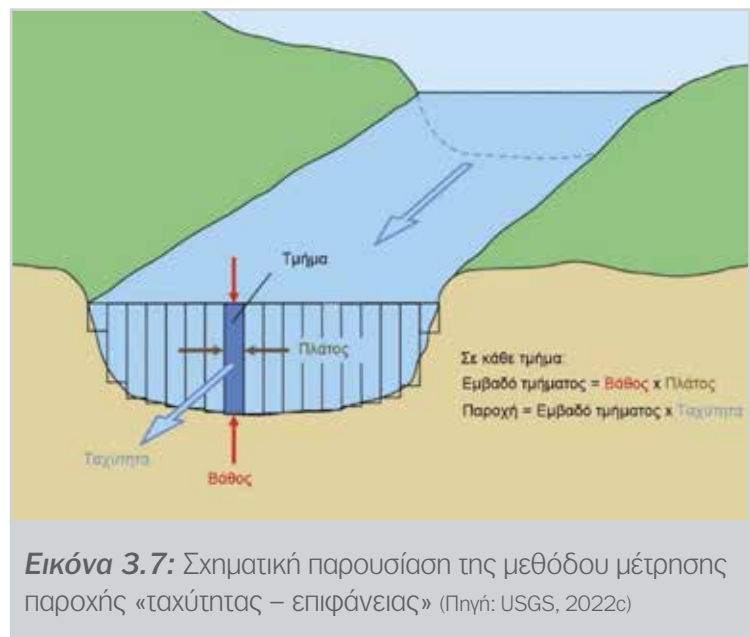
Εικόνα 3.6: Μετρητής στάθμης της επιφάνειας ροής με ραντάρ (Πηγή: USGS, 2021)

3.2.4 Μετρητές χαρακτηριστικών ροής

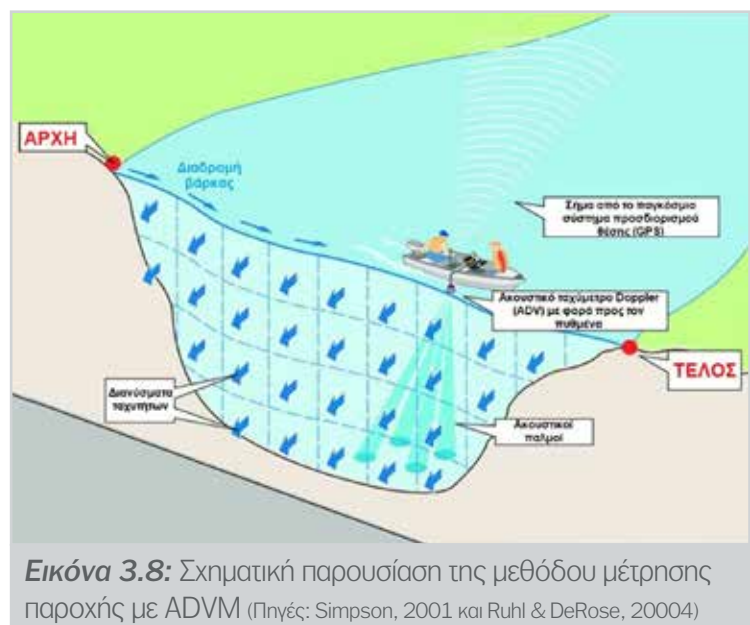
Τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής ενός υδατορέματος είναι (α) η κατανομή των ταχυτήτων ροής σε μια διατομή του, από την οποία προσδιορίζεται η μέση ταχύτητα ροής, και (β) η παροχή του. Αναλυτικές πληροφορίες για τους μετρητές των χαρακτηριστικών ροής μπορεί να βρεθούν στη βιβλιογραφία, βλ. USGS (2010b).

Για τον προσδιορισμό της κατανομής των ταχυτήτων ροής μετρείται η ταχύτητα ροής σε διάφορα σημεία της διατομής του υδατορέματος. Η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει με επαφή, όπως π.χ. με μιλίσκους, ή ανέπαφα, όπως π.χ. με ένα ακουστικό μετρητή ταχύτητας (ροής) Doppler (Acoustic Doppler Velocity Meters, ADVM) ή ακουστικό ρευματογράφο Doppler (ADCP).

Κατά τη μέτρηση των ταχυτήτων ροής με μιλίσκο (βλ. Εικόνα 3.7), χωρίζεται η διατομή του υδατορέματος σε κατακόρυφα τμήματα και μετρείται η ταχύτητα ροής σε κάθε ένα από αυτά βυθίζοντας το μιλίσκο σε συγκεκριμένα βάθη. Η ταχύτητα ροής υπολογίζεται με βάση το ρυθμό του αριθμού περιστροφών του μιλίσκου. Σε κάθε τμήμα μετρείται ταυτόχρονα το βάθος ροής με μια σταδία (βλ. υποκεφάλαιο 3.2.3) και προσδιορίζεται η θέση μέτρησης με GPS για τον υπολογισμό του πλάτους κάθε τμήματος και του εμβαδού του. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζεται η ταχύτητα ροής κάθε τμήματος με το εμβαδό του για τον υπολογισμό της παροχής του τμήματος και αθροίζονται οι παροχές όλων των τμημάτων της διατομής για να προκύψει η παροχή της διατομής. Διαιρώντας την παροχή με την επιφάνεια της διατομής, προσδιορίζεται η μέση ταχύτητα ροής. Η μέθοδος αυτή καλείται «ταχύτητας – επιφάνειας».



Η μέθοδος μέτρησης με ADVM ή ADCP είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Τα τμήματα της διατομής είναι περισσότερα και πάλι χρησιμοποιείται GPS. Το ADVM τοποθετείται σε μια βάρκα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8, ή ένα τηλεκατευθυνόμενο μικρό σκάφος, το οποίο κινείται σχεδόν κάθετα στη ροή. Οι ακουστικές δέσμες του ADVM κατευθύνονται στην επιφάνεια του νερού και μετρείται η ταχύτητα ροής σε διάφορα βάθη, τα οποία προσδιορίζονται. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παροχές όλων των επιμέρους τμημάτων που καθορίζονται με κέντρα τις θέσεις μέτρησης, την παροχή της διατομής και τη μέση ταχύτητα.



Η παροχή μπορεί να μετρηθεί και σε διατομές του υδατορέματος, στις οποίες βρίσκονται κατασκευές, όπως είναι συνήθως διαφόρων τύπων υπερχειλιστές. Σε αυτές τις διατομές που αποτελούν «διατομές ελέγχου» της ροής (Στάμου, 2016), το ύψος υπερχείλισης συνδέεται μονοσήμαντα με την παροχή, οπότε μετρώντας τη στάθμη ή το βάθος ροής (βλ. υποκεφάλαιο 3.2.3) υπολογίζεται άμεσα η παροχή μέσω γνωστών εξισώσεων της υδραυλικής. Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται ένας υπερχειλιστής τύπου V (Buytaert et al., 2016).

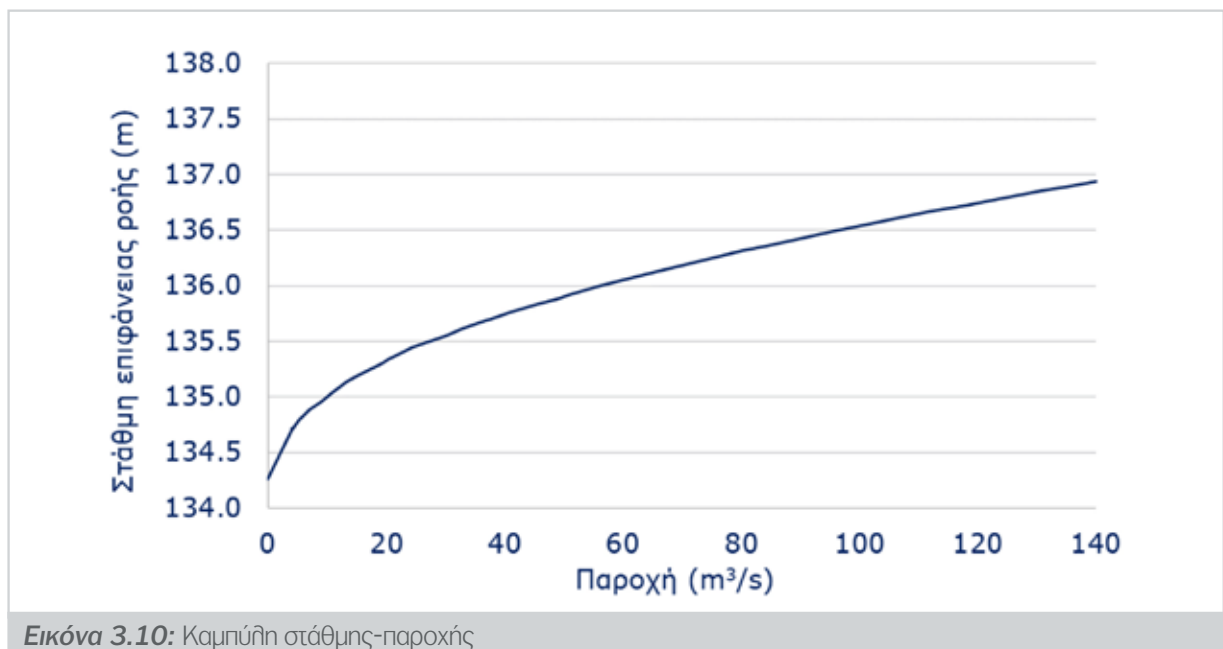


Εικόνα 3.9: Υπερχειλιστής τύπου V (Πηγή: Buytaert et al., 2016)

3.2.5 Καμπύλες στάθμης - παροχής

Πραγματοποιώντας τη μέτρηση της παροχής σε διάφορες χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν σε διάφορες στάθμες της επιφάνειας ροής, μπορεί να προσδιοριστεί η καμπύλη στάθμης-παροχής.

Στην Εικόνα 3.10 φαίνεται ενδεικτικά μια καμπύλη στάθμης-παροχής.

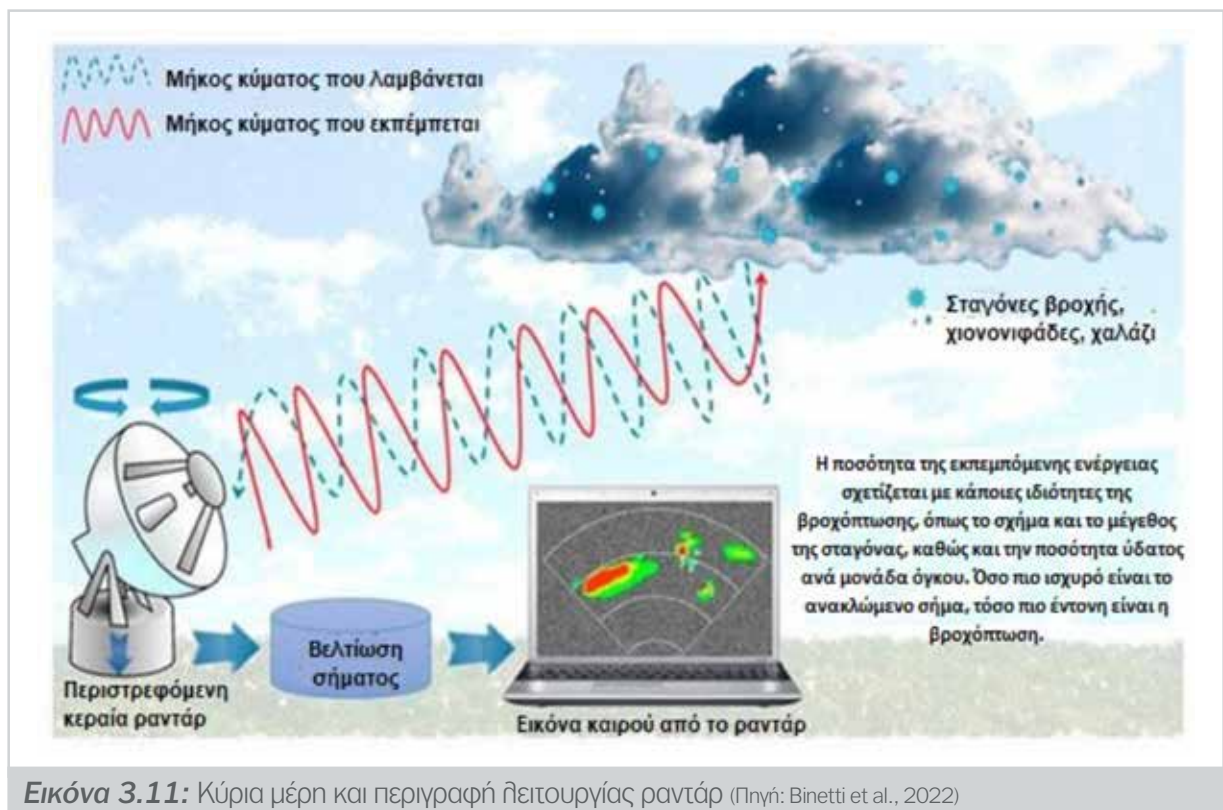


Εικόνα 3.10: Καμπύλη στάθμης-παροχής

3.3 Δίκτυα ραντάρ καιρού

3.3.1 Αρχή λειτουργίας των ραντάρ καιρού

Τα ραντάρ καιρού (Doppler) είναι όργανα που στέλνουν στην ατμόσφαιρα παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, που είναι κύματα παρόμοια με αυτά των ασύρματων δικτύων υπολογιστών και των κινητών τηλεφώνων, για να ανιχνεύσουν τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Όταν ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός προσπέσει σε σταγόνες βροχής ή νιφάδες χιονιού, ανακλάται προς το ραντάρ έχοντας χαρακτηριστικά, όπως π.χ. ισχύ και ταχύτητα, με βάση τα οποία οι μετεωρολόγοι καθορίζουν την απόσταση από μια επερχόμενη καταιγίδα, τον τύπο της κατακρήμνισης (δηλ. βροχή, χιόνι ή χαλάζι), την ποσότητα της βροχόπτωσης, την τύρβη και άλλα χαρακτηριστικά του καιρού.



3.3.2 Κύριοι τύποι των ραντάρ καιρού

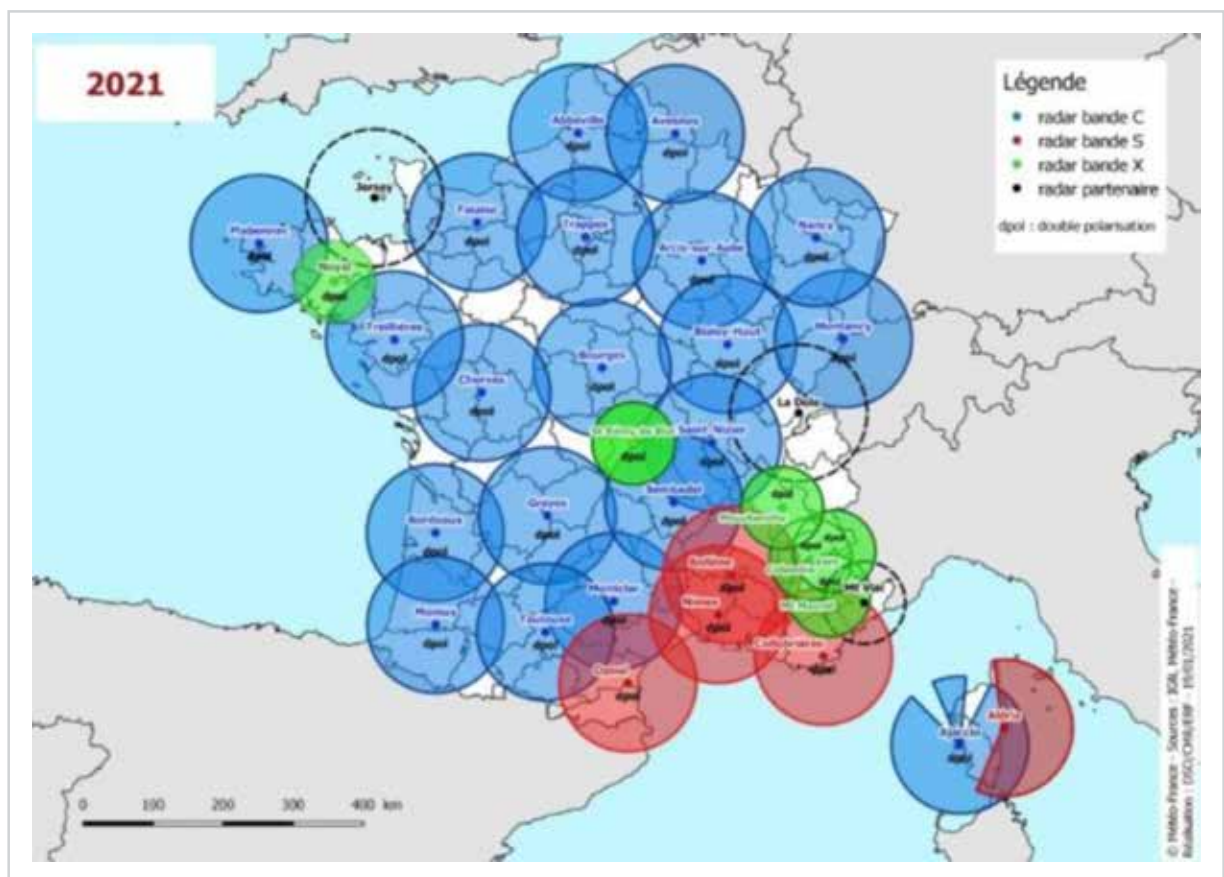
Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι κύριοι τύποι ραντάρ με βάση το εύρος των συχνοτήτων τους και του μήκους κύματός τους (Μπαϊτάς, 2013). Σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Τα S-Band έχουν μεγάλη ισχύ και μεγάλο μήκος κύματος με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη εμβέλεια, της τάξης των 200-300 km. Τα C-Band και X-Band έχουν εμβέλεια 150 km και 50 km, αντίστοιχα.
- ▶ Το μειονέκτημα κυρίως των S-Band, αλλά και των C-Band, είναι το μεγάλο κόστος αγοράς και συντήρησης, καθώς και το μέγεθος της εγκατάστασης. Τα X-Band είναι αρκετά μικρότερα και ευέλικτα, ενώ μπορούν να εγκατασταθούν και σε κινητές μονάδες.
- ▶ Τα X-Band παρέχουν υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης δεδομένα, της τάξης των 100 m x 100 m και 2 λεπτών, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1

Τύποι ραντάρ			
Τύπος	Εύρος συχνοτήτων (GHz)	Εύρος μήκους κύματος (cm)	Εμβέλεια (km)
S – Band	2 - 4	8 - 15	200
C – Band	4-8 (5.3 - 5.6)	4 - 8	150
X – Band	8 - 12	2.5 - 4.0	50

Σε εθνικό επίπεδο, δύναται η εγκατάσταση ενός δικτύου μετεωρολογικών ραντάρ το οποίο μέσω σύνδεσης των επικαλυπτόμενων περιοχών, να παράγει ένα ενιαίο σύνολο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται κυρίως τα S-Band και τα C-Band ραντάρ, ενώ τα X-Band μπορεί να χρησιμοποιούνται σε περιοχές με έντονο ενδιαφέρον ή ανάγλυφο, όπως είναι οι αστικές περιοχές. Στην Εικόνα 3.12, φαίνεται το δίκτυο ραντάρ της Météo-France στη Γαλλία (Chochon et al., 2021) που αποτελείται από 20 C-band, 5 S-band, 6 X-band ραντάρ και 2 στα αεροδρόμια του Παρισιού (CDG) και της Νίκαιας.



Εικόνα 3.12: Το δίκτυο ραντάρ της Météo-France στη Γαλλία (Πηγή: Chochon et al., 2021)

3.3.3 Κύρια μέρη των ραντάρ καιρού

Τα μέρη ενός τυπικού ραντάρ, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 3.11, είναι τα ακόλουθα (IBM, 2022):

- ▶ **Πομπός.** Ο πομπός παράγει τον ενεργειακό παλμό.
- ▶ **Δέκτης ραντάρ.** Τα σύγχρονα ραντάρ αποτελούνται από ένα δέκτη (μεγάλο πιάτο) ραντάρ και ένα

προστατευτικό στρώμα για την προστασία του από φθορές. Ο δέκτης μπορεί να περιστρέφεται για να συλλέγει δεδομένα και πληροφορίες από διαφορετικές περιοχές.

- ▶ **Κεραία.** Η κεραία στέλνει παλμούς στην ατμόσφαιρα και λαμβάνει τους ανακλώμενους παλμούς.
- ▶ **Διακόπτης εκπομπής/λήψης.** Ο διακόπτης καθοδηγεί την κεραία πότε να εκπέμπει και πότε να λαμβάνει τους παλμούς.
- ▶ **Δέκτης.** Ο δέκτης ανιχνεύει, ενισχύει και μετασχηματίζει το λαμβανόμενο σήμα σε βίντεο.
- ▶ **Επεξεργαστής ραντάρ.** Ο επεξεργαστής ραντάρ χρησιμοποιείται για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων ραντάρ που επιστρέφουν στο πιάτο/κεραία. Χρησιμοποιεί πληροφορίες, όπως η απόσταση του σήματος, για να καθορίσει την πρόγνωση του καιρού.
- ▶ **Σύστημα προβολής-εμφάνισης.** Το σύστημα προβολής συνδέεται άμεσα με το ραντάρ και τα λαμβανόμενα σήματα εμφανίζονται στην οθόνη του.

3.3.4 Μέτρηση χαρακτηριστικών βροχόπτωσης με τα ραντάρ καιρού

Τα υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά ενός ραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Ανακλαστικότητα.** Αποτελεί μέτρο του ποσού της βροχόπτωσης, χαλαζόπτωσης και χιονόπτωσης που υπάρχει σε μια συγκεκριμένη περιοχή.
- ▶ **Ταχύτητα.** Αφορά το μέτρο της ταχύτητας και της διεύθυνσης της βροχόπτωσης προς ή από το ραντάρ.

Η μονάδα μέτρησης της ανακλαστικότητας (Z) του ραντάρ είναι mm^6/m^3 . Το εύρος των τιμών που δύναται να λάβει κυμαίνεται από $0.001 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για ομίχλη και ασθενή νέφη μέχρι και $50.000.000 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για χαλάζι. Εξαιτίας του μεγάλου εύρους των τιμών, συχνά εφαρμόζεται ο ακόλουθος μετασχηματισμός μονάδων:

$$z(\text{dBZ}) = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3} \right) \quad (3.1)$$

όπου z είναι η ανακλαστικότητα σε dBZ (decibels). Αυτή η μετατροπή δίνει τιμές της ανακλαστικότητας από 30 dBZ για ασθενή νέφη μέχρι και 75 dBZ για ισχυρό χαλάζι.

Η ανακλαστικότητα και η ένταση βροχόπτωσης (R) είναι συναρτήσεις της δεδομένης κατανομής των υδροσταγονιδίων. Η σχέση μεταξύ της ανακλαστικότητας και της έντασης βροχής δεν είναι γραμμική και για τον μετασχηματισμό της εφαρμόζεται μια εμπειρική εκθετική εξίσωση (εξίσωση Z-R) που έχει την ακόλουθη μορφή:

$$Z = a \cdot R^b \quad (3.2)$$

όπου a και b είναι παράμετροι που εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως τα κλιματικά χαρακτηριστικά, τα χαρακτηριστικά της καταιγίδας, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά κ.ά. Οι τιμές της παραμέτρου a κυμαίνονται από 25 μέχρι 2000 και της παραμέτρου b από 1.05 μέχρι 2.5. Οι Marshall and Palmer

(1948) ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν την εξίσωση (3.2) μετά από στατιστική επεξεργασία δεδομένων βροχής και κατέληξαν στις τιμές 200 και 1.6 για τις παραμέτρους a και b , αντίστοιχα (Μπαητάς, 2013).

3.3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ραντάρ καιρού

Τα ραντάρ καιρού έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς, αλλά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, τα οποία οφείλονται κυρίως στα σφάλματα του σήματος (Μπαητάς, 2013).

Τα πλεονεκτήματα των ραντάρ καιρού είναι τα ακόλουθα (LidarRadar, 2022):

- ▶ Παρέχουν δεδομένα υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιόπιστη παρατήρηση των χαρακτηριστικών του καιρού και ιδιαίτερα των κατακρημνισμάτων, όπως της βροχής, του χαλαζιού κ.α. Έτσι, αξιοποιούνται στην παρακολούθηση του καιρού.
- ▶ Επιτρέπουν την εκτίμηση της έντασης των βροχοπτώσεων.
- ▶ Προσδιορίζουν τη δομή των καταιγίδων.
- ▶ Ανιχνεύουν το χαλάζι και τις χαλαζοθύελλες.
- ▶ Αξιοποιούνται στην έρευνα.
- ▶ Αξιοποιούνται στην πρόγνωση πλημμυρών.

Τα μειονεκτήματα των ραντάρ καιρού είναι τα ακόλουθα (LidarRadar, 2022):

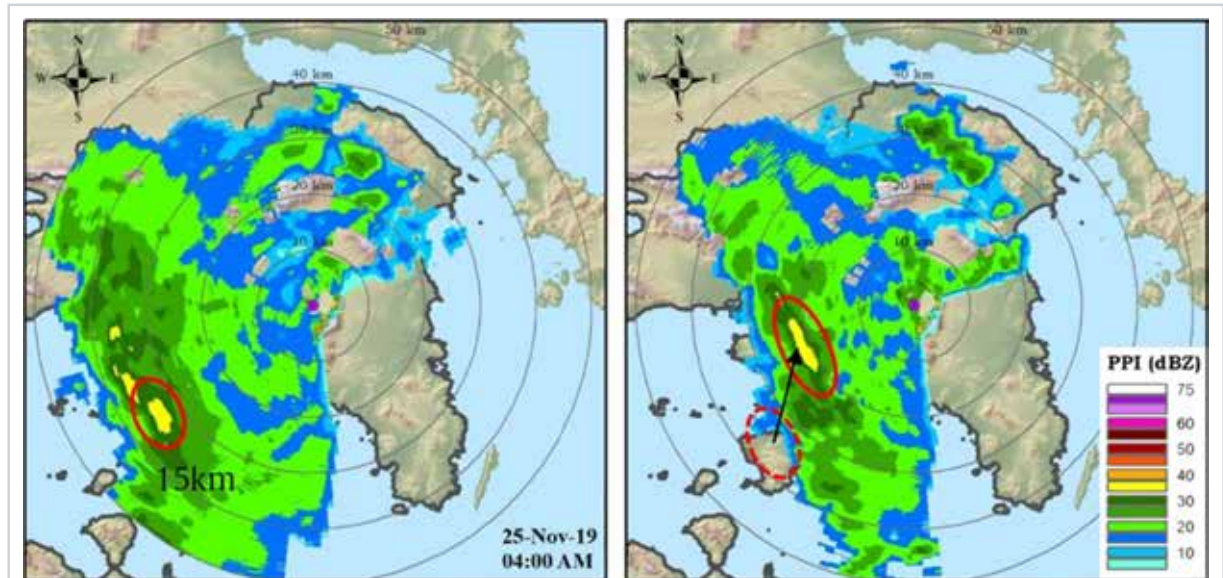
- ▶ Δεν ανιχνεύουν την ομίχλη.
- ▶ Απαιτούν τεχνογνωσία για την ανάλυση των δεδομένων.
- ▶ Βασίζονται σε μεγάλο όγκο δεδομένων που απαιτούν αρκετό χρόνο για να αναλυθούν με αποτέλεσμα οι πληροφορίες να μην παρέχονται σε πραγματικό χρόνο
- ▶ Οποιαδήποτε καθυστέρηση στη συλλογή δεδομένων μπορεί μερικές φορές να τα καταστήσει άχρηστα, εξαιτίας της συνεχούς μεταβολής του καιρού.
- ▶ Οι μετρήσεις τους δεν έχουν υψηλή ακρίβεια, όπως των επίγειων οργάνων.
- ▶ Η τεχνολογία τους που συνεχώς εξελίσσεται μπορεί να καταστήσει δαπανηρή και χρονοβόρα την αντικατάστασή τους.

Τα μειονεκτήματα των ραντάρ ελαχιστοποιούνται όταν αυτά βαθμονομούνται με τις μετρήσεις βροχόπτωσης του ΔΠ (βλ. υποκεφάλαιο 3.2). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα HydroNET RainWatch (2022), το οποίο παρέχει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο βαθμονομημένα (με μετρήσεις βροχόμετρων) δεδομένα βροχόπτωσης από ραντάρ, τα οποία ισοδυναμούν με δίκτυο βροχόμετρων κάθε ένα χιλιόμετρο.

3.3.6 Ραντάρ καιρού και έγκαιρη προειδοποίηση πλημμυρών

Τα ραντάρ καιρού αποτελούν απαραίτητα εργαλεία των ΣΕΠΠ, εξαιτίας κυρίως της υψηλής χωροχρονικής ανάλυσης των δεδομένων τους. Επιτρέπουν την εφαρμογή υψηλής ανάλυσης κατανεμημένων υδρολογικών μοντέλων και μεθόδων άμεσης πρόγνωσης βροχόπτωσης (now-casting) με χρονικό ορίζοντα από 30 min μέχρι 1 h, μέσω της ανάλυσης της κίνησης των καταιγιδοφόρων νεφών ή ως δεδομένα εισόδου μοντέλων πρόγνωσης καιρού (βλ. υποκεφάλαιο 3.6).

Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζονται δυο στιγμιότυπα μετεωρολογικού ραντάρ κατά την παρακολούθηση ενός καταιγδοφόρου νέφους (Bournas & Baltas, 2021). Ο πυρήνας του νέφους, ο οποίος σημειώνεται με κόκκινο κύκλο, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ανακλαστικότητας. Αριστερά, φαίνεται η θέση του νέφους μια χρονική στιγμή και δεξιά η νέα θέση του μετά από 20 min.



Εικόνα 3.13: Στιγμιότυπα παρακολούθησης καταιγδοφόρου νέφους από μετεωρολογικό ραντάρ (Πηγή: Bournas & Baltas, 2021)

3.4 Μετεωρολογικοί δορυφόροι

3.4.1 Σκοπός

Σε πολλές περιοχές χωρίς επαρκή κάλυψη ραντάρ, τα δορυφορικά δεδομένα είναι το κύριο μέσο για την εκτίμηση της βροχόπτωσης. Οι δορυφόροι παρατηρούν τη Γη, συλλέγουν δεδομένα που είναι κυρίως υπέρυθρες και ορατές εικόνες που αφού επεξεργαστούν μπορούν να παρέχουν συχνές εκτιμήσεις των βροχοπτώσεων σε παγκόσμια κλίμακα.

Επιπλέον, οι μετεωρολογικοί δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους ακόλουθους σκοπούς:

- ▶ Τη διάδοση των δεδομένων παρατήρησης και άλλων προϊόντων που συνδέονται με την μετεωρολογική υπηρεσία που ελέγχει τον δορυφόρο.
- ▶ Την αναμετάδοση δεδομένων από πλατφόρμες συλλογής δεδομένων του επίγειου τμήματος του ΔΠ, όπως από μετρητές βροχόπτωσης και χαρακτηριστικών ροής.

3.4.2 Είδη δορυφόρων και παραγόμενες εικόνες

Οι δορυφόροι διακρίνονται σε δύο είδη με βάση την τροχιά που ακολουθούν:

- ▶ **Δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς.** Οι δορυφόροι αυτοί περιστρέφονται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, όπως η Γη, σε υψόμετρο περίπου 35.786 km πάνω από τον Ισημερινό. Σε αυτό το υψό-

μετρο, μια τροχιά τους διαρκεί 24 ώρες, δηλ. όσο χρονικό διάστημα απαιτεί η Γη για να περιστρέφεται μια φορά γύρω από τον άξονά της, οπότε όταν αυτοί παρατηρούνται από τη Γη φαίνονται σχεδόν ακίνητοι στον ουρανό και γι' αυτό καλούνται «γεωστατικοί». Το σημαντικό πλεονεκτήματα των δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς είναι ότι παρατηρούν συνεχώς το ίδιο μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της Γης και προσφέρουν δεδομένα με υψηλή χρονική ανάλυση. Π.χ. οι δορυφόροι METEOSAT της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος προσφέρουν δεδομένα από 5 μέχρι 15 min, οπότε μπορούν να παρακολουθούν αποτελεσματικά τις σημαντικές καιρικές συνθήκες και τις έντονες καταιγίδες και τυφώνες πρακτικά σε πραγματικό χρόνο. Εξαιτίας του μεγάλου υψόμετρου της τροχιάς τους, η χωρική ανάλυση των δεδομένων που συλλέγουν οι δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς είναι μικρή, της τάξης των 4 km.

- ▶ **Δορυφόροι πολικής/χαμηλής τροχιάς.** Οι δορυφόροι αυτοί περιστρέφονται σε υψόμετρα από 200 μέχρι 1000 km διερχόμενοι από τους πόλους (περίπου). Λαμβάνουν δεδομένα με υψηλή χωρική ανάλυση (από 0.25-1 km ανάλογα το δορυφόρο), τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε Μοντέλα Πρόγνωσης Καιρού και σε έρευνες για το κλίμα. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι παρατηρούν σχετικά μικρές έκτασης περιοχές, τις οποίες δεν μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς.

Ένας μετεωρολογικός δορυφόρος διαθέτει αισθητήρες που «βλέπουν» μια περιοχή της Γης και πραγματοποιούν μετρήσεις της ορατής και μέσης/θερμικής υπέρυθρης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή πέμπεται από αυτή αντίστοιχα, με βάση τις οποίες παράγονται οι ορατές (VIS) ή υπέρυθρες δορυφορικές εικόνες (IR). Κάθε εικόνα αποτελείται από χιλιάδες εικονοστοιχεία, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχίζεται μια απόχρωση του γκρι που αναπαριστά το επίπεδο της έντασης της ακτινοβολίας που αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας του δορυφόρου για το συγκεκριμένο εικονοστοιχείο. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση μεταξύ ενός αντικείμενου (π.χ. νέφους) και του υποβάθρου (π.χ. επιφάνειας της γης), τόσο ευκολότερη είναι η αναγνώριση βασικών δομών στη δορυφορική εικόνα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πολύ καλής αντίθεσης αποτελεί η παρουσία μιας καλά ανεπτυγμένης καταιγίδας πάνω από τη σκοτεινή επιφάνεια του ωκεανού. Αντίστοιχο παράδειγμα περιορισμένης αντίθεσης για την περίπτωση εικόνων στο θερμικό υπέρυθρο είναι η παρουσία ομίχλης πάνω από την επιφάνεια του ωκεανού.

3.4.3 Εκτίμηση βροχόπτωσης με δορυφορικά δεδομένα

Για την εκτίμηση της βροχόπτωσης, οι δορυφόροι εξοπλίζονται με όργανα, τα οποία μετρούν τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης από το διάστημα. Τα όργανα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Ενεργητικοί αισθητήρες.** Εκπέμπουν τη δική τους ακτινοβολία σε συγκεκριμένο μήκος κύματος προς το αντικείμενο παρατήρησης και λαμβάνουν την ανακλώμενη από αυτό ακτινοβολία. Το ραντάρ είναι ένα ενεργητικός αισθητήρας, του οποίου η κεραία εκπέμπει ραδιοκύματα που ανακλώνται από την περιοχή παρακολούθησης και συλλέγονται από το δέκτη του.
- ▶ **Παθητικοί αισθητήρες.** Δέχονται την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το αντικείμενο παρατήρησης που παρατηρείται ή ανακλάται από το αντικείμενο από πηγή διαφορετική από το σύστημα, όπως π.χ. τον Ήλιο.

Το 1997 τέθηκε σε λειτουργία από τη NASA και τη JAXA ο δορυφόρος TRMM μέχρι το 2015, με ερευνητικό στόχο να βελτιώσει την κατανόηση της κατανομής και της μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων στις τροπικές περιοχές, ως μέρος του κύκλου του νερού στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα. Καλύπτοντας τις τροπικές και υποτροπικές περιοχές της Γης, ο TRMM παρείχε τις απαραίτητες πληροφορίες για τις βροχοπτώσεις και τη σχετική έκλυση θερμότητας που βοηθούν στην ενεργοποίηση της παγκόσμιας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας που διαμορφώνει τον καιρό και το κλίμα. Σε συντονισμό με άλλους δο-

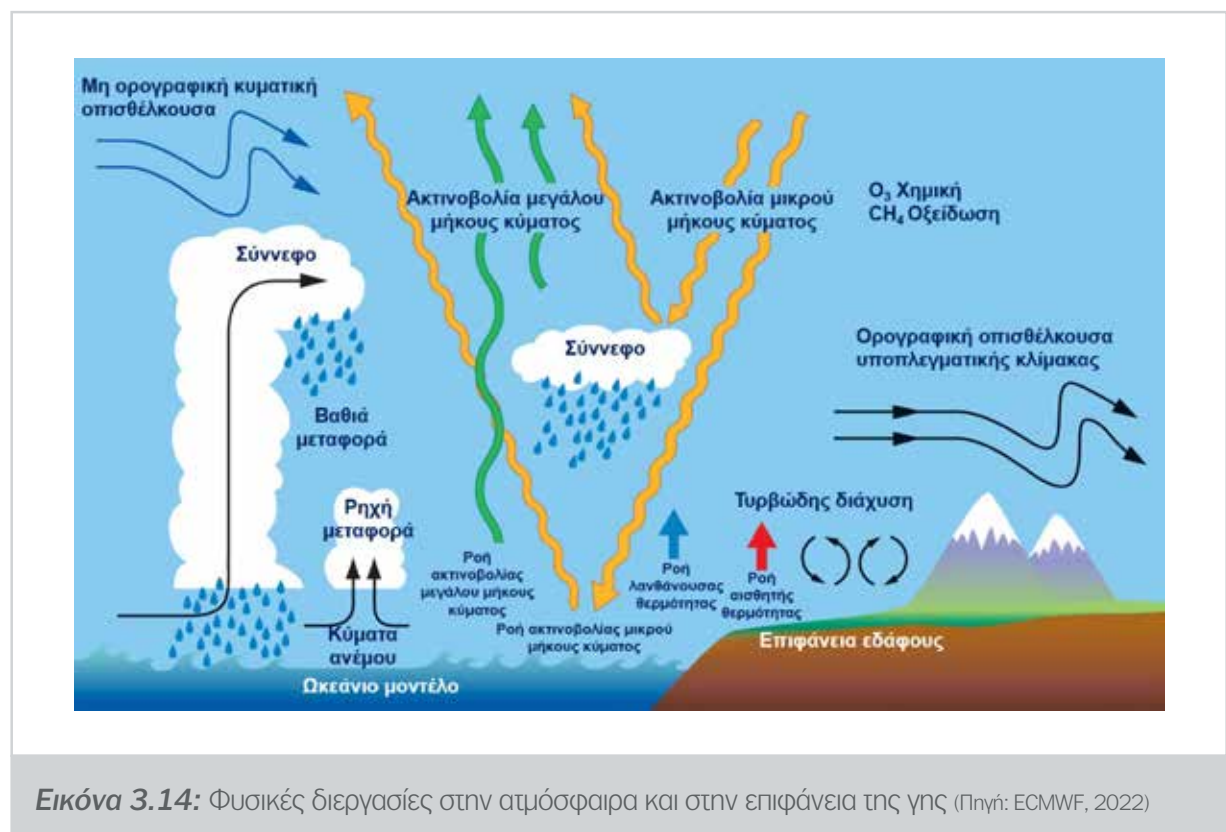
ρυφόρους στο Σύστημα Παρατήρησης της Γης της NASA, ο TRMM παρείχε σημαντικές πληροφορίες για τις βροχοπτώσεις χρησιμοποιώντας διάφορα διαστημικά όργανα για να κατανοήσει καλύτερα τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ υδρατμών, νεφών και βροχοπτώσεων, που είναι βασικές για τη ρύθμιση του κλίματος της Γης. Το 2014 τέθηκε σε λειτουργία από τη NASA και τη JAXA ο δορυφόρος χαμηλής τροχιάς GPM, ο οποίος αποτελεί μια πολύ περισσότερο εξελιγμένη δορυφορική πλατφόρμα για την εκτίμηση της βροχής από το διάστημα, σε σύγκριση με τον TRMM. Αποτελέσματα για την εφαρμογή των δεδομένων του δορυφόρου GPM στον Ελλαδικό χώρο, περιλαμβάνονται στην εργασία των Kazamias et al. (2022).

Εκτίμηση της βροχόπτωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τους δορυφόρους γεωστάσιμης τροχιάς, όπως τον Meteosat. Οι Feidas et al. (2005) εφάρμοσαν τρεις δορυφορικές τεχνικές για την υποστήριξη της πρόγνωσης βροχόπτωσης, ενώ οι Manrakou & Cartalis (2015) ανέλυσαν τη συμβολή των δορυφορικών δεδομένων Meteosat στην έγκαιρη πρόγνωση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου και στη βελτίωση της δυνατότητας nowcasting. Πρόσφατα, οι Karagiannidis et al. (2023) παρουσίασαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του σχετικού αλγορίθμου CRRPh (Convective Rainfall Rate with Microphysical Properties) στον ελλαδικό χώρο καταδεικνύοντας τη χρησιμότητα του για την καταγραφή των βροχοπτώσεων με δορυφορικά δεδομένα του Meteosat σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

3.5 Μοντέλα πρόγνωσης καιρού

3.5.1 Βασικές αρχές των μοντέλων πρόγνωσης καιρού

Η πρόγνωση του καιρού με μαθηματικά μοντέλα (Numerical Weather Prediction, NWP) πραγματοποιείται μέσω της επίλυσης ενός συνόλου μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες συνιστούν το **Μοντέλο Πρόγνωσης Καιρού (ΜΠΚ)**. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν όλες τις δυναμικές και φυσικές διερ-



γασίες στην ατμόσφαιρα, στην επιφάνεια της γης και στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις τους στη χωροχρονική εξέλιξη των μεταβλητών του μοντέλου που κυρίως είναι η πίεση, η θερμοκρασία, ο άνεμος, οι υδρατμοί, τα σύννεφα και η βροχόπτωση.

Πολλές φυσικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα ή στην επιφάνεια της γης, όπως ο σχηματισμός νεφών ή η αλληλεπίδραση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και των σταγονιδίων νεφών (βλ. Εικόνα 3.14) λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρές χωρικές κλίμακες που δεν μπορούν να επιλυθούν από τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Οι επιπτώσεις αυτών των διεργασιών στις μεταβλητές του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη κατά προσέγγιση στα ΜΠΚ μέσω των **σχημάτων παραμετροποίησης**.

3.5.2 Φάσεις και χρονικοί ορίζοντες πρόγνωσης καιρού με μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Η πρόγνωση του καιρού με ΜΠΚ μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε τρεις φάσεις (Schulze, 2007):

- ▶ **Φάση 1.** Συλλογή και ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων για τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών του μοντέλου, όσο το δυνατόν ακριβέστερα, χρησιμοποιώντας τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation).
- ▶ **Φάση 2.** Επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου για τον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης των μεταβλητών του.
- ▶ **Φάση 3.** Μετατροπή των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε πληροφορίες πρακτικής αξίας για τους χρήστες. Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ή μετά από επεξεργασία τους με στατιστικές μεθόδους για την παραγωγή προγνώσεων του καιρού από τις αρμόδιους φορείς.

Ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης, οι προγνώσεις καιρού χαρακτηρίζονται ως:

- ▶ βραχυπρόθεσμες, όταν γίνονται για 1-7 ημέρες,
- ▶ μεσοπρόθεσμες, όταν γίνονται για 1-4 εβδομάδες, και
- ▶ μακροπρόθεσμες, όταν γίνονται για 1-12 μήνες.

3.5.3 Επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων πρόγνωσης καιρού, υπολογιστικά πλέγματα και αρχικές συνθήκες

Η επίλυση των εξισώσεων των ΜΠΚ γίνεται σε υπερυπολογιστές χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους με τις οποίες προσδιορίζεται η χρονική εξέλιξη των μεταβλητών του μοντέλου σε ένα τρισδιάστατο χωρικό πλέγμα που καλύπτει την ατμόσφαιρα από την επιφάνεια μέχρι 30-40 km πάνω από το έδαφος. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των ΜΠΚ είναι η διάσταση του πλέγματος, δηλ. η οριζόντια απόσταση των γειτονικών του σημείων. Όσο μικρότερη είναι αυτή η διάσταση, τόσο πιο λεπτομερείς δομές της ατμόσφαιρας μπορούν να επιλυθούν με το μοντέλο.

Η πρόγνωση του καιρού σε μια περιοχή, όπως π.χ. στην Ελλάδα, εξαρτάται από την αρχική κατάσταση του καιρού σε κάποια περιοχή που βρίσκεται σε αρκετά μακρινή απόσταση. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρονικός ορίζοντα πρόγνωσης, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η απόσταση αυτή. Έτσι, για πρόγνωση για περισσότερες από 4 μέχρι 5 ημέρες χρειάζονται ΜΠΚ που λαμβάνουν υπόψη την παγκόσμια αρχική κατάσταση του καιρού.

3.5.4 Παγκόσμια και περιοχικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Οι γενικοί τύποι των ΜΠΚ είναι δυο, τα παγκόσμια και τα περιοχικά μοντέλα.

- ▶ Τα παγκόσμια μοντέλα παράγουν προγνωστικά αποτελέσματα για ολόκληρη την υδρόγειο από 2-3 ημέρες μέχρι 16 ημέρες. Επειδή, αυτά τα μοντέλα καλύπτουν πολύ μεγάλη περιοχή για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, έχουν μικρή χωρική ανάλυση (μεγάλες τυπικές διαστάσεις πλέγματος) και εφαρμόζουν μεγάλα χρονικά βήματα. Σε περιοχές όπου δημιουργούνται έντονα τοπικά καιρικά φαινόμενα, π.χ. εξαιτίας της παρουσίας βουνών, ακτών, λιμνών, αστικών περιοχών και νησιών, τα παγκόσμια μοντέλα δεν είναι ικανά να προσομοιώνουν την τοπική συμπεριφορά του καιρού και πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Σε περιοχές χωρίς τοπικά καιρικά φαινόμενα, όπως σε ωκεανούς, τα παγκόσμια μοντέλα έχουν καλή απόδοση.
- ▶ Τα περιοχικά μοντέλα έχουν πολύ υψηλότερες χωρικές αναλύσεις, αλλά καλύπτουν μόνο μια περιοχή του πλανήτη και παρέχουν αποτελεσματικές βραχυπρόθεσμες προγνώσεις, συνήθως για 3 έως 6 ημέρες. Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι ότι η υψηλότερη ανάλυσή τους επιτρέπει να αναπαριστούν χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να αντιληφθούν τα παγκόσμια μοντέλα, όπως π.χ. είναι οι καταιγίδες, λόγω μεταξύ άλλων της ακριβέστερης αναπαράστασης της τοπογραφίας και της κατανομής ξηράς-θάλασσας.

3.5.5 Ευρέως εφαρμοζόμενα μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Πολλές εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες διαθέτουν υπερυπολογιστές που πραγματοποιούν υπολογισμούς με ΜΠΚ. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους, όπως π.χ. στις εξισώσεις των φυσικών διεργασιών που διαμορφώνουν τα καιρικά μοτίβα, στη χωρική τους ανάλυση και στους χρησιμοποιούμενους συνδυασμούς αρχικών πηγών δεδομένων. Γενικά, αυτές οι διαφορές μπορεί να επιφέρουν μικρές αποκλίσεις στις πρώτες προγνωστικές ώρες, ωστόσο αυτές πολλαπλασιάζονται μέσα στον προγνωστικό ορίζοντα, επειδή η ατμόσφαιρα είναι ένα χαστικό σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι ενδεχόμενα βραχυπρόθεσμα σφάλματα των μοντέλων αυξάνονται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου προσομοίωσης και για αυτό η πρόγνωση του καιρού για μια εβδομάδα από σήμερα είναι πολύ λιγότερο ακριβής από την αυριανή πρόγνωση. Για να περιοριστεί η επιρροή αυτή του χάους, τα μεγάλα μετεωρολογικά κέντρα πραγματοποιούν πολλαπλές προσομοιώσεις (ensembles), χρησιμοποιώντας μικρές διαταραχές στις αρχικές συνθήκες της κάθε προσομοίωσης. Αυτή η διαδικασία συνεισφέρει στον περιορισμό της αβεβαιότητας των προγνώσεων.

Σήμερα, οι πόροι που απαιτούνται για την ανάπτυξη πολύπλοκων ΜΠΚ υπερβαίνουν το ανθρώπινο και οικονομικό δυναμικό, ακόμη και των μεγαλύτερων εθνικών μετεωρολογικών υπηρεσιών. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί συνεργασίες μεταξύ διάφορων ινστιτούτων και ερευνητικών κέντρων. Στον τομέα των περιοχικών μοντέλων υπάρχει στενή συνεργασία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) στην κοινοπραξία COSMO (2022) με τις εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες της Γερμανίας, της Ιταλίας, της Πολωνίας, της Ρουμανίας, της Ρωσίας και της Ελβετίας.

Τα δύο περισσότερο γνωστά παγκόσμια ΜΠΚ που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Το **Ολοκληρωμένο Σύστημα Πρόγνωσης IFS** (Integrated Forecast System, 2018), το οποίο συχνά καλείται ECMWF από το όνομα του υπευθύνου φορέα που είναι το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμης Πρόγνωσης Καιρού (ECMWF). Τα δεδομένα του δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμα και δίνονται μόνο μετά από έγκριση από τις εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες. Το μοντέλο αυτό συχνά καλείται και «ευρωπαϊκό μοντέλο».
- ▶ Το **Σύστημα Παγκόσμιων Προγνώσεων GFS** (Global Forecast System, 2022) των Εθνικών

Κέντρων Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης των ΗΠΑ (NCEP). Τα δεδομένα του είναι πλήρως ελεύθερα για οποιαδήποτε χρήση. Το μοντέλο αυτό συχνά καλείται «αμερικάνικο μοντέλο».

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα κύρια περιοχικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που εφαρμόζονται στην Ελλάδα με τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3.2

Κύρια περιοχικά ΜΠΚ που εφαρμόζονται στην Ελλάδα			
Μοντέλο (Φορέας)	Βιβλιογραφική πηγή	Χωρική Ανάλυση (km)	Οριακές συνθήκες (h)
Bolam, Moloch και WRF (ΕΑΑ)	Lagouvardos et al. (2010) Giannaros et al. (2017)	6 (Ευρώπη) 2 (Ελλάδα)	GFS (3h)
COSMO (ΕΜΥ)	ΕΜΥ (2022)	7	IFS 3h COSMO.GR 1h
SKIRON/ETA (ΕΜΥ-ΕΚΠΑ)	Kallos (1997)	~6-7	GFS 3h
ΠΟΣΕΙΔΩΝ (ΕΛΚΕΘΕ)	Papadopoulos et al. (2002, 2009)	5 (Ευρώπη)	GFS 3h
Αίολος (WRF-ARW)		9 (Ελλάδα) 3 (Αττική)	

3.5.6 Το μοντέλο πρόγνωσης καιρού IFS

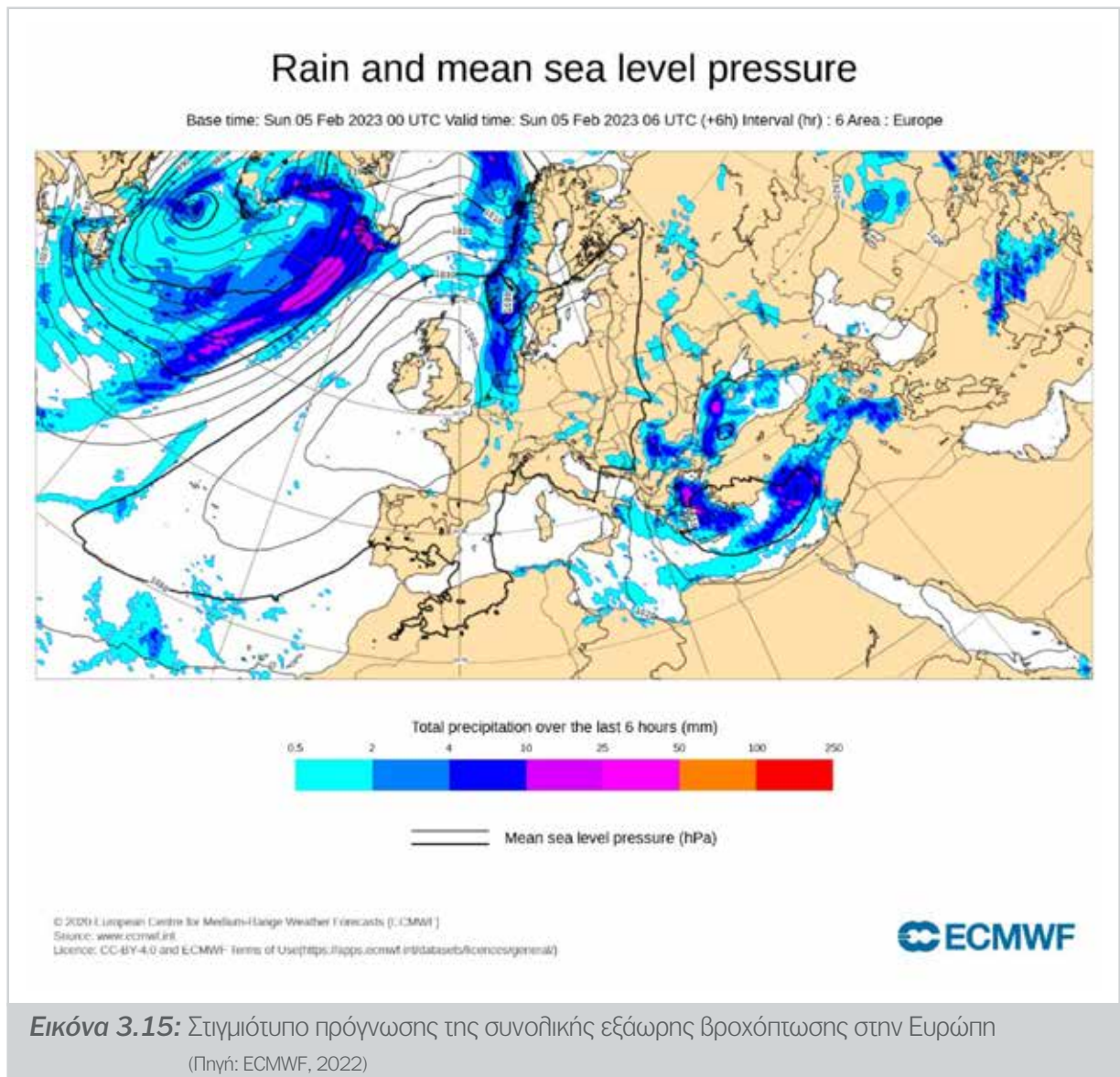
Το ECMWF είναι ένας ανεξάρτητος διακυβερνητικός οργανισμός, που υποστηρίζεται από 34 κράτη μέλη και 12 συνεργαζόμενα κράτη, αθλή και ερευνητικό ινστιτούτο. Παράγει παγκόσμιες προγνώσεις καιρού και άλλα δεδομένα για τα κράτη-μέλη, τα συνεργαζόμενα κράτη-μέλη και την ευρύτερη κοινότητα. Διαθέτει μία από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις υπερυπολογιστών και αρχεία μετεωρολογικών δεδομένων στον κόσμο και διαχειρίζεται τις Υπηρεσίες Παρακολούθησης Ατμόσφαιρας και Κλιματικής Αλλαγής του Προγράμματος COPERNICUS (2022) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το ECMWF επιδιώκει επιστημονικές και τεχνικές συνεργασίες με δορυφορικούς οργανισμούς, την ευρωπαϊκή μετεωρολογική κοινότητα και τις παγκόσμιες κοινότητες πρόγνωσης του καιρού, καθώς και την παροχή υπηρεσιών για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Οι κύριοι στόχοι του είναι οι ακόλουθοι:

- ▶ Η ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για μεσοπρόθεσμη πρόγνωση.
- ▶ Η προετοιμασία, σε τακτική βάση, προγνώσεων καιρού μεσαίου εύρους για διανομή στις μετεωρολογικές υπηρεσίες.
- ▶ Η επιστημονική και τεχνολογική έρευνα με στόχο τη βελτίωση των προγνώσεων.
- ▶ Η συλλογή και αποθήκευση μετεωρολογικών δεδομένων.

Τα κράτη-μέλη, στα οποία περιλαμβάνεται η Ελλάδα, και τα συνεργαζόμενα κράτη:

- ▶ λαμβάνουν τα δεδομένα αριθμητικών προγνώσεων του IFS σε πραγματικό χρόνο για να προετοιμάσουν τις προγνώσεις για τους τελικούς χρήστες τους, και
- ▶ έχουν πρόσβαση στις βασικές υπολογιστικές εγκαταστάσεις και το μετεωρολογικό αρχείο του ECMWF.

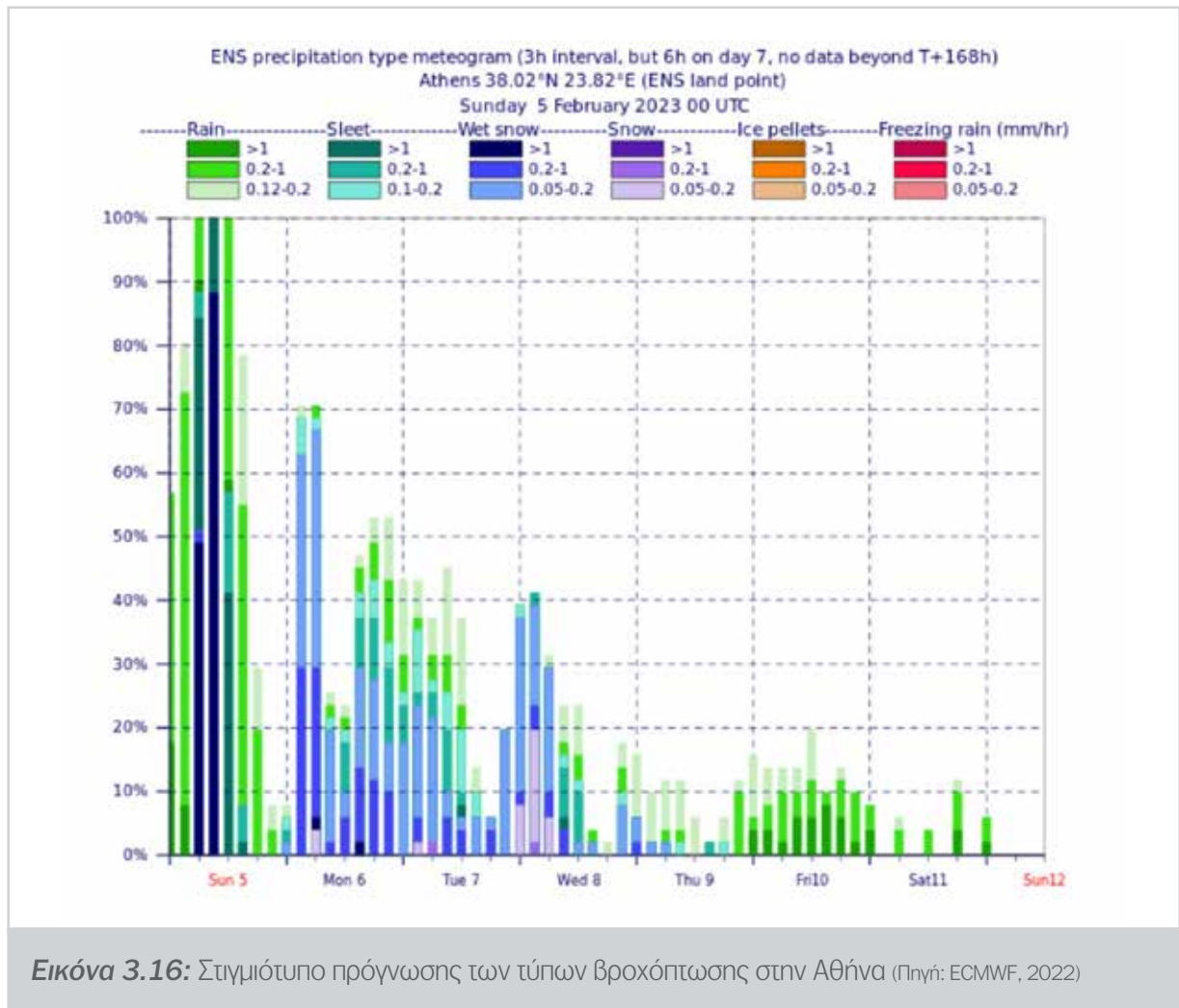
Επίσης, τα κράτη μέλη έχουν πρόσβαση στους υπερυπολογιστές και στα δεδομένα που είναι μόνιμα αποθηκευμένα.



Η χωρική ανάλυση του IFS είναι 9 km και η συχνότητα ανανέωσης, δηλ. πόσο συχνά πραγματοποιείται η πρόγνωση, είναι 2 φορές/ημέρα. Στην Εικόνα 3.15 φαίνεται η πρόγνωση της συνολικής εξάωρης βροχόπτωσης στην Ευρώπη (Area: Europe). Στην Εικόνα 3.16 φαίνεται το αντίστοιχο μετεόγραμμα στην Αθήνα για 1 εβδομάδα, το οποίο περιλαμβάνει όλους τους τύπους βροχόπτωσης, όπως βροχή, χιόνι κ.λπ. (σε mm) που πέφτουν σε περιόδους 6 ωρών ή 12 ωρών χρησιμοποιώντας κατάλληλη χρωματική ένδειξη (κατά προσέγγιση, 1 mm βροχόπτωσης ισοδυναμεί με 1 cm χιονόπτωσης).

Στην Εικόνα 3.15 διακρίνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Ο χρόνος βάσης (base time) αναφέρεται στον κύκλο που βασίζεται η πρόγνωση, δηλ. στην ώρα που ξεκίνησε η προσομοίωση, οι συνθήκες της οποίας χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές: Κυριακή 05 Φεβρουαρίου 2023 00 UTC.
- ▶ Ο χρόνος ισχύος (valid time) αναφέρεται στην ώρα που είναι έγκυρη η πρόγνωση: Κυριακή 05 Φεβρουαρίου 2023 06 UTC, δηλ. +6 ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης.



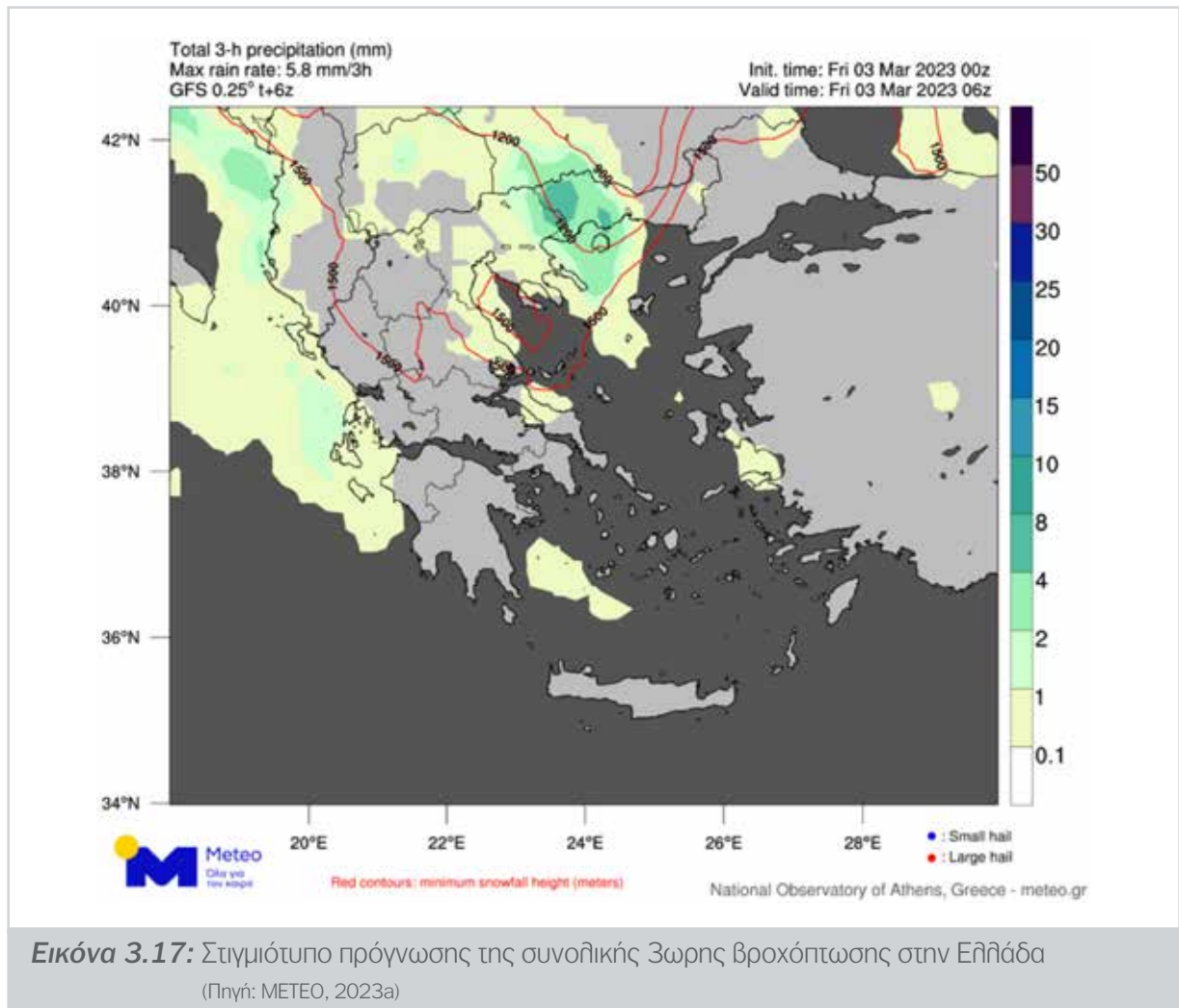
3.5.7 Το μοντέλο πρόγνωσης καιρού GFS

Το GFS είναι το πιο γνωστό παγκόσμιο ΜΠΚ. Παράγεται από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης (NCEP) της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των Ηνωμένων Πολιτειών (NOAA). Η συχνότητα ανανέωσης πρόγνωσης του GFS είναι 4 φορές/ημέρα. Αποτελείται από τέσσερα μοντέλα που συνεργάζονται για να παράγουν μια ακριβή εικόνα των καιρικών συνθηκών: (1) ατμόσφαιρας, (2) ωκεανού, (3) ξηράς/εδάφους και (4) θαλάσσιου πάγου.

Το GFS έχει τα ακόλουθα κύρια χαρακτηριστικά:

- ▶ Χωρική ανάλυση: 28 km.
- ▶ Χρόνος πρόγνωσης (έκδοσης αποτελεσμάτων): 16 ημέρες.
- ▶ Διαθεσιμότητα των προγνωστικών προϊόντων: Κυμαίνεται από 1 ώρα για τις πρώτες 5 ημέρες μέχρι 3 ώρες για τις ημέρες 5-16.
- ▶ Συχνότητα επικαιροποίησης της πρόγνωσης: 4 φορές/ημέρα.

Στην Εικόνα 3.17 φαίνεται η πρόγνωση της συνολικής 3ωρης βροχόπτωσης στην Ελλάδα με το μοντέλο GFS (METEO, 2023a).



3.6 Σχεδιασμός δικτύου παρακολούθησης υδρομετεωρολογικών παραμέτρων

Για τον σχεδιασμό ενός ΔΠ πραγματοποιούνται στην περιοχή εφαρμογής τα ακόλουθα:

- ▶ **Βήμα 1.** Προσδιορίζονται και αξιοποιούνται οι υφιστάμενες υποδομές δικτύων ή/και μεμονωμένων σταθμών παρακολούθησης.

Αναλυτικότερα:

- (α) εξετάζονται οι δυνατότητες πρόγνωσης της βροχόπτωσης με ΜΠΚ και δίκτυα ραντάρ ή/και δορυφόρους,
- (β) εντοπίζονται οι υδρομετεωρολογικοί και υδρομετρικοί σταθμοί υφιστάμενων δικτύων, και
- (γ) αξιοποιούνται τα (α) και (β) εντάσσοντας τα στο ΔΠ που σχεδιάζεται, εφόσον αυτό είναι εφικτό.

- ▶ **Βήμα 2.** Προσδιορίζονται βέλτιστα ο αριθμός και οι θέσεις των απαιτούμενων υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών, ώστε να υποστηρίζεται επιχειρησιακά πλήρως το ΣΕΠΠ.
- ▶ **Βήμα 3.** Προσδιορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετρητών και των απαιτήσεων συλλογής και μετάδοσης των μετρήσεων στο ΚΠΠ.

3.6.1 Αξιοποίηση υφιστάμενων δικτύων παρακολούθησης

Είναι ιδιαίτερα σημαντική η αξιοποίηση των υφιστάμενων δικτύων μετρήσεων και υποδομών για τη βαθμολόγηση των ΜΠΠ (βλ. κεφάλαιο 4), με τη χρησιμοποίηση ιστορικών χρονοσειρών δεδομένων προηγούμενων γεγονότων βροχοπτώσεων και πλημμυρών. Αν δεν υπάρχουν αυτά τα δεδομένα, θα πρέπει να παραχθούν. Για αυτό, ενδεχομένως να χρειαστούν αρκετά έτη, ώστε να συγκεντρωθούν αρκετά δεδομένα για τη βαθμολόγηση και την επιβεβαίωση των ΜΠΠ, ώστε αυτά να είναι αξιόπιστα.

Συχνά, υπάρχουν ανεξάρτητα δίκτυα, τα οποία αναπτύσσονται στην περιοχή εφαρμογής για τη δημιουργία μιας ροής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για διάφορες εφαρμογές. Η διαχείριση των δικτύων αυτών πραγματοποιείται από διάφορους φορείς. Είναι πολύ σημαντικό να συνάπτονται συμφωνίες μεταξύ αυτών των φορέων για την κοινή χρήση των δεδομένων με στόχο τη δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου, ώστε οι φορείς να επωφεληθούν από τα αρχεία και τις υποδομές που είναι διαθέσιμες στα επιμέρους δίκτυα.

Για να μεγιστοποιηθεί η χρησιμότητα των διαθέσιμων δικτύων και των λοιπών υποδομών, πρέπει να συντάσσονται κατάλληλα πρωτόκολλα που αντιμετωπίζουν θεσμικά θέματα, κυρίως όσον αφορά τα ιδιωτικά δεδομένα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει διαπραγματεύσεις σχετικά με την πρόσβαση δεδομένων, την ιδιοκτησία και τη συντήρηση, καθώς και την ανάπτυξη διαδικασιών για τη διασφάλιση της έγκαιρης παράδοσης αξιόπιστων δεδομένων μετρητών στο ΚΠΠ, βλ. κεφάλαιο 6.

3.6.2 Βέλτιστη χωροθέτηση μετρητικών σταθμών

Εισαγωγή

Η εγκατάσταση ενός οργάνου σημειακής μέτρησης, έστω ενός απλού βροχόμετρου, είναι πρακτικά μια εγκατάσταση ενός μετρητικού σταθμού. Οι επιλογές των οργάνων των σταθμών, της πυκνότητας τους σε ευρύτερες περιοχές και των θέσεων εγκατάστασής τους, αποτελούν αντικείμενο ειδικής μελέτης και εξαρτώνται κυρίως από γεωμορφολογικούς και κλιματικούς παράγοντες, και από τη χρήση των βροχομετρικών δεδομένων. Γι' αυτό και δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες για την πυκνότητα των σταθμών και το είδος των οργάνων κάθε σταθμού. Γενικά, όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο, τόσο αντιπροσωπευτικότερο είναι για την επιφανειακή βροχόπτωση. Ανομοιομορφίες, όσον αφορά στη γεωμορφολογία απαιτούν πυκνότερο δίκτυο. Επιπλέον παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και η ευκολία πρόσβασης του παρατηρητή.

Σε γενικές γραμμές, τα σφάλματα εκτίμησης της επιφανειακής βροχής αυξάνονται με την ένταση του φαινομένου και μειώνονται με την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου, τη διάρκεια της βροχής και το μέγεθος της επιφάνειας της λεκάνης απορροής. Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σε επίπεδο επεισοδίου βροχής, από ότι σε επίπεδο μήνα, εποχής ή έτους και κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Για την περιγραφή της επιφανειακής βροχόπτωσης το καλοκαίρι απαιτείται 2-3 φορές πυκνότερο δίκτυο από ότι το χειμώνα (Singh, 1992). Η επάρκεια ή μη ενός δικτύου βροχογράφων προσδιορίζεται στατιστικά. Ο βέλτιστος αριθμός βροχογράφων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ποσοστό λάθους στην εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης είναι ίσος με:

$$N=(C_u/\varepsilon)^2 \quad (3.3)$$

όπου N είναι ο βέλτιστος αριθμός των βροχογράφων, C_u είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας της βροχής στις θέσεις σημειακής μέτρησης, και ε είναι το επιθυμητό ποσοστό λάθους. Η τυπική τιμή του ε είναι ίση με 10%. Εάν η τιμή αυτή μειωθεί, απαιτούνται περισσότεροι βροχογράφοι. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι

όταν υπάρχουν m βροχογράφοι σε μια λεκάνη απορροής και $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ είναι τα ύψη βροχής για συγκεκριμένο χρονικό βήμα, τότε ο συντελεστής C_u είναι ίσος με:

$$C_u = 100S/P \tag{3.4}$$

όπου P είναι η μέση τιμή της βροχόπτωσης που κατέγραψαν οι βροχογράφοι και S είναι η τυπική απόκλιση που υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \tag{3.5}$$

$$S = \left[\sum_{i=1}^m \frac{x_i - \bar{x}}{m-1} \right]^{0.5} \tag{3.6}$$

Στη χωροθέτηση των μετρητών, χρησιμοποιούνται οι συστάσεις και οδηγίες του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO 1972, 1983, 2003, 2010, 2008a, 2008b και 2010). Ο WMO (2010) προτείνει τα ακόλουθα για την πυκνότητα του δικτύου σε σχέση με τις γενικότερες υδρομετεωρολογικές συνθήκες:

- ▶ Ένα βροχογράφο ανά 600-900 km² σε επίπεδες περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες.
- ▶ Ένα βροχογράφο ανά 100-250 km² σε ορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες.
- ▶ Ένα βροχογράφο ανά 25 km² σε ημιορεινές περιοχές με έντονη διαφοροποίηση στη βροχή.
- ▶ Ένα βροχογράφο ανά 1500-10000 km² σε ξηρές και πολικές ζώνες.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η πυκνότητα των σταθμών βροχομετρικών παρατηρήσεων σε σχέση με την έκταση αγροτικών λεκανών απορροής (WMO, 2008a). Ο αριθμός και ο τύπος των οργάνων που πρέπει να εγκατασταθούν σε μια λεκάνη απορροής εξαρτάται από οικονομικούς, κλιματικούς, τοπογραφικούς παράγοντες (π.χ. δυνατότητα πρόσβασης) και τη μέθοδο ανάλυσης των παρατηρήσεων. Η πυκνότητα του δικτύου μιας λεκάνης απορροής καθορίζεται κυρίως από το βαθμό ανομοιομορφίας των κατακρημνισμάτων και το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει.

Πίνακας 3.4

Πυκνότητα σταθμών βροχομετρικών παρατηρήσεων ανάλογα με την έκταση αγροτικών λεκανών απορροής (Πηγή: WMO, 2008a)		
Έκταση υδρολογικής λεκάνης (στρέμματα)	Αναλογία km² / σταθμό	Ελάχιστος αριθμός σταθμών
0 – 120	0.13	1
120 – 400	0.20	2
400 – 800	0.25	3
800 – 2000	0.40	1 ανά 0.4 km ²
2000 – 10000	1.00	1 ανά 1.0 km ²
10000 – 20000	2.50	1 ανά 2.5 km ²
> 20000	7.50	1 ανά 7.5 km ²

Κριτήρια χωροθέτησης υδρομετεωρολογικών σταθμών

Ο WMO (2008b, 2010) έχει διερευνήσει διεξοδικά την ανάπτυξη και τη διάδοση της τεχνολογίας σχεδιασμού δικτύων υδρομετεωρολογικών σταθμών. Στο παρελθόν, η επιλογή των θέσεων χωροθέτησης βασιζόταν σχεδόν αποκλειστικά σε οικονομικά και τεχνικά κριτήρια, ενώ σήμερα πρέπει επίσης να ικανοποιούνται ορισμένες κοινωνικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Έτσι, η διαδικασία χωροθέτησης ενός σταθμού αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων που περιλαμβάνει πολλές ομάδες παραγόντων (Feloni et al., 2018). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές σχεδιασμού ενός βέλτιστου δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών για διαφορετικούς σκοπούς, από πολλούς ερευνητές όπως τους Hong et al. (2016), Barca et al. (2008), Shepherd et al. (2004), Sestak (1988), Fujioka (1986) κ.ά.

Για τη βέλτιστη χωροθέτηση ενός δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών μπορεί να ληφθούν υπόψη τα κριτήρια που περιγράφονται στη συνέχεια.

- ▶ **K1. Υψόμετρο.** Η πυκνότητα των σταθμών ενός δικτύου εξαρτάται από την υψομετρική κατηγοριοποίηση της γήινης επιφάνειας. Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων SOTER (Dobos et al., 2005) του Προγράμματος Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) διακρίνονται πέντε ζώνες υψομέτρων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 με την συνιστώμενη πυκνότητα ενός δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών σε κάθε ζώνη.

Πίνακας 3.5

Ζώνες υψομέτρων και συνιστώμενη έκταση υδρομετεωρολογικών σταθμών (Baltas & Mimikou, 2009)		
Ζώνη	Ζώνες υψομέτρων (m)	Πυκνότητα σταθμού
A	0-200	1 σταθμός ανά 600 km ²
B	200-500	1 σταθμός ανά 100 km ²
Γ	500-800	1 σταθμός ανά 75 km ²
Δ	800-1200	1 σταθμός ανά 50 km ²
E	1200-1900	1 σταθμός ανά 50 km ²

- ▶ **K2. Ήπιες κλίσεις εδάφους.** Η εγκατάσταση υδρομετεωρολογικών σταθμών συνιστάται σε έδαφος με κλίση μικρότερη από 5%. Οι προδιαγραφές της SOTER για την ταξινόμηση του ανάγλυφου του εδάφους με βάση την κλίση του, χαρακτηρίζουν τις περιοχές με κλίση μέχρι και 2% ως επίπεδες και τις περιοχές με κλίση 2 - 5% ως περιοχές με ομαλά κυματιστούς λόφους.
- ▶ **K3. Είδη κάλυψης γης.** Συνιστάται οι σταθμοί να τοποθετούνται σε περιοχές που καλύπτουν όλα τα είδη κάλυψης γης, ύστερα από ομαδοποίησή τους στις ακόλουθες 4 κατηγορίες ειδών επιφάνειας κάλυψης: (1) τεχνητές επιφάνειες, (2) αγροτικές περιοχές, (3) δάση και ημι-φυσικές περιοχές, και (4) υδάτινες επιφάνειες - συλλογές υδάτων.
- ▶ **K4. Εγγύτητα σε οικισμούς.** Η εγκατάσταση υδρομετεωρολογικών σταθμών προτείνεται να γίνεται κοντά σε οικισμούς, όπως π.χ. να απέχουν μέχρι 1 km από τους μεγάλους οικισμούς και 500 m από τους μικρούς οικισμούς, για να είναι εύκολη η πρόσβαση των υπευθύνων για τις μετρήσεις και την επίβλεψη/προστασία των οργάνων.
- ▶ **K5. Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο.** Η εγγύτητα των σταθμών στο οδικό δίκτυο θεωρείται απαραίτητη για λόγους πρόσβασης. Έτσι, συνιστάται οι προτεινόμενες θέσεις να απέχουν απόσταση μέχρι 200 m από το οδικό δίκτυο.

- ▶ **K6. Εγγύτητα σε σημεία υδροληψίας.** Η τοποθέτηση σταθμών συνιστάται εκεί όπου εμφανίζονται συστάδες γεωτρήσεων, εξαιτίας της οικονομικής σημασίας των γεωτρήσεων για τη γεωργία και για την ύδρευση των οικισμών. Έτσι, επιλέγονται ως προτεινόμενες θέσεις, αυτές που απέχουν απόσταση μέχρι 500 m από τα επίσημα σημεία υδροληψίας που είναι καταχωρημένα στο Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας (ΕΜΣΥ, 2022).
- ▶ **K7. Διοικητικά κριτήρια.** Η εγκατάσταση υδρομετεωρολογικών σταθμών συνιστάται να γίνεται εντός των διοικητικών ορίων του ενδιαφερόμενου φορέα, π.χ. δήμου, για το διοικητικό και λειτουργικό έλεγχό τους
- ▶ **K8. Γεωμετρικά κριτήρια.** Για την καλύτερη κάλυψη κάθε υψομετρικής ζώνης του Πίνακα 3.5 είναι επιθυμητό οι σταθμοί να καλύπτουν ομοιόμορφα κάθε ζώνη και να ισαπέχουν. Έτσι, επιτυγχάνονται (α) η υψομετρική αντιπροσώπευση της έκτασης εντός κάθε ζώνης, και (β) η ισοκατανομή των σταθμών οριζοντιογραφικά. Το πρώτο έχει ως αποτέλεσμα την τοποθέτηση σταθμών ακόμη και σε μεγάλα υψόμετρα, οπότε το φαινόμενο της κατακρήμνισης παρατηρείται αποτελεσματικότερα, ενώ το δεύτερο βοηθά στο διοικητικό και λειτουργικό έλεγχο του δικτύου.

Κριτήρια χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών

Οι κατάλληλες θέσεις που εγκαθίσταται ένας υδρομετρικός σταθμός πρέπει να ικανοποιούν τα κριτήρια του ISO 1100-1 (WMO, 2010), τα οποία συνοψίζονται ως εξής (Hong et al., 2016):

- ▶ Το υδατόρεμα πρέπει να έχει ευθεία πορεία για μια απόσταση ίση με περίπου 10 φορές το πλάτος της ροής, ανάντη και κατόντη της θέσης μέτρησης.
- ▶ Το σύνολο της ροής για όλες τις παροχές και τις αντίστοιχες στάθμες επιφάνειας ροής πρέπει να περιορίζεται σε ένα αγωγό (κανάλι) χωρίς παρακάμψεις ή επικοινωνία με τα υπόγεια νερά.
- ▶ Η κοίτη του υδατορέματος δεν πρέπει να υπόκειται σε διάβρωση ή απόθεση φερτών και να είναι σχετικά απαλλαγμένη από υδρόβια βλάστηση.
- ▶ Οι όχθες του υδατορέματος πρέπει να είναι σταθερές, αρκετά υψηλές και καθαρές από θάμνους, κληδιά κοκ., ώστε η πλημμύρα να περιορίζεται εντός αυτών.
- ▶ Ο έλεγχος της ροής στο υδατόρεμα πρέπει να γίνεται με φυσικό τρόπο, όπως π.χ. πάνω από μια προεξοχή βράχου για χαμηλές παροχές ή σε μια στένωση της ροής σε υψηλές παροχές. Όταν ο έλεγχος της ροής δεν μπορεί να γίνει με φυσικό τρόπο, τότε μπορεί να κατασκευαστεί ένα μικρό τεχνικό έργο, όπως π.χ. ένας υπερχειλιστής.
- ▶ Η στάθμη της επιφάνειας ροής πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη στις μεταβολές της παροχής, ώστε να μεταβάλλεται αισθητά ακόμα και για μικρές μεταβολές της παροχής.
- ▶ Ανάντη της θέσης του σταθμού πρέπει να εξασφαλίζεται μια ελάχιστη στάθμη της επιφάνειας ροής, ακόμα και σε πολύ μικρές παροχές.
- ▶ Η θέση μέτρησης πρέπει να βρίσκεται αρκετά μακριά από συμβολές άλλων υδατορεμάτων, ώστε να αποφεύγεται η επίδρασή τους.
- ▶ Η θέση μέτρησης πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμη, προκειμένου να είναι εφικτή η εγκατάσταση και η λειτουργία του μετρητή.
- ▶ Η θέση μέτρησης πρέπει να είναι κοντά σε κατάλληλο δίκτυο τηλεμετρίας.

Στον Πίνακα 3.6 φαίνεται η πυκνότητα δικτύων υδρομετρικών σταθμών σύμφωνα με τον WMO (2010) ανάλογα με τον τύπο της περιοχής.

Πίνακας 3.6

Πυκνότητα του δικτύου υδρομετρικών σταθμών	
Τύπος περιοχής	Πυκνότητα
Παραλιακός	1 σταθμός ανά 2750 km ²
Ορεινός	1 σταθμός ανά 1000 km ²
Λοφώδης	1 σταθμός ανά 1875 km ²
Πεδιάδες	1 σταθμός ανά 1875 km ²
Μικρά νησιά (έκταση < 500 km ²)	1 σταθμός ανά 300 km ²
Ποιτικός, ξηρός	1 σταθμός ανά 20000 km ²

Για τη βέλτιστη χωροθέτηση ενός δικτύου υδρομετρικών σταθμών μπορεί να ληφθούν υπόψη τα κριτήρια που περιγράφονται στη συνέχεια.

- ▶ **K1. Εδάφη με ήπιες κλίσεις.** Σύμφωνα με τον WMO, οι υδρομετρικοί σταθμοί είναι προτιμότερο να τοποθετούνται σε εδάφη με ήπιες κλίσεις.
- ▶ **K2. Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο.** Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών κοντά σε οδικό δίκτυο θεωρείται απαραίτητη για λόγους πρόσβασης στη θέση μέτρησης.
- ▶ **K4. Μακριά από συμβολές ρεμάτων.** Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών μακριά από τις συμβολές είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποφυγή επηρεασμού από άλλα υδατορέματα.
- ▶ **K4. Εγγύτητα σε οικισμούς.** Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών κοντά και ανάντη των οικισμών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμυρικών επεισοδίων, αλλά και για διευκόλυνση της πρόσβασης στη θέση μέτρησης.
- ▶ **K5. Ανάντη περιοχών που πλημμυρίζουν.** Η εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών ανάντη των ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχές δίνει τη δυνατότητα το δίκτυο να λειτουργήσει και επιχειρησιακά, στο πλαίσιο του ΣΕΠΠ.

Επιπλέον, οι υδρομετρικοί σταθμοί που λειτουργούν για τη μέτρηση της στάθμης ή/και την καταγραφή της ταχύτητας ροής σε συγκεκριμένη διατομή είναι επιθυμητό, για τεχνικούς λόγους, να τοποθετούνται σε γέφυρες.

Μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης μετρητικών σταθμών

Στη προτεινόμενη μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης μετρητών εφαρμόζονται τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια σε περιβάλλον GIS αφού πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της περιοχής εφαρμογής και του σκοπού του ΔΠ. Τα βήματα της μεθοδολογίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- ▶ **Βήμα 1. Καθορισμός του αριθμού των μετρητικών σταθμών.** Για τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς χρησιμοποιείται ο Πίνακας 3.5 και για τους υδρομετρικούς ο Πίνακας 3.6

- ▶ **Βήμα 2. Επιλογή των κριτηρίων βέλτιστης χωροθέτησης στην περιοχή εφαρμογής.** Για τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς, συχνά επιλέγονται και τα οκτώ κριτήρια που περιγράφονται παραπάνω, και θεωρούνται ως κύρια τα Κ2, Κ4, Κ5 και Κ6, δηλ. αυτά που αφορούν γεωμορφολογικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Για τους υδρομετρικούς σταθμούς, συχνά επιλέγονται και τα πέντε κριτήρια
- ▶ **Βήμα 3.** Τυποποίηση/ταξινόμηση κριτηρίων σε περιβάλλον GIS. Τυποποιούνται τα κριτήρια σε ένα κοινό αριθμητικό εύρος (από 0 έως 1) ή ταξινομούνται σε κλάσεις ώστε να μπορούν στη συνέχεια να συνδυαστούν μεταξύ τους.

Για την τυποποίηση εφαρμόζονται οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$X_i = \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.7)$$

ή

$$X_i = 1 - \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.8)$$

όπου FV_i είναι η πρωτογενής τιμή του κριτηρίου i , FV_{min} , FV_{max} είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του κριτηρίου i , αντίστοιχα, και SR είναι το τυποποιημένο φάσμα με τιμές από 0 έως 1. Η εξίσωση (3.7) χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό των τιμών των κριτηρίων που εμφανίζουν τη βέλτιστη τιμή τους στη μέγιστη τιμή του κανονικοποιημένου εύρους. Η εξίσωση (3.8) χρησιμοποιείται σε κριτήρια, στα οποία εμφανίζουν τη βέλτιστη τιμή τους στην ελάχιστη τιμή, όπως συμβαίνει στο κριτήριο Κ1, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως κριτήριο για τη χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών. Όσον αφορά το περιβάλλον του GIS, εφαρμόζεται η διαδικασία της τυποποίησης ξεχωριστά για κάθε κριτήριο μέσω του εργαλείου που εκτελεί πράξεις μεταξύ κανονικοποιημένων αρχείων «Raster Calculator».

Για την ταξινόμηση εφαρμόζεται η μέθοδος Natural Breaks (Jenks, 1967) με το εργαλείο «Spatial Analyst Tool» του ArcGIS (ESRI, 2016). Η μέθοδος αυτή έχει σχεδιαστεί για να καθορίσει την καλύτερη ρύθμιση τιμών σε διαφορετικές κατηγορίες, ελαχιστοποιώντας τη μέση απόκλιση κάθε κλάσης από το μέσο όρο της κλάσης και μεγιστοποιώντας παράλληλα την απόκλιση κάθε κλάσης από τους μέσους όρους των άλλων ομάδων. Με άλλα λόγια, η μέθοδος επιδιώκει να μειώσει τη διακύμανση εντός κλάσεων και να μεγιστοποιήσει τη διακύμανση μεταξύ κλάσεων.

- ▶ **Βήμα 4. Επιλογή μεθόδου σύνθεσης κριτηρίων.** Για τους υδρομετρικούς σταθμούς πραγματοποιείται η σύνθεση των επιλεγέντων κριτηρίων εφαρμόζοντας την πολυκριτηριακή αξιολόγηση που περιλαμβάνει τη Διαδικασία Αναλυτικής Ιεραρχίας (AHP), τη Διαδικασία Ασαφούς Αναλυτικής Ιεραρχίας (FAHP) και τον Σταθμισμένο Γραμμικό Συνδυασμό (WLC). Για τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς εφαρμόζεται η μέθοδος WLC.
- ▶ **Βήμα 5. Καθορισμός συντελεστών βαρύτητας.** Για τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας επιλέγεται η μέθοδος AHP (Saaty, 1977), η οποία είναι μια δομημένη τεχνική για την οργάνωση και την ανάλυση πολύπλοκων αποφάσεων. Χρησιμοποιείται για τη στάθμιση των κριτηρίων και δομεί ένα σύνθετο πρόβλημα ιεραρχικά με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητάς του με την απλοποίησή του σε επιμέρους προβλήματα. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί από διάφορους ερευνητές, όπως τους Sestak (1988), Chung & Lee (2009), Kar et al. (2015), Feloni et al. (2018) και Theochari et al. (2019).

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει δύο γενικές φάσεις: (1) τη δόμηση της ιεραρχίας και (2) την αξιολόγηση των επιμέρους κριτηρίων. Η δόμηση της ιεραρχίας έχει στόχο τη μείωση της πολυπλοκότη-

τας του με την απλοποίησή του σε υπο-προβλήματα. Το νέο ιεραρχικό (ή δικτυακό μοντέλο) απαρτίζεται από τις βασικές συνιστώσες του επιτρέποντας τις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Η αξιολόγηση βασίζεται στη λογική των συγκρίσεων ανά ζεύγη των διαφόρων κριτηρίων σύμφωνα με την υποκειμενική άποψη του ερευνητή, ως προς τη σχέση σημαντικότητας που έχουν τα κριτήρια μεταξύ τους. Η σύγκριση ανά ζεύγη γίνεται σύμφωνα με τη θεμελιώδη κλίμακα του Satty (1977), όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7

Μετατροπή της Γλωσσικής Κλίμακας Σημαντικότητας σε σαφείς τιμές AHP (Πηγή: Saaty & Vargas, 1991)		
Γλωσσική κλίμακα σημαντικότητας	Τιμές σημαντικότητας	Τιμές μη σημαντικότητας
Εξίσου σημαντικό	1	1
Ενδιάμεσο 1	2	1/2
Μέτρια σημαντικότερο	3	1/3
Ενδιάμεσο 2	4	1/4
Σημαντικότερο	5	1/5
Ενδιάμεσο 3	6	1/6
Πολύ σημαντικότερο	7	1/7
Ενδιάμεσο 4	8	1/8
Απόλυτα σημαντικότερο	9	1/9

Η τεχνική σύγκρισης ζευγών συμβάλει στον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας κάθε κριτηρίου. Κατά την εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας, ένα άτομο ή μια ομάδα αναλυτών συγκρίνει κάθε πιθανή αντιστοίχιση και εισάγει τις βαθμολογίες (βλ. Πίνακα 3.7) σε ζεύγη συγκρίσιμης μήτρας. Αν η μήτρα είναι συμμετρική, συμπληρώνεται το κατώτερο τρίγωνο και τα υπόλοιπα κελιά ορίζονται με βάση αυτό.

Για την εκτίμηση του συντελεστή βαρύτητας κάθε κριτηρίου εφαρμόζεται η παρακάτω διαδικασία:

- ▶ Αθροίζονται οι τιμές κάθε στήλης της μήτρας συγκρίσιμων ζευγών.
- ▶ Διαιρείται κάθε στοιχείο της μήτρας με το άθροισμα της στήλης της.
- ▶ Υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων για κάθε σειρά της μήτρας.

Οι μέσοι όροι που προκύπτουν αποτελούν τους συντελεστές βαρύτητας (Drobne & Lisec, 2009). Ακολουθεί ο έλεγχος συνέπειας της σύγκρισης των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν. Η εκτίμηση του λόγου συνέπειας γίνεται με την εξίσωση (3.9).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.9)$$

όπου RI είναι ο τυχαίος δείκτης συνέπειας της τυχαίας παραγόμενης μήτρας συγκρίσιμων ζευγών, ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που συγκρίνονται, και CI είναι ο δείκτης συνέπειας, ο οποίος παρέχει ένα μέτρο απομάκρυνσης από τη συνέπεια και υπολογίζεται από την εξίσωση (3.10).

$$CI = \frac{\bar{\lambda} - n}{n - 1} \quad (3.10)$$

όπου $\bar{\lambda}$ είναι η ιδιοτιμή του πίνακα και n είναι ο αριθμός των κριτηρίων.

Ο λόγος συνέπειας πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος από 10% ($CR \leq 0.10$), ώστε να θεωρείται λογική η ιεράρχηση και η σχέση σύγκρισης που έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των πρωτογενών παραγόντων και να είναι αποδεκτοί οι συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν. Εάν ο λόγος συνέπειας δεν είναι μικρότερος ή ίσος από 0.10, επανεκτιμώνται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας (Saaty, 1977).

- ▶ **Βήμα 6.** Σύνθεση κριτηρίων και καθορισμός βέλτιστων θέσεων. Για τη σύνθεση των κριτηρίων χρησιμοποιείται η μέθοδος WLC που βασίζεται στην έννοια του σταθμισμένου μέσου όρου. Με αυτή συνδυάζονται τα κριτήρια απόφασης και οι συντελεστές βαρύτητας τους σε μια τελική βαθμολογία για να προκύψει ο χάρτης καταλληλότητας. Ακολουθεί η ενσωμάτωση σε περιβάλλον GIS για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων, σύμφωνα με την εξίσωση (3.11).

$$FS = \sum w_i x_i \quad (3.11)$$

όπου FS είναι η τελική τιμή για κάθε κελί, w_i είναι ο συντελεστής βαρύτητας και x_i είναι η τυποποιημένη τιμή του κριτηρίου i . Για να υπολογιστεί η συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική λύση, αθροίζονται τα γινόμενα των κριτηρίων με τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας.

Υπολογίζονται οι βαθμολογίες για όλες τις εναλλακτικές λύσεις και επιλέγονται αυτές με την υψηλότερη επίδοση.

3.7 Δίκτυα παρακολούθησης στην Ελλάδα: Το νομικό πλαίσιο, η παρούσα κατάσταση και οι προοπτικές

3.7.1 Οι ιδιαιτερότητες της Ελλάδας

Η Ελλάδα είναι μια χώρα που παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, εξαιτίας της μορφολογίας και του κλίματος της. Αυτό επιδρά και στη μέθοδο σχεδιασμού των ΔΠ.

Το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικό μεσογειακό, αν και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων, και κυμαίνεται από υγρό στις βορειοδυτικές περιοχές έως ξηρό στις ανατολικές. Αυτό οφείλεται στο έντονο ανάγλυφο της χώρας και ειδικά στην τοπογραφία λόγω της οροσειράς της Πίνδου, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στα καθεστώτα βροχόπτωσης και απορροής στην Ελλάδα. Η οροσειρά της Πίνδου εκτείνεται κάθετα στην κίνηση των καιρικών συστημάτων, προκαλώντας την άνοδο και τη συμπύκνωση των αέριων μαζών, οδηγώντας τελικά σε μεγάλα ύψη βροχόπτωσης στα δυτικά. Το έντονο ορεινό έδαφος συνδέεται με τη διαίρεση της χώρας σε πληθώρα υδρολογικών λεκανών.

Εξαιτίας των παραπάνω χαρακτηριστικών, η διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής είναι πρακτικά αδύνατη. Γενικά, η χώρα χωρίζεται σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα. Οι δυτικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποσότητα υδάτινων αποθεμάτων, ενώ οι ανατολικές έχουν έντονο έλλειμμα, κυρίως στα Υδατικά Διαμερίσματα της Αττικής και της Θεσσαλίας.

3.7.2 Υφιστάμενα δίκτυα σταθμών στην Ελλάδα και αρμόδιες υπηρεσίες

Με βάση τις έρευνες των Baltas & Mimikou (2009) και Μαμάση κ.ά (2019), στην Ελλάδα υπάρχουν πολλά δίκτυα υδρομετεωρολογικών σταθμών που ελέγχονται από διάφορες Υπηρεσίες. Οι φορείς που

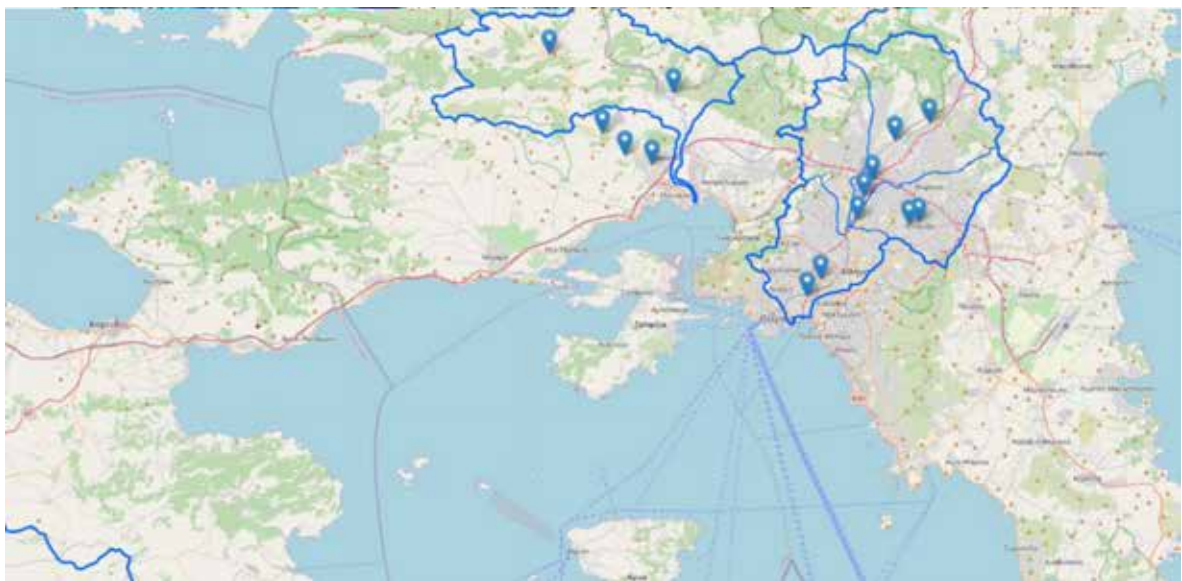
έχουν εγκαταστήσει τμηματικά δίκτυα περιορισμένης κάλυψης και περιλαμβάνουν περισσότερους από 1000 υδρομετεωρολογικούς σταθμούς είναι οι ακόλουθοι:

- ▶ Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) με διαθέσιμα δεδομένα για περίπου 300 σταθμούς σε περιοχές υψηλού υδροδυναμικού για υδροηλεκτρικούς σκοπούς.
- ▶ Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), που είναι ο επίσημος φορέας έκδοσης των μετεωρολογικών προγνώσεων στη χώρα, με περισσότερους από 100 σταθμούς για σκοπούς πρόγνωσης καιρού.
- ▶ Το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων με 357 σταθμούς για γεωργικούς σκοπούς.
- ▶ Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας με περίπου 270 σταθμούς για την ορθολογική διαχείριση των υδάτων και το σχεδιασμό δικτύων.
- ▶ Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) με 510 μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλη τη χώρα (ΜΕΤΕΟ, 2023b).

Άλλοι φορείς που επενδύουν σε συναφείς και σχετικά δαπανηρές υποδομές παρατήρησης μετεωρολογικού, κλιματολογικού και υδρολογικού ενδιαφέροντος είναι οι ακόλουθοι:

- ▶ Οι επιμέρους υποδομές της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων.
- ▶ Ο ΕΛ.Γ.Α. – Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών.
- ▶ Το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών.
- ▶ Το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- ▶ Δήμοι της χώρας που έχουν αναπτύξει δικά τους δίκτυα.
- ▶ Ερευνητικά Κέντρα και Πανεπιστήμια που συντηρούν μικρά δίκτυα.

Σημειώνεται η εθνική υποδομή παρακολούθησης επίγειων υδάτων ΗΙΜΙΟΦΟΤΣ και το δίκτυο OpenHi.net με σταθμούς από το ΕΑΑ, το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), το Πανεπιστήμιο



Εικόνα 3.18: Θέσεις σταθμών μέτρησης στάθμης με τις ανάντη λεκάνες απορροής τους στην περιοχή της Αττικής. (Πηγή: OpenHi - 2023)

Αιγαίου, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Στην εθνική υποδομή, ο κάθε φορέας είναι υπεύθυνος για τη συντήρηση των σταθμών του, ενώ το Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Συστημάτων Επικοινωνιών & Υπολογιστών (ΕΠΙΣΕΥ) του ΕΜΠ είναι υπεύθυνο για την συντήρηση-βιωσιμότητα της πληροφοριακής υποδομής.

Στην Εικόνα 3.18 παρουσιάζονται οι θέσεις των σταθμών μέτρησης στάθμης στην περιοχή της Αττικής (OpenHi, 2023).

3.7.3 Η σημερινή κατάσταση των δικτύων παρακολούθησης στην Ελλάδα

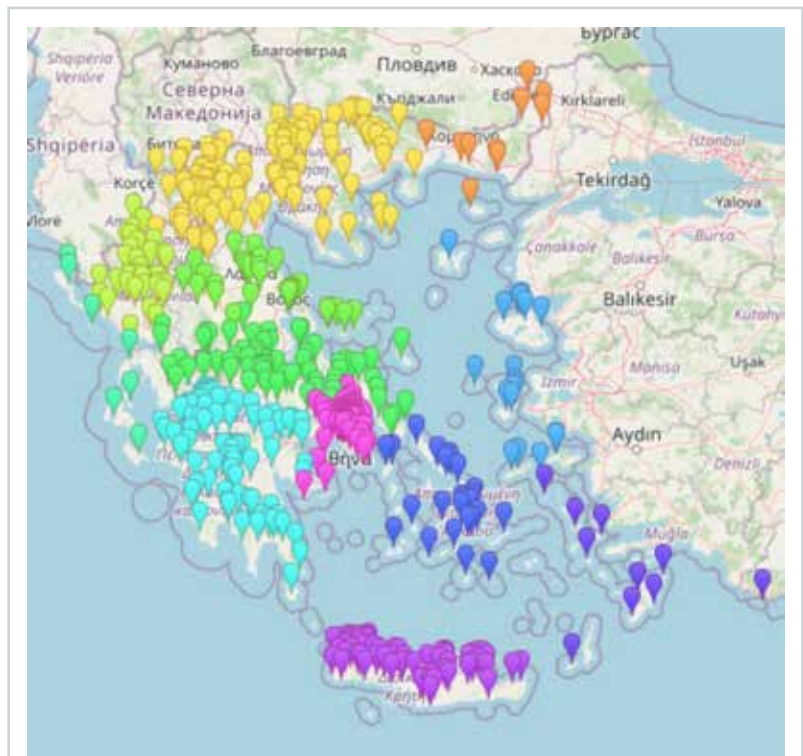
Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί στην Ελλάδα

Σήμερα, σύμφωνα με την ιστοσελίδα του ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ (2022), καταγράφονται δεδομένα σε 2313 σταθμούς, από τους οποίους μόνο οι 1321 διαθέτουν χρονοσειρές, δηλ. δεδομένα χωρίς διακοπές, κενά και ελλείψεις παρατηρήσεων. Ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην Ελλάδα (βλ. Εικόνα 3.19) έχει αναπτυχθεί και λειτουργεί από τη μονάδα ΜΕΤΕΟ του ΕΑΑ (ΜΕΤΕΟ, 2023 a και b), το οποίο σήμερα αριθμεί περισσότερους από 510 μετεωρολογικούς σταθμούς (Lagouvardos et al, 2017). Από τον Φεβρουάριο του 2023, τα δεδομένα αυτών των σταθμών δίνονται επιχειρησιακά για αφομοίωση στο παγκόσμιο μοντέλο IFS (βλ. υποκεφάλαιο 3.5.6).

Στην παρούσα κατάσταση του δικτύου δεν υπάρχει χωρικά ομοιόμορφη κατανομή των σταθμών, επειδή κάθε υπηρεσία επικεντρώνεται σε διαφορετικά πεδία ανάλογα με τη χρήση που στοχεύει η συλλογή δεδομένων. Έτσι, σήμερα οι περισσότεροι σταθμοί (>30%) βρίσκονται στη ζώνη χαμηλού υψόμετρου (0-200 m), συχνά δυο σταθμοί διαφορετικών υπηρεσιών είναι πολύ κοντά, και υπάρχουν μόνο μερικοί σταθμοί που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο, δηλ. σε υψόμετρα μεγαλύτερα από 1200 m. Κατά συνέπεια, ειδικά για τις βροχοπτώσεις σε ορεινές περιοχές, παρατηρείται αδυναμία εκτίμησης του μεγέθους τους.

Η ακρίβεια των διαθέσιμων ιστορικών καταγραφών ποικίλλει, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι θέσεις των σημερινών σταθμών συχνά δεν είναι κατάλληλες. Υπάρχουν πολλά κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για την εγκατάσταση ενός σταθμού σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, όπως η κλίση του εδάφους, καθώς οι μετρήσεις των σταθμών που είναι εγκατεστημένοι σε απότομες πλαγιές επηρεάζονται από τη δράση του ανέμου τοπικά.

Όσον αφορά τον επιστημονικό εξοπλισμό, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι οργάνων και αισθητήρων από κάθε υπηρεσία που χαρακτηρίζονται από διαφορετική ευαισθησία. Σε διαχειριστικό επίπεδο, καθώς συντηρούνται επιμέρους δίκτυα που



Εικόνα 3.19: Δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του ΜΕΤΕΟ/ΕΑΑ (Πηγή: ΜΕΤΕΟ, 2023a)

εξυπηρετούν ιδίους σκοπούς, το κόστος της λειτουργίας κοινών δραστηριοτήτων από διαφορετικούς φορείς είναι πολλαπλάσιο του απαιτούμενου και προβληματικό λόγω της έλλειψης κοινής σχεδίασης και συνεργασίας μεταξύ των εθνικών φορέων. Η δεδομένη κατάσταση έχει οδηγήσει στην εγκατάσταση και λειτουργία κατακερματισμένων και μη συμβατών τεχνολογικών υποδομών, στη συμμετοχή σημαντικού αριθμού ερευνητών, επιστημόνων και τεχνικών με συναφές επιστημονικό-τεχνολογικό αντικείμενο σε αρκετούς φορείς, χωρίς να υπάρχει η στοιχειώδης συνεργασία μεταξύ τους, με αποτέλεσμα συχνά να πραγματοποιείται ακόμα και σχεδόν το ίδιο έργο σε περισσότερους από έναν φορείς και τέλος, σε έλλειψη θεσμικής συνεργασίας των δημόσιων φορέων για την εκπροσώπηση της Ελλάδας σε διεθνείς, ευρωπαϊκούς και διακρατικούς οργανισμούς έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, στους οποίους η χώρα μας καταβάλλει ετησίως δεκάδες εκατομμύρια ευρώ για να συμμετέχει στα τεχνολογικά τους προγράμματα (επιχειρησιακά και ερευνητικά). Οι παραπάνω παράγοντες καταδεικνύουν την αναγκαιότητα δημιουργίας ενιαίου μητρώου δεδομένων και δικτύου σταθμών στη χώρα μας.

Δίκτυο μετεωρολογικών ραντάρ στην Ελλάδα

Πριν το 2004 υπήρχαν στην Ελλάδα τέσσερα μετεωρολογικά ραντάρ τα οποία λειτουργούσαν για παρατηρήσεις από την ΕΜΥ και τον Οργανισμό Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων, ΕΛΓΑ (Mimikou and Karakostas, 1991). Τα δύο είναι τύπου S-Band και βρίσκονται στη Θεσσαλονίκη και τη Λάρισα και τα άλλα δύο είναι τύπου C-Band και βρίσκονται στην Αθήνα (Υμηττός) και την Ανδραβίδα. Αυτά τα ραντάρ χρησιμοποιούνται και σήμερα για την ενημέρωση του καιρού και την υποστήριξη πτήσεων από την Πολεμική Αεροπορία και το καλοκαίρι για την εφαρμογή του προγράμματος αντιαεραζικής προστασίας του ΕΛΓΑ (Karakostas, 1984).

Το 2004 στο πλαίσιο υποστήριξης σε θέματα πρόγνωσης καιρού των Ολυμπιακών Αγώνων ΑΘΗΝΑ 2004, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση ενός επιπλέον μετεωρολογικού ραντάρ τύπου C-Band στην περιοχή της Αίγινας. Η θέση εγκατάστασης επιλέχθηκε ύστερα από μελέτη βέλτιστης χωροθέτησης με σκοπό την κάλυψη ολόκληρου του ηπειρωτικού τμήματος της Περιφέρειας Αττικής, σε συνδυασμό με μικρό ύψος σκόπευσης (Baltas and Mimikou, 2002).

Το 2004 η ΕΜΥ μέσω του προγράμματος “Development of a Network of Weather Radars” ξεκίνησε τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός δικτύου μετεωρολογικών ραντάρ με σκοπό την πλήρη κάλυψη του Ελλαδικού χώρου με κεντρική διαχείριση (Kollias et al., 2007). Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, πραγματοποιήθηκε η αναβάθμιση των



Εικόνα 3.20: Το Ελληνικό δίκτυο ραντάρ
(Πηγή: Kollias et al., 2007)

τεσσάρων υπαρχόντων ραντάρ, καθώς και η πυκνωση του δικτύου με τη προσθήκη νέων ραντάρ στην Πρέβεζα, την Καβάλα, την Αστυπάλεια, τη Σκύρο και τη Σούδα. Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζονται οι θέσεις των εγκατεστημένων ραντάρ. Σήμερα, τα ραντάρ αυτά διαχειρίζονται από την ΕΜΥ, αλλά υπολειτουργούν και δεν χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά για τις ανάγκες αντιπλημμυρικής προστασίας (Κολλιδάς, 2023). Γενικά, το μεγάλο κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας των μετεωρολογικών ραντάρ είναι η κύρια αιτία απουσίας ενός ολοκληρωμένου δικτύου μετεωρολογικών ραντάρ με σκοπό την αντιπλημμυρική προστασία.

Το ΕΑΑ και το ΕΜΠ διαθέτουν μετεωρολογικά ραντάρ για ερευνητικούς σκοπούς. Το ΕΑΑ

διαθέτει το X-POL Radar (Anagnostou et al., 2010) και το ΕΜΠ το Rainscanner (Bournas & Baltas, 2020, 2022). Τα ραντάρ αυτά είναι τύπου X-Band (3 cm), δηλ. αυξημένης χωρικής και χρονικής ανάλυσης, αλλά περιορισμένης εμβέλειας.

3.7.4 Νομικό πλαίσιο και προοπτικές ανάπτυξης ενός εθνικού δικτύου παρακολούθησης

Κατά τα τελευταία έτη έχουν εφαρμοστεί οι ακόλουθες τρεις σημαντικές Οδηγίες για τα μετεωρολογικά και γενικότερα περιβαλλοντικά δεδομένα:

- ▶ η Οδηγία για τα περιβαλλοντικά δεδομένα,
- ▶ η Οδηγία για τα ανοικτά δεδομένα και την περαιτέρω χρήση πληροφοριών του δημόσιου τομέα (EC, 2023), και
- ▶ η Οδηγία 2007/2/ΕΚ INSPIRE (2022).

Οι οδηγίες αυτές στοχεύουν:

- ▶ στη δημιουργία υπηρεσιών που θα συγκεντρώνουν πληροφορίες για το περιβάλλον και θα τις καθιστούν διαθέσιμες σε πλήθος ενδιαφερομένων σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, και
- ▶ στον περιορισμό των στρεβλώσεων του ανταγωνισμού στην κοινοτική αγορά.

Οι παραπάνω οδηγίες και ο Νόμος 3882/2010 (ΦΕΚ 166Α') που αφορά στη δημιουργία της «Εθνικής Υποδομής Γεωχωρικών Πληροφοριών και στην Εναρμόνιση του Εθνικού Δικαίου προς τις διατάξεις με την Οδηγία 2007/2/ΕΚ της 14ης Μαρτίου 2007» αποτελούν τη βάση για τις προοπτικές ανάπτυξης ενός ενιαίου και αξιόπιστου εθνικού δικτύου σταθμών. Αυτό θα επιτρέψει τον ελεύθερο διαμοιρασμό πολυάριθμων δεδομένων για διάφορες εφαρμογές, με κύριο στόχο την επίτευξη οικονομίας κλίμακας, με την ενοποίηση δικτύων παρατήρησης και καταγραφής των κλιματικών και μετεωρολογικών δεδομένων.

Πρακτικά, με αυτές τις οδηγίες, η Ευρώπη καλεί τα μέλη της να ωφεληθούν οικονομικά και κοινωνικά από τις πληροφορίες του δημόσιου τομέα, που θα είναι διαθέσιμες για την εμπορική επαναχρησιμοποίηση τους, χωρίς εμπόδια και με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος.

Η Οδηγία INSPIRE ψηφίστηκε το 2010 για να αντιμετωπίσει δύο επείγουσες ανάγκες της χώρας:

- ▶ τη θέσπιση εναρμονισμένων πρακτικών και κανόνων για τη συλλογή, παραγωγή, προμήθεια, διαχείριση, κοινοχρησία και διάθεση γεωχωρικών δεδομένων (από σταθμούς, δίκτυα κ.λπ.), και
- ▶ την απαίτηση συμμόρφωσης με την Οδηγία INSPIRE, η οποία ορίζει ένα πλαίσιο τεχνικών προδιαγραφών διαλειτουργικότητας, ώστε να καθίσταται εφικτός ο αυτοματοποιημένος διαμοιρασμός γεωχωρικών δεδομένων που αφορούν στο περιβάλλον (π.χ. ζώνες NATURA 2000) σε Εθνικό και Ευρωπαϊκό επίπεδο.

Σύμφωνα με το άρθρο 18 του Ν.3882/2010, αρμόδιος φορέας για την ανάπτυξη και τη λειτουργία της Εθνικής Υποδομής Γεωχωρικών Πληροφοριών (ΕΥΓΕΠ) και το επίσημο σημείο επαφής με την Ε.Ε. για την εφαρμογή της Οδηγίας INSPIRE σχετικά με τη δημιουργία της ευρωπαϊκής υποδομής INSPIRE, ήταν ο Οργανισμός Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας (ΟΚΧΕ). Όμως, σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 1 του Ν. 4164/2013, ο ΟΚΧΕ καταργήθηκε και η μεταφορά των αρμοδιοτήτων του μετατέθηκε στην Κτηματολόγιο ΑΕ, η οποία μετονομάστηκε σε Ελληνικό Κτηματολόγιο και Χαρ-

τογράφηση ΑΕ (ΕΚΧΑ ΑΕ). Από την έναρξη ισχύος του συγκεκριμένου νόμου, οι κανονιστικές πράξεις που εξέδιδε ο ΟΚΧΕ, εκδίδονται πλέον από τον Υπουργό Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Κοηυδάς, 2020).

3.8 Βιβλιογραφία

1. Anagnostou, M. N., Kalogiros, J., Anagnostou, E. N., Tarolli, M., Papadopoulos, A., & Borga, M. (2010). Performance evaluation of high-resolution rainfall estimation by X-band Dual-Polarization Radar for flash flood applications in mountainous basins. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.026>
2. Baltas, E. A., & Mimikou, M. A. (2002). Considerations for the optimum location of a C-band weather radar in the Athens area. *Proceedings of ERAD 2002* (Vol. 348, No. 351).
3. Baltas, E. A., & Mimikou, M. A. (2009). GIS-based optimisation of the Hydrometeorological Network in Greece. *International Journal of Digital Earth*, 2(2), 171–185. <https://doi.org/10.1080/17538940902818303>
4. Barca, E., Passarella, G., & Uricchio, V. (2008). Optimal extension of the Rain Gauge Monitoring Network of the Apulian Regional Consortium for crop protection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145(1-3), 375–386. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0046-z>
5. Binetti, M. S., Campanale, C., Massarelli, C., & Uricchio, V. F. (2022). The use of weather radar data: Possibilities, challenges and advanced applications. *Earth*, 3(1), 157–171. <https://doi.org/10.3390/earth3010012>
6. Bournas, A. & Baltas, E. (2020). Application of a rainscanner system for quantitative precipitation estimates in the region of Attica. *Proceedings of the 6th International Symposium on Green Chemistry, Sustainable Development and Circular Economy, Conference on Environmental Science and Technology, Thessaloniki, Greece*, pp. 20-23.
7. Bournas, A., & Baltas, E. (2022). Determination of the Z-R relationship through spatial analysis of X-band Weather Radar and Rain Gauge Data. *Hydrology*, 9(8), 137. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080137>
8. Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., ... Zhumanova, M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge generation, Ecosystem Service Management, and Sustainable Development. *Frontiers in Earth Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>
9. Chochon, R, Viaux, N., Lebourg, T., & Vidal, M. (2021). Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes: atmospheric mechanisms and resulting rainfall. *Proceedings of the Conference: SimHydro 2021: Models for complex and global water issues - Practices and expectations*, Sophia-Antipolis, France.
10. Chung, E.-S., & Lee, K. S. (2009). Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multi-criteria decision-making techniques: Case study of Korea. *Water Resources Management*, 23(12), 2395–2416. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9387-9>
11. COPERNICUS (2022). <https://climate.copernicus.eu/>

12. COSMO (2022). <https://www.cosmo-model.org/>
13. Detectronic (2022). https://detectronic.org/wp-content/uploads/2018/09/MMS-D003-raingauge_data_sheet.pdf
14. Dobos, E., Daroussin, J., & Montanarella, L. (2005). An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1: 1 and 1: 5 million scales. European Communities. EUR 21571 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 55.
15. Drobne, S., & Lisec, A. (2009). Multi-Attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging. *Informatica*, 33, 459-474.
16. ECMWF (2022). European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction/atmospheric-physics>
17. ESRI (2016). ArcMap 10.2, Redlands, USA.
18. EC (2023). European Commission. From the Public Sector Information (PSI) Directive to the Open Data Directive. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/psi-open-data>
19. Feloni, E. G., Karpouzou, D. K., & Baltas, E. A. (2018). Optimal hydrometeorological station network design using GIS techniques and multicriteria decision analysis. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000397](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000397)
20. Fujjoka, F. M. (1986). A method for designing a fire weather network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3(3), 564–570.
21. GFS (2022). Global Forecast System. <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>
22. Giannaros, T. M., Lagouvardos, K., & Kotroni, V. (2017). Performance evaluation of an operational lightning forecasting system in Europe. *Natural Hazards*, 85(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2555-y>
23. Hong, N. T., Truc, P. T. T., Liem, N. D., & Loi, N. K. (2016). Optimal selection of number and location of Meteo-hydrological monitoring networks on Vu Gia – Thu Bon River basin using GIS. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(3), 324-328. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.3.807>
24. HydroNET (2022). HydroNET-RainWatch <https://www.hydronet.com.au/hydronet-radar-rainfall-data-ensemble-forecast-data-smart-tools-improved-rainfall-information/>
25. IBM (2022). <https://www.ibm.com/weather/industries/broadcast-media/what-is-weather-radar>
26. IFS (2018). Integrated Forecast System. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/80895-ifs-documentation-cy45r1-part-iv-physical-processes>
27. INSPIRE (2022). <https://inspire.ec.europa.eu/>
28. Kollias, P., Potiriadis, G., Alexakis, G., & Serpetzoglou, E. (2007). The Hellenic weather radar network – upgrades, description and future plans. *Proceedings of the 33rd Conference on Radar Meteorology*, Cairns, Australia.
29. LidarRadar (2022). <https://lidarradar.com/info/advantages-and-disadvantages-of-weather-radar>

30. Kallos, G. (1997). The regional weather forecasting system SKIRON. Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, Athens.
31. Kar, A. K., Lohani, A. K., Goel, N. K., & Roy, G. P. (2015). Rain Gauge Network design for flood forecasting using multi-criteria decision analysis and clustering techniques in lower Mahanadi River basin, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 313–332. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.003>
32. Karagiannidis, A., Lahuerta, J. A., Calbet, X., Lliso, L., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Ripodas, P. (2023). Efficiency of the NWC SAF version 2021 CRRPH precipitation product: Comparison against previous NWC SAF precipitation products and the influence of topography. *Climate*, 11(2), 34. <https://doi.org/10.3390/cli11020034>
33. Kazamias, A.-P., Sapountzis, M., & Lagouvardos, K. (2022). Evaluation of GPM-IMERG rainfall estimates at multiple temporal and spatial scales over Greece. *Atmospheric Research*, 269, 106014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.106014>
34. Lagouvardos, K., Floros, E., & Kotroni, V. (2010). A grid-enabled Regional-scale ensemble forecasting system in the Mediterranean Area. *Journal of Grid Computing*, 8(2), 181–197. <https://doi.org/10.1007/s10723-010-9150-3>
35. Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K., & Vougioukas, S. (2017). The Automatic Weather Stations NOANN network of the National Observatory of Athens: Operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), 4–16. <https://doi.org/10.1002/gdj3.44>
36. Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, 5(4), 165-166.
37. Feidas, H., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Cartalis, C. (2005). Application of three satellite techniques in support of precipitation forecasts of an NWP model. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5393–5417. <https://doi.org/10.1080/01431160500273551>
38. Mavrakou, T. & Cartalis, C. (2015). An assessment of the potential of earth observation data to detect and monitor storm cells associated with natural hazards – an application to an extreme weather event in southeastern Mediterranean, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 2191–2219. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-2191-2015>
39. METEO (2023a). <https://www.meteo.gr/meteomaps/>
40. METEO (2023b). <https://www.meteo.gr/Gmap.cfm>
41. OpenHi (2023). Open Hydrosystem Information Network. <https://system.openhi.net/>
42. Papadopoulos, A., Katsafados, P., Kallos, G., & Nickovic, S. (2002). The Weather Forecasting System for Poseidon - an overview. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*, 8(2-3), 219–237. <https://doi.org/10.1080/1023673029000003543>
43. Papadopoulos, A. & Katsafados, P. (2009). Verification of operational weather forecasts from the POSEIDON system across the Eastern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1299-1306. <https://nhess.copernicus.org/articles/9/1299/2009/>
44. Ruhl, C. A., & DeRose, J. B. (2004). Investigation of hydroacoustic flow-monitoring alternatives at the Sacramento River at Freeport, California: Results of the 2002-2004 pilot study. *Scientific Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/sir20045172>

45. Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
46. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1991). *Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports*. Kluwer Academic Pub.
47. Shepherd, J. M., Taylor, O. O., & Garza, C. (2004). A dynamic GIS–multicriteria technique for siting the NASA–clark atlanta urban rain gauge network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(9), 1346–1363.
48. Schulze, G. C. (2007). Atmospheric observations and numerical weather prediction. *South African Journal of Science* 103. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0038-23532007000400015
49. Sestak, M.L. (1989). *Wind/terrain analysis: Selection of meteorological station sites in wind modeling of complex terrain*. [Doctoral Dissertation, Colorado State University]. Colorado State University, Fort Collins, CO.
50. Simpson, M.R. (2001) Discharge measurements using a broadband acoustic Doppler current profiler: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-1, 134 p. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/text.pdf>
51. Singh, V. P. (1992). *Elementary hydrology* (p. 973). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
52. Theochari, A. P., Feloni, E., Bournas, A., Karpouzou, D., & Baltas, E. (2019). Multi-criteria decision making and GIS techniques in the design of a stream gauging network. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 15(4), 358-377.
53. USGS (2010a). United States Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/tm3a7.pdf>
54. USGS (2010b). United States Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/tm3a8.pdf>
55. USGS (2021). United States Geological Survey. <https://sgp.fas.org/crs/misc/R45695.pdf>
56. USGS (2022a). <https://www.usgs.gov/media/images/stilling-wells-have-been-used-historically-measure-river-stage>
57. USGS (2022b). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/media/images/streamgage-installation-usgs>
58. USGS (2022c). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-streamflow-measured>
59. WMO (1972). World Meteorological Organization. *Casebook on hydrological network design practice*. WMO-No. 324, Geneva.
60. WMO (1983). World Meteorological Organization. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*, 5th Ed., Geneva.
61. WMO (2003). World Meteorological Organization. *Hydrological data management: Present state and trends*, Geneva.
62. WMO (2008a). World Meteorological Organization. *Guide to hydrological practices*, 6th Ed., Geneva.
63. WMO (2008b). World Meteorological Organization. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*, 7th Ed., Geneva.

64. WMO (2010). World Meteorological Organization. Manual on stream gauging-Volume 1: Fieldwork, Geneva.
65. EMY (2022). Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. <http://www.emy.gr/emv/el/services/paroxi-iripresion-proionta-cosmo>
66. ΕΜΣΥ (2022). Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας. http://lmt.ypeka.gr/public_view.html.
67. Κολλυδάς, Θ. (2022). Μετεωρολογικές υποδομές. Άρθρο στον ιστότοπο: <https://kolydas.gr/content/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CF%82>
68. Κολλυδάς, Θ. (2023). Άρθρο στον ιστότοπο: <https://kolydas.gr/content/%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BD-%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B7%CF%87%CE%BF-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BA%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%AF%CE%B1%CF%82-eva-0>
69. Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., και Κουτσογιάννης, Δ. (2019), Τεχνική έκθεση ανάπτυξης εθνικού συστήματος παρακολούθησης επιφανειακών υδατικών πόρων, Δίκτυο Ανοικτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων (OpenHi.net), Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 2.1 (<https://www.itia.ntua.gr/1977/>).
70. Μιμίκου, Μ., Μπαλτάς, Ε., και Αναγνώστου, Ε. (1994). Εκτίμηση Βροχόπτωσης με Χρήση Ραντάρ Καιρού και Βροχογράφων. Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ, Τόμος 14, Τεύχος 2, σελ. 129-144.
71. Μπαλτάς, Ε. Α. (2013). Εφαρμοσμένη Μετεωρολογία, Εκδόσεις Ζήτη, ISBN: 978-960-456-376-0.
72. Στάμου, Α. Ι. (2016). Εφαρμοσμένη Υδραυλική - Ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια, 3η έκδοση, Παπασωτηρίου, ISBN 9789604911097.
73. ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟ (2022). <http://www.hydroscope.gr/geodata/>

Μοντέλα πρόγνωσης πλημμυρών

Ε. Μπαλιτάς, Γ. Μητσόπουλος, Γ. Τζάνες, Α. Ι. Στάμου

4.1 Εισαγωγή

Η πρόγνωση πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο είναι εξαιρετικά σημαντική και τα σχετικά **Μοντέλα Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ)**, τα οποία την πραγματοποιούν, αποτελούν πρακτικά την «καρδιά» ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ). Όταν η πρόγνωση είναι πετυχημένη, οδηγεί σε ταχύτερη αντίδραση του ΣΕΠΠ με ακριβείς και έγκαιρες προειδοποιήσεις, σε αποτελεσματική ενεργοποίηση της Υπηρεσίας Πολιτικής Προστασίας και τελικά στη διάσωση ανθρώπινων ζωών και την αποφυγή υλικών ζημιών.

Η ακριβής πρόγνωση μιας πλημμύρας παραμένει μέχρι σήμερα μια πρόκληση για τους επιστήμονες, οι οποίοι έχουν δυο κύριους στόχους:

- ▶ την αύξηση του διαθέσιμου χρόνου αντίδρασης, και
- ▶ τη μείωση του ποσοστού των λανθασμένων ειδοποιήσεων.

Με τα ΜΠΠ πραγματοποιείται η πρόγνωση των χαρακτηριστικών της ροής, κυρίως της στάθμης της επιφανείας ροής, σε επιλεγμένες βασικές τοποθεσίες που καλούνται θέσεις πρόγνωσης. Οι θέσεις πρόγνωσης συνήθως βρίσκονται κατά μήκος υδατορευμάτων, κοντά σε αστικές περιοχές όπου έχουν παρατηρηθεί πλημμύρες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική υπάρχει πληθώρα μοντέλων προσομοίωσης πλημμυρών που χρησιμοποιούνται με επιτυχία ως ΜΠΠ για τους σκοπούς ενός ΣΕΠΠ. Τα μοντέλα αυτά είναι κυρίως φυσικής βάσης και επιλέγονται συνήθως με κύριο κριτήριο τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και ειδικότερα την απόκρισή της στις βροχοπτώσεις.

4.2 Μοντέλα Προσομοίωσης Πλημμυρών

4.2.1 Γενικά

Σε αντιστοιχία με τις υπηρεσίες ενός ΣΕΠΠ (βλ. κεφάλαιο 2), ως ΜΠΠ χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα προσομοίωσης πλημμυρών, τα οποία κυμαίνονται από απλά μοντέλα (βλ. Υπηρεσία ΥΠ1), μέχρι πολύ εξελιγμένα ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία τροφοδοτούνται με δεδομένα εισόδου (α) μετρήσεις πραγματικού χρόνου, όπως π.χ. στάθμης ροής ποταμού, και (β) προγνώσεις, όπως π.χ. βροχόπτωσης, σε επίπεδο λεκάνης απορροής (βλ. Υπηρεσία ΥΠ4).

Τα απλά ΜΠΠ παρέχουν έγκαιρη προειδοποίηση για την έναρξη της πλημμύρας σε μια συγκεκριμένη περιοχή πληροφορώντας για το πότε θα επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο όριο προειδοποίησης πλημμύρας, όπως π.χ. μια προκαθορισμένη τιμή στάθμης της επιφανείας ροής σε μια θέση πρόγνωσης όταν διατηρηθεί ο τρέχων ρυθμός ανόδου αυτής της στάθμης. Τα απλά ΜΠΠ μπορεί να αποτελούν ένα εφεδρικό ΜΠΠ ενός εξελιγμένου ΜΠΠ με ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα και να αξιολογούνται σε τοπικό ή/και κρατικό επίπεδο.

Τα ΜΠΠ βασίζονται στη συνδυαστική χρήση επιμέρους μοντέλων προσομοίωσης, όπως είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Υδρολογικά μοντέλα λεκανών απορροής, βλ. υποκεφάλαιο 4.2.2.
- ▶ Μοντέλα διόδευσης πλημμύρας, βλ. υποκεφάλαιο 4.2.3.
- ▶ Ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα, βλ. υποκεφάλαιο 4.2.4.
- ▶ Μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα, βλ. υποκεφάλαιο 4.2.5.

4.2.2 Υδρολογικά μοντέλα λεκανών απορροής

Τα υδρολογικά μοντέλα εφαρμόζονται συνήθως σε επίπεδο λεκάνης απορροής και κατατάσσονται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, τη χωρική κλίμακα, τη μαθηματική δομή και τη χρονική διακρίσιμότητά τους. Τα υδρολογικά μοντέλα πλημμυρών αναφέρονται σε μικρές χρονικές κλίμακες, που σε μικρές λεκάνες μπορεί να είναι μικρότερες από μια ημέρα, και εξαρτώνται από τη χωρική κλίμακα εφαρμογής τους, δηλ. κυρίως το μέγεθος της λεκάνης απορροής και τα χρονικά της χαρακτηριστικά, όπως του χρόνου συγκέντρωσης.

Στον Πίνακα 4.1 επιχειρείται μια συνοπτική επισκόπηση των υδρολογικών μοντέλων πλημμυρών, με βάση τη συνήθη διάκριση σε μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου και μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης.

Πίνακας 4.1

Χαρακτηριστικά υδρολογικών μοντέλων		
Κατηγορία μοντέλου	Χαρακτηριστικά	Μειονεκτήματα
Μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου	Αποτελούν το τυπικό εργαλείο για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος σχεδιασμού μιας καταίγιδας δεδομένης περιόδου επαναφοράς. Εφαρμόζονται συνήθως στον σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων.	Θεωρούν συγκεκριμένες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Έχουν απλοποιημένο σχήμα υδρογραφήματος. Η διάκριση της απορροής σε πλημμυρική και βασική είναι υποκειμενική.
Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης	Αναπαριστούν τον πλήρη υδρολογικό κύκλο, μεταξύ άλλων τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε συνεχή χρόνο. Αντί της χρήσης ενός μεμονωμένου υετογραφήματος, βασίζονται στη σύζευξη ενός стоχαστικού μοντέλου δόμησης συνθετικών βροχοπτώσεων για τη λεκάνη και ενός μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών παροχών. Είναι καταλληλότερα για μεγάλης κλίμακας λεκάνες απορροής.	Απαιτούν συνεχή δεδομένα (χρονοσειρές μεγάλου μήκους) για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης για όλο το διάστημα της προσομοίωσης, και όχι μόνο κατά τη διάρκεια του επεισοδίου πλημμύρας. Είναι περισσότερο σύνθετα στην εφαρμογή τους και περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Έχουν ευρύτερη εφαρμογή σε μελέτες υδρολογίας και διαχείρισης υδατικών πόρων, παρά στην ανάλυση πλημμυρών.

Τα μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου συνδέονται με τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος ή της αιχμής του (Grimaldi et al., 2012).

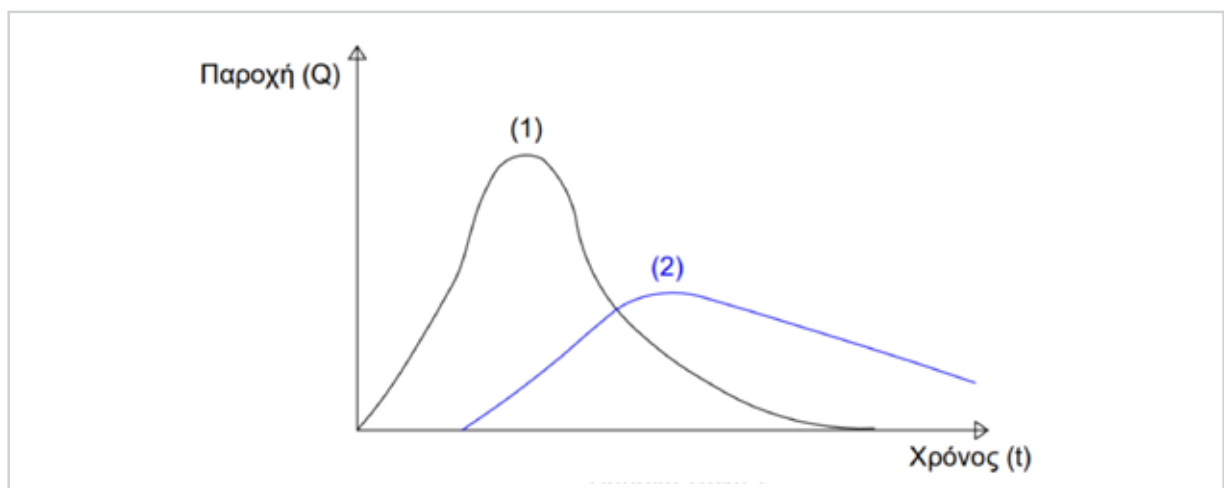
Τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε συνεχή χρόνο, αναπαριστώντας τις φυσικές διεργασίες που τον επηρεάζουν (Boughton & Droop,

2003· Moretti & Montanari 2007· Haberlandt et al., 2008· Blazkova & Beven, 2009· Calver et al., 2009· Viviroli et al., 2009). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συχνά για την προσομοίωση των πλημμυρών, είναι αυτά του μεμονωμένου επεισοδίου, κυρίως επειδή απαιτούν λιγότερα δεδομένα από τα πιο σύνθετα μοντέλα και περιλαμβάνουν μικρό αριθμό παραμέτρων. Ωστόσο, υπάρχει μια ευρέως διαδεδομένη πεποίθηση στην κοινότητα των επιστημόνων της υδρολογίας, ότι σταδιακά θα ευνοηθεί η μετάβαση προς τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης, χάρη στη δυνατότητα τους να εκτιμούν δυναμικά την εδαφική υγρασία.

Συχνά, τα **μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής** (Rainfall-Runoff, RR), στα οποία χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά και άλλα δεδομένα για να προσδιοριστεί η επιφανειακή απορροή που φτάνει στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής, διακρίνονται σε (α) άμεσα (για αδιαμέριστα μοντέλα) ή (β) έμμεσα, όταν παράγεται από επιμέρους υπολεκάνες ή άλλες μικρότερες χωρικές ενότητες (για πλήρως κατανεμημένα μοντέλα). Τα μοντέλα RR μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως ως μοντέλα μαύρου κουτιού (black box), συγκεντρωτικά ή αδιαμέριστα (lumped), ημικατανεμημένα (semi-distributed) και πλήρως κατανεμημένα (fully distributed) μοντέλα.

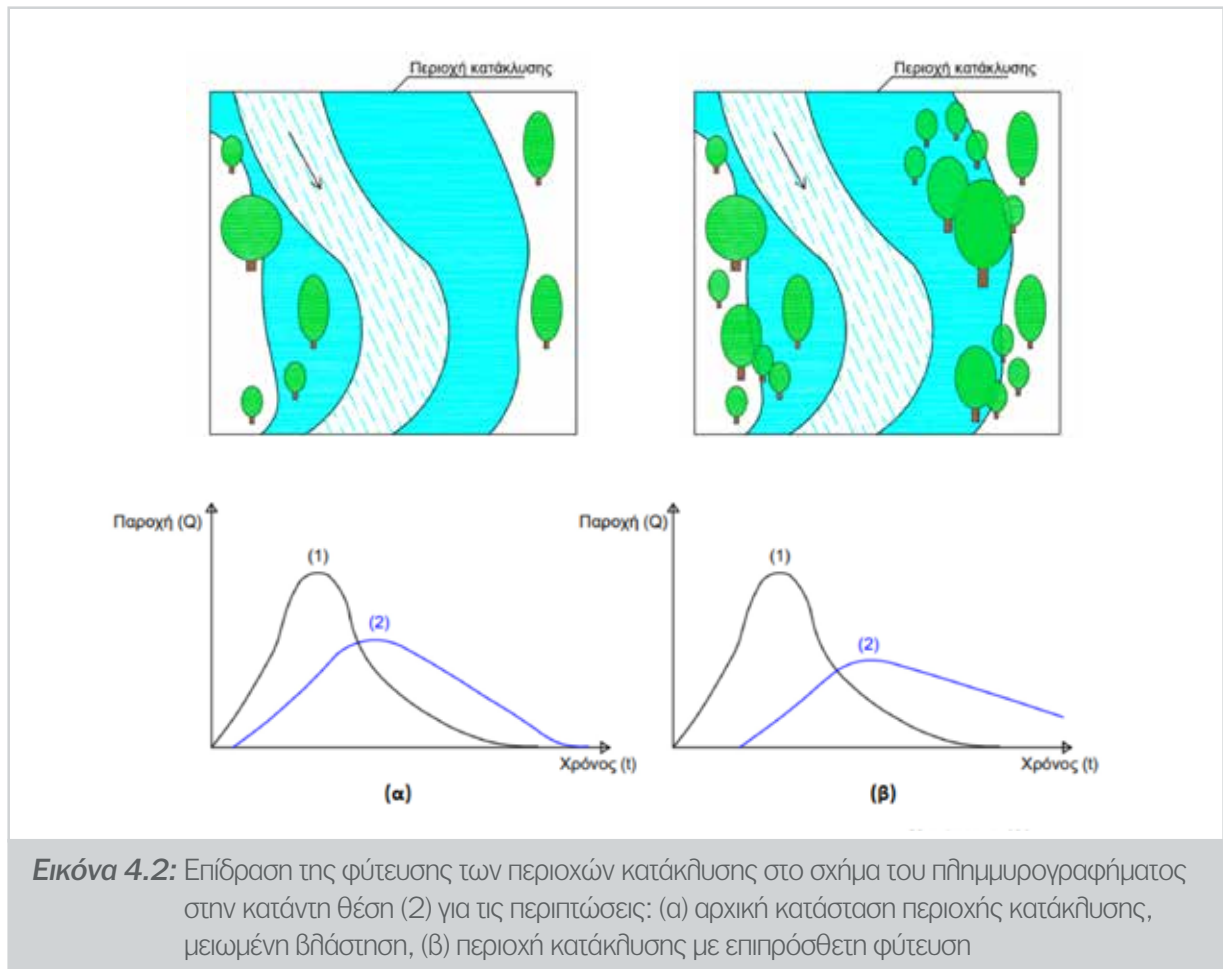
4.2.3 Μοντέλα διόδευσης πλημμύρας

Με τα **μοντέλα διόδευσης πλημμύρας** (Flood Routing, FR) προσδιορίζεται η διόδευση του κύματος της πλημμύρας από μια ανάντη θέση προς μια κατάντη θέση. Συνήθως, η ανάντη θέση είναι η έξοδος μιας λεκάνης απορροής, στην οποία είναι γνωστό το πλημμυρογράφημα, π.χ. που έχει υπολογιστεί με ένα μοντέλο RR (βλ. υποκεφάλαιο 4.2.2), και προσδιορίζεται πώς μεταβάλλεται το σχήμα του στις διάφορες θέσεις κατάντη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 4.1, και ειδικότερα στη θέση πρόγνωσης. Κατά τη διόδευση του πλημμυρογραφήματος από τη θέση (1) στη θέση (2) παρατηρείται μεταβολή του σχήματός του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, το οποίο γίνεται περισσότερο πεπλατυσμένο με μειωμένη αιχμή.



Εικόνα 4.1: Εξέλιξη πλημμυρογραφήματος προς τα κατάντη

Τα μοντέλα FR μπορεί να είναι υδροδυναμικά ή υδρολογικά. Τα υδροδυναμικά μοντέλα έχουν φυσική βάση, και με αυτά μπορεί να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός των μεταβολών που προκαλούνται στο σχήμα του πλημμυρογραφήματος λόγω επεμβάσεων που γίνονται κατά τη λήψη μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας, όπως π.χ. με τη φύτευση των περιοχών κατάκλισης, η επίδραση της οποίας στο πλημμυρογράφημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2 (Mitsopoulos et al., 2023). Αντίθετα, τα υδρολογικά μοντέλα διόδευσης είναι εννοιολογικά, και δεν επιτρέπουν τέτοιου είδους αναλύσεις.



4.2.4 Ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα

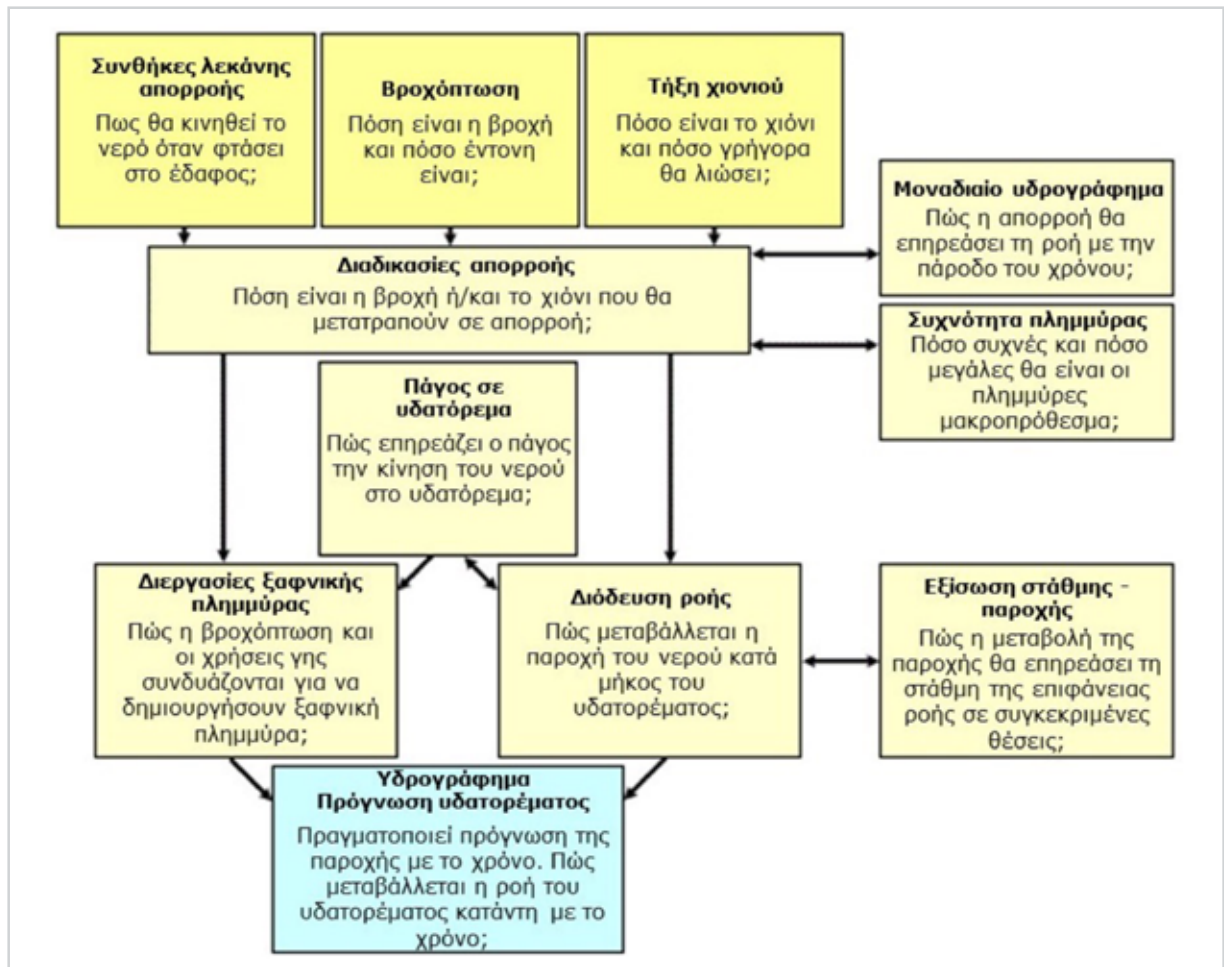
Τα ολοκληρωμένα μοντέλα ως συνδυασμοί υδρολογικών-υδροδυναμικών μοντέλων

Στην πράξη, τα περισσότερα ΜΠΠ των ΣΕΠΠ αποτελούν συνδυασμούς μοντέλων, με τα συχνότερα ΜΠΠ να είναι συνδυασμοί μοντέλων RR-FR ως εξής:

- ▶ **Υδρολογικό Μοντέλο RR**, με το οποίο προσδιορίζεται η απόκριση της λεκάνης απορροής, δηλ. το πλημμυρογράφημα σε μια κατάντη θέση που εξαρτάται από τον τύπο του μοντέλου και την κλίμακα που χρησιμοποιείται. Η θέση αυτή μπορεί να είναι η έξοδος μιας Μονάδας Υδρολογικής Απόκρισης (HRU), δηλ. ενός τμήματος της λεκάνης απορροής στην περίπτωση των κατανεμημένων μοντέλων ή του συνόλου της λεκάνης απορροής.
- ▶ **Υδροδυναμικό Μοντέλο FR**, με το οποίο προσδιορίζεται η χωροχρονική διάδοση του πλημμυρογραφήματος προς τις κατάντη περιοχές ενδιαφέροντος, όπως στις θέσεις πρόγνωσης.

Στην Εικόνα 4.3, φαίνεται η διαδικασία υπολογισμών ενός ΜΠΠ για ξαφνικές πλημμύρες, μετά από τροποποίηση της σχετικής εικόνας του προγράμματος COMET (2022).

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται ένα ολοκληρωμένο ΜΠΠ, το οποίο συνδυάζει το Υδρολογικό Μοντέλο RR HEC-HMS και το Υδροδυναμικό Μοντέλο FR HEC-RAS 1D /2D. Το ΜΠΠ αυτό, προτείνεται για την εφαρμογή του (1) στο ΣΕΠΠ της πόλης της Μάνδρας, και (2) για τον εντοπισμό των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας (βλ. υποκεφάλαιο 8.4).



Εικόνα 4.3: Διαδικασία πρόγνωσης ξαφνικής πλημμύρας (COMET, 2022)

Ολοκληρωμένα μοντέλα των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα ολοκληρωμένα ΜΠΠ που εφαρμόστηκαν στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) (ΥΠΕΝ, 2018) στην Ελλάδα.

Πίνακας 4.2

Ολοκληρωμένα ΜΠΠ που εφαρμόστηκαν στα ΣΔΚΠ (ΥΠΕΝ, 2018)			
Υδατικό Διαμέρισμα	Κωδικός	Υδρολογικό Μοντέλο	Υδροδυναμικό Μοντέλο
Δυτική Πελοπόννησος	EL01	HEC-HMS	HEC-RAS 1D MIKE FLOOD 1D/2D
Βόρεια Πελοπόννησος	EL02	HEC-HMS	HEC-RAS 1D MIKE FLOOD 1D/2D
Ανατολική Πελοπόννησος	EL03	HEC-HMS	HEC-RAS 1D MIKE FLOOD 1D/2D
Δυτική Στερεά Ελλάδα	EL04	HEC-HMS	HEC-RAS 1D /2D (SWE)
Ήπειρος	EL05	HEC-HMS	HEC-RAS 1D /2D (SWE)
Αττική	EL06	HEC-HMS	FLO-2D PRO (1D/2D)

Ανατολική Στερεά Ελλάδα	EL07	HEC-HMS	FLO-2D PRO (1D/2D)
Θεσσαλία	EL08	HEC-HMS	HEC-RAS 1D /2D (SWE)
Δυτική Μακεδονία	EL09	HEC-HMS (GeoHMS)	FLO-2D PRO (1D/2D)
Κεντρική Μακεδονία	EL10	HEC-HMS (GeoHMS)	FLO-2D PRO (1D/2D)
Ανατολική Μακεδονία	EL11	HEC-HMS	FLO-2D PRO (1D/2D)
Θράκη	EL12	HEC-HMS	FLO-2D PRO (1D/2D)
Κρήτη	EL13	HEC-HMS	HEC-RAS 1D MIKE FLOOD 1D/2D
Νήσοι Αιγαίου	EL14	HEC-HMS	FLO-2D PRO (1D/2D)

Για την επιλογή του ΜΠΠ που θα χρησιμοποιηθεί σε μια περιοχή, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις της πρόγνωσης. Μια πρώτη επιλογή που ενδεχομένως θεωρηθεί ως εύλογη και οικονομική, είναι η χρήση των ολοκληρωμένων υδρολογικών-υδροδυναμικών μοντέλων που εφαρμόζονται στα ΣΔΚΠ (ΥΠΕΝ, 2018) για τη χαρτογράφηση των περιοχών του κινδύνου πλημμύρας, με την αιτιολόγηση ότι αυτά περιγράφουν ήδη τις υδρολογικές και υδροδυναμικές διεργασίες στην περιοχή εφαρμογής. Πρακτικά, όμως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια αυτά τα μοντέλα σε ένα ΣΕΠΠ, για τους ακόλουθους λόγους:

- ▶ Τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στα ΣΔΚΠ αναπαριστούν μεμονωμένα πλημμυρικά γεγονότα που παράγονται από επεισόδια βροχής με δεδομένο χρονικό προφίλι (όπως εναλλασσόμενα μπλοκ ή δυσμενέστερη διάταξη) και χρησιμοποιούν στατικές παραμέτρους, δηλ. που δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, και τυποποιημένες συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας (ξηρές, μέσες ή υγρές).
- ▶ Τα υδροδυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στα ΣΔΚΠ (α) εφαρμόζονται με σχετικά μεγάλη χωρική διακριτοποίηση, (β) απαιτούν σχετικά μεγάλους χρόνους υπολογισμού, της τάξης των αρκετών ωρών, και (γ) μπορεί να συναντήσουν προβλήματα αστάθειας των υπολογισμών, που αντιμετωπίζονται τροποποιώντας (π.χ. με δοκιμές) κάποιες παραμέτρους κατά τους υπολογισμούς. Οι παραπάνω χρόνοι συχνά δεν είναι αποδεκτοί για πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο και την παροχή υπηρεσίας έγκαιρης προειδοποίησης πλημμύρας, ιδίως για ξαφνικές πλημμύρες. Επιπλέον, στα μοντέλα των ΣΔΚΠ εξετάζονται τα δυσμενέστερα σενάρια λειτουργίας των υφιστάμενων υδραυλικών τεχνικών έργων, όπως φραγμάτων, αναχωμάτων, δεξαμενών, φρεατίων κ.ά., και όχι τα τρέχοντα έργα.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα ΣΔΠΚ μπορούν όμως να αξιοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα ως βάση για τη δόμηση ΜΠΠ, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα:

- ▶ Τα υδρολογικά μοντέλα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα δυναμικής μεταβολής των απαιτούμενων παραμέτρων και των αρχικών τους συνθηκών, κυρίως της εδαφικής υγρασίας, οι οποίες προσδιορίζονται πριν από τους υπολογισμούς του μοντέλου.
- ▶ Τα υδροδυναμικά μοντέλα πρέπει να εφαρμόζονται με την απαιτούμενη χωρική διακριτοποίηση, μετά τη σχετική εξασφάλιση της ανεξαρτησίας πλέγματος (βλ. υποκεφάλαιο 8.3.3), τον κατά το

δυνατό μικρότερο χρόνο υπολογισμού, μετά την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησής τους (βλ. κεφάλαιο 8.3.4), και την εξασφάλιση υπολογισμών χωρίς αριθμητικά προβλήματα. Παράλληλα, πρέπει να εφαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική τρέχουσα λειτουργία των υφιστάμενων τεχνικών έργων.

4.2.5 Μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται κυρίως μοντέλα φυσικής βάσης, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως ΜΠΠ σε ΣΕΠΠ. Στην πρόγνωση πλημμυρών έχουν εφαρμοστεί και μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη πολυπλοκότητα, σε σύγκριση με τα μοντέλα φυσικής βάσης (Mekanik et al., 2013· Kim et al., 2015). Στα μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα ανήκουν τα ακόλουθα:

- ▶ **Στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα.** Διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν μεθόδους ανάλυσης συχνότητας πλημμύρας (Wright et al., 2020) και αυτά που βασίζονται σε στοχαστικές τεχνικές, όπως τα αυτοπαλινδρομικά μοντέλα κινητού μέσου όρου (ARMA) (Komornik et al., 2006), τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) (Luu et al., 2019), και τα ολοκληρωμένα αυτοπαλινδρομικά μοντέλα κινητού μέσου όρου (ARIMA) (Yan et al., 2022).
- ▶ **Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης (AI).** Περιλαμβάνουν κυρίως τα μοντέλα μηχανικής μάθησης (ML), με πλέον διαδεδομένα τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) (Castangia, et al., 2023).

Στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα

Η ανάλυση συχνότητας πλημμύρας χρησιμοποιείται κυρίως για τη συσχέτιση του μεγέθους των ακραίων γεγονότων απορροής, όπως π.χ. των μεγίστων παροχών σε διατομές υδατορευμάτων με την περίοδο επαναφοράς τους, μέσω συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας (Moges & Taye, 2019). Τα δεδομένα εισόδου είναι συνήθως οι χρονοσειρές των σταθμών μέτρησης στην περιοχή ενδιαφέροντος και το αποτέλεσμα είναι η εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς των ακραίων υδρολογικών φαινομένων. Τα βήματα που ακολουθούνται συνήθως είναι τα ακόλουθα (Saksena, 2017):

- Βήμα 1.** Συλλογή δεδομένων, όπως π.χ. καταγραφές των ετήσιων μεγίστων τιμών της παροχής ενός υδρομετρικού σταθμού.
- Βήμα 2.** Υπολογισμός διάφορων στατιστικών δεικτών των δεδομένων, όπως είναι η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, ο δείκτης ασυμμετρίας και ο δείκτης κύρτωσης.
- Βήμα 3.** Δημιουργία γραφημάτων κατανομής συχνότητας με βάση τους στατιστικούς δείκτες, χρησιμοποιώντας διάφορες στατιστικές κατανομές μεγίστων, όπως Gumbel, κατανομές της οικογένειας Γάμμα (Pearson, Log-Pearson, Generalized Gamma), Generalized Extreme Value (GEV), και Pareto.
- Βήμα 4.** Επιλογή της στατιστικής κατανομής που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα και με βάση αυτή, σχεδιασμός των καμπυλών συχνότητας πλημμύρας.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από αναλύσεις συχνότητας πλημμύρας αφορούν συνήθως μεμονωμένες περιοχές, στις οποίες βρίσκονται οι σταθμοί μέτρησης (National Research Council, 1994) από όπου προέρχονται τα δεδομένα εισόδου. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνεται με την αύξηση του χρονικού διαστήματος για το οποίο υπάρχουν δεδομένα (Moges & Taye, 2019).

Τα στοχαστικά μοντέλα είναι πληρέστερα, καθώς λαμβάνουν υπόψη και τη στατιστική εξάρτηση των διεργασιών στο χώρο και τον χρόνο. Μια τυπική κατηγορία τέτοιων μοντέλων είναι τα στοχαστικά μοντέλα παλινδρόμησης, που αποτελούν το σταθμισμένο άθροισμα μιας σειράς παρελθοντικών μετρήσεων για την πρόγνωση κάποιου υδρολογικού μεγέθους στο άμεσο μέλλον (Luchetta and Maneeti, 2003). Ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το μοντέλο ARMA (Chung & Salas, 2000). Συγκεκριμένα, το μοντέλο ARMA αποτελεί τον συνδυασμό δυο απλούστερων μοντέλων, ή αλλιώς δυο πολυωνύμων, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Το μοντέλο της αυτοπαλινδρόμησης (AR), δηλ. της παλινδρόμησης μιας μεταβλητής με τον εαυτό της, χρησιμοποιώντας p σταθμισμένες προηγούμενες τιμές της μεταβλητής στις χρονικές στιγμές $t-1, t-2, \dots, t-p$ για την εύρεση της τιμής της τη χρονική στιγμή t .
- ▶ Το μοντέλο του κινητού μέσου όρου (MA), δηλ. του γραμμικού συνδυασμού των όρων σφάλματος των προηγούμενων προγνώσεων στις χρονικές στιγμές $t-1, t-2, \dots, t-p$ για την εύρεση της τιμής της μεταβλητής τη χρονική στιγμή t .

Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης

Ο σκοπός των μοντέλων AI είναι να δημιουργήσουν έναν γενικό κανόνα προκειμένου να αντιστοιχούν τα δεδομένα εισόδου τους με τα επιθυμητά αποτελέσματα, χωρίς τη μοντελοποίηση των φυσικών διεργασιών. Η διαδικασία δημιουργίας αυτού του κανόνα λέγεται εκμάθηση (μάθηση ή εκπαίδευση) του μοντέλου, και είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Οι κύριες μέθοδοι εκμάθησης είναι οι ακόλουθες:

- ▶ **Εκμάθηση με επίβλεψη.** Κατά τη διαδικασία αυτή τροποποιούνται διάφορες παράμετροι ενός μοντέλου AI, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των δεδομένων στόχων, για συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου. Συνεπώς, τα δεδομένα στόχοι είναι γνωστά και εισάγονται στο μοντέλο AI από τον χρήστη.
- ▶ **Εκμάθηση χωρίς επίβλεψη.** Κατά τη διαδικασία αυτή τροποποιούνται διάφορες παράμετροι ενός μοντέλου AI, ώστε το μοντέλο να «ανακαλύψει» από μόνο του συσχετίσεις ή ομάδες στα δεδομένα εισόδου, βασισμένο αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά τους, χωρίς να είναι γνωστό αν υπάρχουν συσχετίσεις ή ομάδες και ποιες είναι αυτές. Συνεπώς, σε αυτή τη μέθοδο δεν υπάρχουν δεδομένα στόχοι.

Τα μοντέλα AI έχουν αποδειχθεί πολύ χρήσιμα στον τομέα των πλημμυρών για την πρόγνωση της στάθμης της επιφάνειας ροής και της παροχής σε συγκεκριμένες θέσεις (διατομές) ενός ποταμού (Nayak et al., 2005), της έκτασης της περιοχής κατάκλισης (Nevo et al., 2022), και άλλων χαρακτηριστικών μιας πλημμύρας (Mosavi et al. 2017· Xu & Li, 2002· Ortiz-Garcia et al., 2014). Τα μοντέλα AI που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε εφαρμογές της βιβλιογραφίας μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τις τεχνικές δόμησής τους ως εξής:

- ▶ Στα μοντέλα ANN.
- ▶ Στα μοντέλα FLM.
- ▶ Στα μοντέλα SVR και SVM.
- ▶ Στα μοντέλα Δένδρων Απόφασης (DT).
- ▶ Στα μοντέλα κοντινότερων γειτόνων (kNN).

Για τη δόμηση ενός μοντέλου AI πρόγνωσης πλημμυρών χρησιμοποιούνται τα ιστορικά δεδομένα γεγονότων πλημμύρας και των δεδομένων βροχόμετρων ή άλλων αισθητήρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δεδομένα αυτά είναι της βροχόπτωσης και της στάθμης της επιφάνειας ροής, τα οποία

μετρούνται από βροχόμετρα, ραντάρ ή δορυφόρους (Seo & Breidenbach, 2002· Grecu & Krajewski, 2000). Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των δεδομένων αυτών, τόσο υψηλότερης ακρίβειας είναι η πρόγνωση. Για το λόγο αυτό, συχνά τα μοντέλα AI πετυχαίνουν υψηλότερης ακρίβειας προγνώσεις όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα από ραντάρ (Maddox et al., 2002).

Τα κύρια βήματα δόμησης ενός μοντέλου AI είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1. Συλλογή πρωτογενών δεδομένων από τις πηγές δεδομένων.

Βήμα 2. Επεξεργασία δεδομένων. Έλεγχος των δεδομένων για την ύπαρξη εσφαλμένων μετρήσεων ή/και την παράλειψη μετρήσεων, κανονικοποίηση αυτών, αντικατάσταση ή κατάργηση των εσφαλμένων μετρήσεων και συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα.

Βήμα 3. Ομαδοποίηση και μετασχηματισμός δεδομένων. Κατάταξη των επεξεργασμένων δεδομένων σε τρεις ομάδες: εκπαίδευσης, έλεγχου, επικύρωσης και μετασχηματισμός αυτών στην κατάλληλη μορφή, όπως π.χ. σε πίνακα 2x2 ή 1x4, ανάλογα με το μοντέλο AI που επιλέγεται.

Βήμα 4. Εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο AI για την εκπαίδευση, τον έλεγχο και την επικύρωσή του.

Εφαρμογές μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα

Τα μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα αξιοποιούνται σε εφαρμογές που αφορούν κυρίως τη βραχυπρόθεσμη και τη μεσοπρόθεσμη πρόγνωση. Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται ενδεικτικές εφαρμογές, ομαδοποιημένες σύμφωνα με τον χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης των μοντέλων (Ebtehaj & Bonakdari, 2022· Mosavi et al., 2018).

Πίνακας 4.3

Εφαρμογές μοντέλων AI ως ΜΠΠ			
Χρονικός ορίζοντας πρόγνωσης	Περίπτωση εφαρμογής/ μέγεθος πρόγνωσης	Τύπος μοντέλου	Ερευνητές
Δυτική Πελοπόννησος	Πλημμύρα σε αστική περιοχή	ANN	Shen & Chang (2013), Chang et al. (2014)
	Πλημμύρα	ANN, DT, FLM, SVM	Saghafian et al. (2017), Puttinaovarat & Horkaew (2020)
	Βροχόπτωση	ANN, FLM	Karyotis et al. (2019), Chiang et al. (2007)
	Ξαφνική πλημμύρα	ANN, DT, MLR	Heizer et al. (2015)
Ωριαίος	Ξαφνική πλημμύρα	ANN	Danso-Amoako et al. (2012)
	Πλημμύρα	ANN, FLM	Lohani et al., 2014
	Παροχή αιχμής πλημμύρας	ANN	Kourgialas et al. (2015)
	Στάθμη επιφάνειας ροής	ANN	Kim et al. (2016)
	Βροχόπτωση	DT, SVM	Yu et al. (2017)
	Βροχόπτωση Βάθος ροής	FLM, kNN, SVR	Nguyen & Chen (2020)

Ημερήσιος	Βροχόπτωση και πλημμύρα	ANN, SVM, DT	Nayak & Ghosh (2013), Al-Fawa'Reh et al. (2021)
	Βροχόπτωση, επιφανειακή απορροή και παροχή υδατορέματος	ANN, MLR	Aichouri et al. (2015), Torabi et al. (2019)
	Πλημμύρα	ANN, SVR, MLR	Gizaw & Gan (2016), Adamowski (2008)
	Επιφανειακή απορροή	ANN	Ghose, 2018
	Παροχή	ANN, MLR, ARIMA	Tsakiri et al. (2018), Le et al. (2019), Gupta & Kumar (2022)
	Κατακρημνίσεις	ANN, SVR, DT	Haque et al. (2021)
Μηνιαίος	Βροχόπτωση - Επιφανειακή απορροή	ANN	Ju et al. (2009)
	Εισροή νερού σε φράγμα	ARMA, ARIMA, ANN	Valipour et al. (2013)

Υβριδικά μοντέλα

Τα παραπάνω μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας της πρόγνωσης, την αύξηση του χρονικού ορίζοντα πρόγνωσης και τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Η τεχνική αυτή ονομάζεται υβριδοποίηση και τα μοντέλα που δομούνται κατά αυτόν τον τρόπο ονομάζονται υβριδικά μοντέλα.

Ενδεικτικά, οι Jimeno-Saez et al. (2017) δόμησαν μοντέλα AI για την πρόγνωση γεγονότων ξαφνικής πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο, και ειδικότερα για την πρόγνωση της παροχής αιχμής σε 14 μετρητικούς σταθμούς στην Ισπανία. Σε κάθε θέση συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής (α) δύο εμπειρικών μεθόδων, (β) ενός μοντέλου ANN και (γ) ενός υβριδικού μοντέλου. Το υβριδικό μοντέλο δομήθηκε συνδυάζοντας τα μοντέλα ANN και τις τεχνικές της ασαφούς λογικής. Το αποτέλεσμα τους είχε το χαμηλότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού (R^2). Άλλα υβριδικά μοντέλα είναι τα μοντέλα νευροασαφών συστημάτων (ANFIS), τα οποία εφαρμόστηκαν από τους Mosavi & Edalatifar (2018) και Nayak et al. (2005).

Τα μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα, και ειδικότερα τα υβριδικά μοντέλα, αξιοποιούνται και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η πρόγνωση χαρακτηριστικών της πλημμύρας με μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης. Ενδεικτικά, οι Chang & Chang (2006) δόμησαν ένα μοντέλο αξιοποιώντας ωριαίες μετρήσεις από το 1971 μέχρι το 2001, από πέντε σταθμηγράφους στη λεκάνη απορροής Shihmen της Ταϊβάν, για την πρόγνωση της στάθμης της επιφάνειας ροής. Το μέσο απόλυτο σφάλμα της πρόγνωσης ήταν 0.436 m, 0.741 m και 0.784 m για χρονικό ορίζοντα πρόγνωσης 1, 2 και 3 ώρες, αντίστοιχα. Αντίστοιχα, οι Ebtehaj & Bonakdari (2022) δόμησαν ένα υβριδικό μοντέλο με σκοπό την πρόγνωση της μέγιστης παροχής στο υδατόρεμα Saint-Charles στο Κεμπέκ του Καναδά. Το μέσο σχετικό σφάλμα της πρόγνωσης ήταν μικρότερο από 5% της μέγιστης παροχής, ακόμα και για την περίπτωση όπου ο χρονικός ορίζοντας πρόγνωσης ήταν 9 ώρες μπροστά.

4.3 Εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών

4.3.1 Κλιματική αλλαγή και πλημμύρες

Όπως παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 1.4, οι κύριες επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής (ΚΑ) στη συμπεριφορά των πλημμυρών είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

- ▶ Αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων βροχοπτώσεων.
- ▶ Αύξηση της εδαφικής υγρασίας (αρχικές συνθήκες βροχόπτωσης) σε περιοχές όπου οι συνθήκες γίνονται περισσότερο υγρές με αποτέλεσμα οι πλημμύρες να γίνονται συχνότερες.
- ▶ Αύξηση της βροχόπτωσης στις περιοχές που χιονίζει και αντίστοιχη μείωση της χιονόπτωσης, εξαιτίας της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας.
- ▶ Έμμεσες επιδράσεις εξαιτίας άλλων διεργασιών, όπως π.χ. μεταβολών του ισοζυγίου φερτών υλικών σε ένα υδατόρεμα.

Οι παραπάνω επιπτώσεις πρέπει να προσδιοριστούν ποσοτικά στη χώρα μας, κυρίως στις περιοχές που πλημμυρίζουν, ώστε να είναι δυνατός ο σχεδιασμός των μέτρων και έργων για τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με μια διαδικασία δύο βημάτων που περιλαμβάνει (1) τον καθορισμό των σεναρίων ΚΑ (βλ. υποκεφάλαιο 4.3.2), και (2) την πραγματοποίηση σειράς υπολογισμών με κλιματικά μοντέλα (βλ. υποκεφάλαιο 4.3.3), η οποία περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 4.3.4.

4.3.2 Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Εισαγωγή

Για την εκτίμηση της επίδρασης της ΚΑ θεωρείται μια σειρά από μελλοντικά σενάρια, τα οποία συνδέονται με χρονοσειρές συγκεντρώσεων των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου, την εξέλιξη του παγκόσμιου πληθυσμού και των χρήσεων γης, των κοινωνικό - οικονομικών εξελίξεων, των πηγών ενέργειας και της γενικότερης πολιτικής απέναντι στην ΚΑ στο μέλλον, εκτιμώντας κατά συνέπεια τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Τα κλιματικά σενάρια έχουν προταθεί από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) και περιγράφονται στις σχετικές Εκθέσεις Αξιολόγησης (Assessment Report, AR). Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι τρεις πρόσφατες σειρές σεναρίων που αντιστοιχούν στην τέταρτη, πέμπτη και έκτη AR, που εκδόθηκαν τα έτη 2007, 2013 και 2020, αντίστοιχα.

Σενάρια Εξέλιξης Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου

Στην τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης (AR4) της IPCC (2007) για τα Σενάρια Εκπομπών (SRES) των αερίων του θερμοκηπίου περιγράφονται τέσσερις οικογένειες σεναρίων που ονομάστηκαν A1, A2, B1 και B2. Κάθε σενάριο βασίστηκε σε μια περίπλοκη σχέση μεταξύ των κοινωνικοοικονομικών παραγόντων, που οδηγούν στην εκπομπή αερίων θερμοκηπίου και αερολυμάτων, και των επιπέδων στα οποία θα ανέρχονταν αυτές οι εκπομπές στο τέλος του 21ου αιώνα (2090-2099) σε σχέση με αυτές στο τέλος του 20ου αιώνα (1990-1999). Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των SRES.

Πίνακας 4.4

Κύρια χαρακτηριστικά των SRES		
SRES	Εστίαση στην οικονομία	Εστίαση στο περιβάλλον
Παγκοσμιοποίηση (Ομοιογενής κόσμος)	<p>A1 Γρήγορη οικονομική ανάπτυξη 1.4–6.4 °C</p> <p>Η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη και η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού αυξάνονται μέχρι το 2050. Εκμηδενίζονται οι πολιτιστικές και οικονομικές διαφορές μεταξύ των κοινωνιών.</p>	<p>B1 Παγκόσμια περιβαλλοντική βιωσιμότητα 1.1–2.9 °C</p> <p>Ο κόσμος είναι ενοποιημένος και περιβαλλοντικά ευαίσθητοποιημένος. Εφαρμόζονται λύσεις για τη προστασία του περιβάλλοντος σε παγκόσμιο επίπεδο με εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η αύξηση του πληθυσμού και η πορεία της οικονομίας είναι ίδια με αυτά του σεναρίου A1.</p>
Περιφερειακή αποκέντρωση (Ανομοιογενής κόσμος)	<p>A2 Οικονομική ανάπτυξη προσανατολισμένη στις τοπικές συνθήκες 2.0–5.4 °C</p> <p>Ο κόσμος είναι ετερογενής με αυτοδυναμία και διατήρηση τοπικών ταυτοτήτων. Κάθε κοινωνία διατηρεί τα χαρακτηριστικά της και η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη έχουν τοπικό προσανατολισμό. Η τεχνολογική ανάπτυξη είναι αργή σε σχέση με τα άλλα σενάρια. Ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία.</p>	<p>B2 Τοπική περιβαλλοντική βιωσιμότητα 1.4–3.8 °C</p> <p>Ο κόσμος είναι περιβαλλοντικά ευαίσθητοποιημένος, αλλά υπάρχουν διαφορετικές απόψεις μεταξύ των κοινωνιών σε θέματα οικονομικής και τεχνολογικής εξέλιξης. Ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού δεν είναι τόσο ραγδαίος όσο στα σενάρια A1 και B1.</p>

Αντιπροσωπευτικές Πορείες Συγκέντρωσης

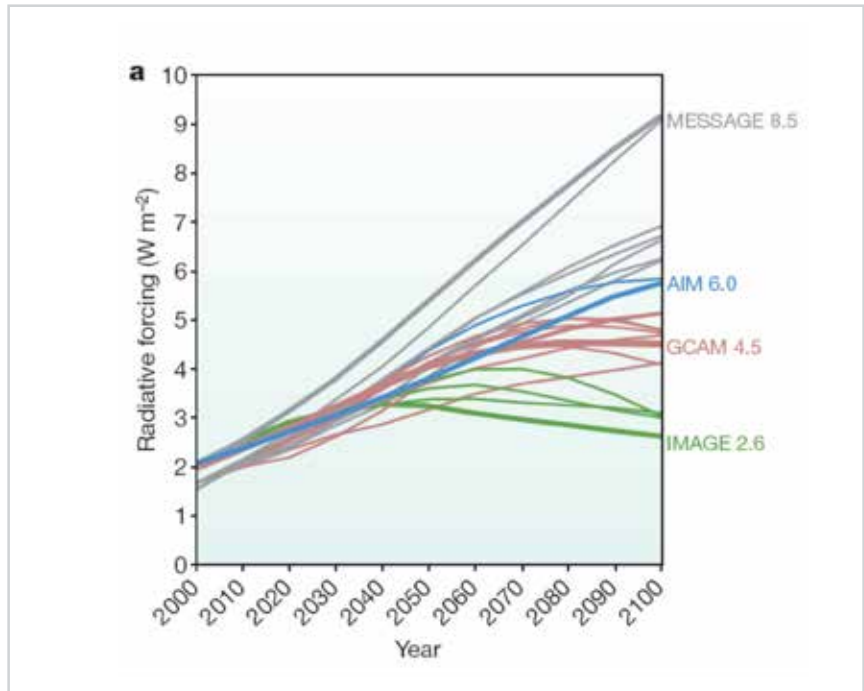
Στην πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης της (AR5), η IPCC (2014) εισήγαγε μια νέα γενιά κλιματικών σεναρίων που κλήθηκαν Αντιπροσωπευτικές Πορείες Συγκέντρωσης (RCP): RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5 (Van Vuuren et al., 2011).

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται τα σενάρια RCP και στον Πίνακα 4.5 τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στα σενάρια RCP, καθώς και η μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης σε σχέση με τις μέσες τιμές της περιόδου 1986–2100 (IPCC, 2014).

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του ρυθμού της πρόσθετης ακτινοβολίας που «επιβάλλεται» στην ατμόσφαιρα από φυσικούς ή ανθρωπογενείς παράγοντες της ΚΑ. Στις σημερινές συνθήκες, με την αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ατμόσφαιρα απορροφά περισσότερη θερμότητα (υπέρουθη ακτινοβολία), με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και την αλληλαγή του παγκόσμιου κλίματος (Κλιματική Αλληλαγή) ως αποτέλεσμα της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας στην ατμόσφαιρα εκτιμάται στην κορυφή της στρατόσφαιρας σε

μονάδες ισχύος ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας (W/m^2) και συχνά συνοψίζεται ως μέσος όρος για τη συνολική επιφάνεια του πλανήτη. Έτσι, στην Εικόνα 4.4, στο σενάριο RCP2.6 (RCP3PD) θεωρείται ότι μέσω δραστηκής πολιτικής παρέμβασης, οι εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου μειώνονται σχεδόν αμέσως, οδηγώντας σε ελαφρά μείωση περίπου στα σημερινά επίπεδα μέχρι το 2100. Στο σενάριο RCP4.5, οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου αυξάνονται μέχρι το 2040 οπότε λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνονται, ενώ το 2100 κάθε τετραγωνικό μέτρο στη κορυφή της ατμόσφαιρας θα δέχεται κατά μέσο όρο $4.5 W$ περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τη περίοδο 1986-2005. Τέλος, στο δυσμενέστερο ακραίο σενάριο RCP8.5 θεωρείται ότι οι εκπομπές ουσιαστικά δεν μειώνονται καθόσον δεν λαμβάνονται μέτρα μετριασμού των εκπομπών.



Εικόνα 4.4: Χρονική εξέλιξη του ρυθμού της πρόσθετης ακτινοβολίας σε σχέση με τις προβιομηχανικές συνθήκες. Οι λεπτές γραμμές δείχνουν μεμονωμένα σενάρια από περίπου 30 σενάρια RCP που παρέχουν πληροφορίες για όλους τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιβολή ακτινοβολίας (Moss et.al., 2010)

Πίνακας 4.5

Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια RCP και αντίστοιχη μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας (°C) στην επιφάνεια της γης σε σχέση με τις μέσες τιμές της περιόδου 1986–2100 (IPCC, 2014)			
Σενάριο	Μοντέλο	2046–2065	2081–2100
RCP2.6	IMAGE	1.0 (0.4-1.6)	1.0 (0.3-1.7)
RCP4.5	GCAM	1.4 (0.9-2.0)	1.8 (1.1-2.6)
RCP6.0	AIM	1.3 (0.8-1.8)	2.2 (1.4-3.1)
RCP8.5	MESSAGE	2.0 (1.4-2.6)	3.7 (2.6-4.8)

Κοινές Κοινωνικοοικονομικές Πορείες

Οι Κοινές Κοινωνικοοικονομικές Πορείες (SSP) είναι πέντε νεότερα κλιματικά σενάρια που περιγράφουν ευρείες κοινωνικοοικονομικές τάσεις που θα μπορούσαν να διαμορφώσουν το μελλοντικό κόσμο μέχρι το 2100.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των σεναρίων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6

Χαρακτηριστικά του μελλοντικού κόσμου στα σενάρια SSP (IPCC, 2014)	
Σενάριο	Χαρακτηριστικά
SSP1	Ένας κόσμος ανάπτυξης και ισότητας με επίκεντρο τη βιωσιμότητα. Τα παγκόσμια κοινά αγαθά διατηρούνται, τα όρια της φύσης γίνονται σεβαστά, η εστίαση είναι περισσότερο στην ανθρώπινη ευημερία παρά στην οικονομική ανάπτυξη, οι εισοδηματικές ανισότητες μεταξύ των κρατών και εντός των κρατών μειώνονται και η κατανάλωση προσανατολίζεται στην ελαχιστοποίηση της χρήσης ορυκτών πόρων και ενέργειας.
SSP2	Ένας κόσμος με τάσεις που ακολουθούν σε γενικές γραμμές τα ιστορικά τους πρότυπα – Η μέση πορεία. Οι τάσεις του εισοδήματος στις διάφορες χώρες αποκλίνουν σημαντικά, υπάρχουν συνεργασίες μεταξύ των κρατών χωρίς όμως αυτές να επεκτείνονται, η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού είναι μέτρια και σταθεροποιείται στο δεύτερο μισό του αιώνα και τα περιβαλλοντικά συστήματα αντιμετωπίζουν υποβάθμιση.
SSP3	Ένας κατακερματισμένος κόσμος με τοπικές αντιπαρότητες και συγκρούσεις. Αναβιώνει ο εθνικισμός, οι τοπικές συγκρούσεις ωθούν τα παγκόσμια ζητήματα στο παρασκήνιο, οι πολιτικές επικεντρώνονται όλο και περισσότερο σε εθνικά και τοπικά ζητήματα, οι επενδύσεις στην εκπαίδευση και την τεχνολογική ανάπτυξη μειώνονται, η ανισότητα αυξάνεται και ορισμένες περιοχές υφίστανται σημαντικές περιβαλλοντικές ζημιές.
SSP4	Ένας κόσμος με διαρκώς αυξανόμενη ανισότητα. Το χάσμα μεταξύ των ανεπτυγμένων κοινωνιών που συνεργάζονται παγκοσμίως και εκείνων που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο ανάπτυξης με χαμηλό εισόδημα και χαμηλό επίπεδο εκπαίδευσης διευρύνεται και οι περιβαλλοντικές πολιτικές είναι επιτυχείς στην αντιμετώπιση τοπικών προβλημάτων σε ορισμένες περιοχές.
SSP5	Ένας κόσμος ταχείας και απεριόριστης ανάπτυξης στην οικονομική παραγωγή και τη χρήση ενέργειας. Οι παγκόσμιες αγορές ενοποιούνται ολόένα και περισσότερο οδηγώντας σε καινοτομίες και τεχνολογική πρόοδο. Η κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη βασίζεται στην εντατική εκμετάλλευση των πόρων ορυκτών καυσίμων με υψηλό ποσοστό άνθρακα και σε έναν ενεργοβόρο τρόπο ζωής παγκοσμίως. Η παγκόσμια οικονομία αναπτύσσεται και τα τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, αντιμετωπίζονται με επιτυχία.

Στα σενάρια SSP θεωρείται ότι δεν εφαρμόζεται κάποια πολιτική για το κλίμα που υπερβαίνει τα σημερινά μέτρα ή κάποια μέτρα προσαρμογής στη συνεχιζόμενη ΚΑ. Υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με απλά ολοκληρωμένα μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων, που προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση της οικονομίας, της κοινωνίας και του κλιματικού συστήματος, έδειξαν ότι οι πορείες των σεναρίων RCP (βλ. Εικόνα 4.4) και οι αντίστοιχοι κλιματικοί στόχοι, όπως ο στόχος 2°C, δεν είναι εφικτοί, εξαιτίας της ισχυρής επίδρασης των αερίων θερμοκηπίου. Έτσι, για να ενσωματωθούν οι κλιματικές πολιτικές που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων, σχεδιάστηκαν πρόσθετες «Κοινές Υποθέσεις Πολιτικής για το Κλίμα» (“Shared Climate Policy Assumptions”) (Kriegler et al., 2014), οι οποίες περιγράφουν διάφορες προσπάθειες εφαρμογής πολιτικών για τον περιορισμό και την προσαρμογή στην ΚΑ. Χωρίς πρόσθετα μέτρα προστασίας του κλίματος, οι κοινωνικοοικονομικές πορείες SSP1 και SSP2 θα έδιναν πρόσθετη ακτινοβολία περίπου 5.0 W/m² και 6.5 W/m² (Riahi et al., 2017), αντίστοιχα.

Προκειμένου να δομηθούν διάφορα σενάρια SSP χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τρεις παράγοντες:

- ▶ ο βαθμός της ΚΑ ή καλύτερα η πρόσθετη ακτινοβολία,
- ▶ οι βασικές πορείες SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 και SSP5, και
- ▶ οι πολιτικές που εφαρμόζονται για την προστασία του κλίματος.

Ένα από τα σημαντικότερα επιστημονικά πειράματα ανάπτυξης σεναρίων που διερευνώνται σήμερα είναι η δράση MIP (Model Intercomparison Project). Αυτή αποτελεί την κύρια δραστηριότητα της φάσης 6 του έργου CMIP6, που παρέχει κλιματικές προβολές πολλαπλών μοντέλων με βάση εναλλακτικά σενάρια μελλοντικών εκπομπών και αλληλαγών χρήσης γης που παράγονται με ολοκληρωμένα μοντέλα (βλ. παρακάτω). Για τους σκοπούς της MIP, καθορίστηκαν τέσσερα τυπικά σενάρια, τα οποία όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.7 συμπληρώνουν τέσσερις θέσεις σε έναν πίνακα σεναρίων (O'Neill et al., 2016).

Πίνακας 4.7

Τα τέσσερα τυπικά σενάρια SSP του πίνακα σεναρίων (IPCC, 2021)					
W/m ²	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
8.5					SSP585
7.0			SSP370		
6.0					
4.5		SSP245			
3.4					
2.6	SSP126				
1.9					

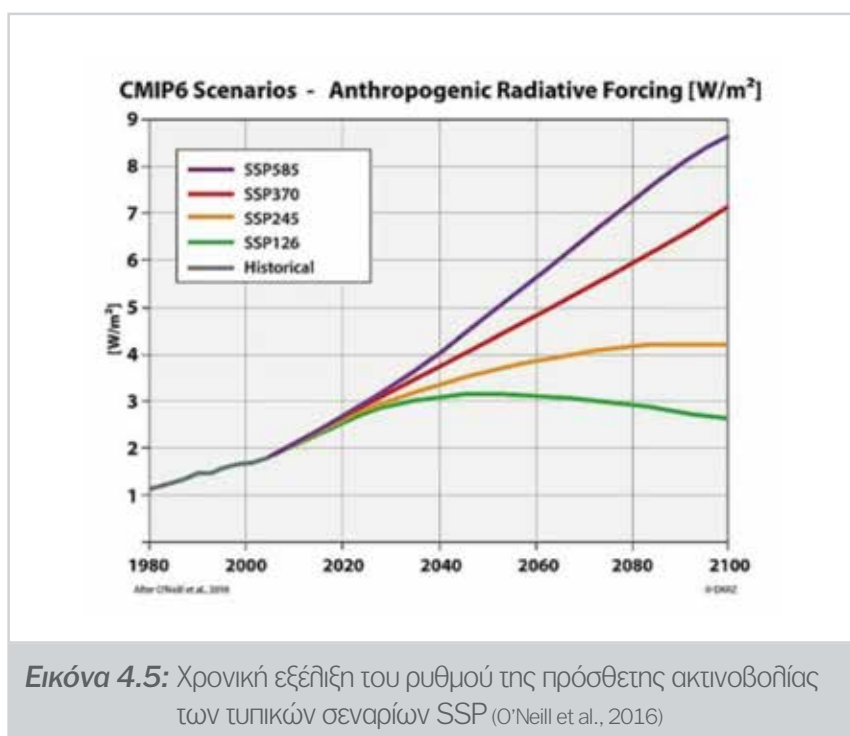
Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι εκπομπές, σχόλια και η μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας (°C) στην επιφάνεια της γης σε σχέση με τις μέσες τιμές της περιόδου 1850–1900 για τα τυπικά σενάρια SSP (IPCC, 2021· DKRZ, 2022).

Πίνακας 4.8

Εκπομπές, σχόλια και μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας (°C) στην επιφάνεια της γης σε σχέση με τις μέσες τιμές της περιόδου 1850–1900 για τα τυπικά σενάρια SSP (IPCC, 2021)				
Σενάριο	Εκπομπές / Σχόλια	2021–2040	2041–2060	2081–2100
SSP126	Αέρια θερμοκηπίου: Χαμηλές CO ₂ : Μηδενικές το 2075. Ανανεωμένο RCP2.6, στο οποίο θεωρείται ότι λαμβάνουμε μέτρα προστασίας του κλίματος. Σχεδιάστηκε με στόχο την προσομοίωση μιας εξέλιξης που είναι συμβατή με τον στόχο 2°C.	1.5 (1.2-1.8)	1.7 (1.3-2.2)	1.8 (1.3-2.4)
SSP245	Αέρια θερμοκηπίου: Μέσες CO ₂ : Στα σημερινά επίπεδα μέχρι το 2050 και μετά μειώνονται χωρίς να μηδενιστούν το 2100. Ανανεωμένο RCP4.5, στο οποίο θεωρείται ότι λαμβάνουμε μέτρα προστασίας του κλίματος.	1.5 (1.2-1.8)	2.0 (1.6-2.5)	2.7 (2.1-3.5)

SSP370	Αέρια θερμοκηπίου: Υψηλές CO ₂ : Διπλασιάζονται μέχρι το 2100. Άνω-μεσαίο τμήμα των σεναρίων, ενδιάμεσο των RCP6.0 και RCP8.	1.5 (1.2-1.8)	2.1 (1.7-2.6)	3.6 (2.8-4.6)
SSP585	Αέρια θερμοκηπίου: Πολύ υψηλές CO ₂ : Τριπλασιάζονται μέχρι το 2075. Αντιπροσωπεύει το ανώτερο όριο του εύρους των σεναρίων που περιγράφονται στη βιβλιογραφία. Μπορεί να θεωρηθεί ως ανανεωμένο RCP8.5 που περιλαμβάνει κοινωνικοοικονομικούς λόγους.	1.3 (1.6-1.9)	2.4 (1.9-3.0)	4.4 (3.3-5.7)

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του ρυθμού της πρόσθετης ακτινοβολίας των τυπικών σεναρίων SSP (O'Neill et al., 2016).

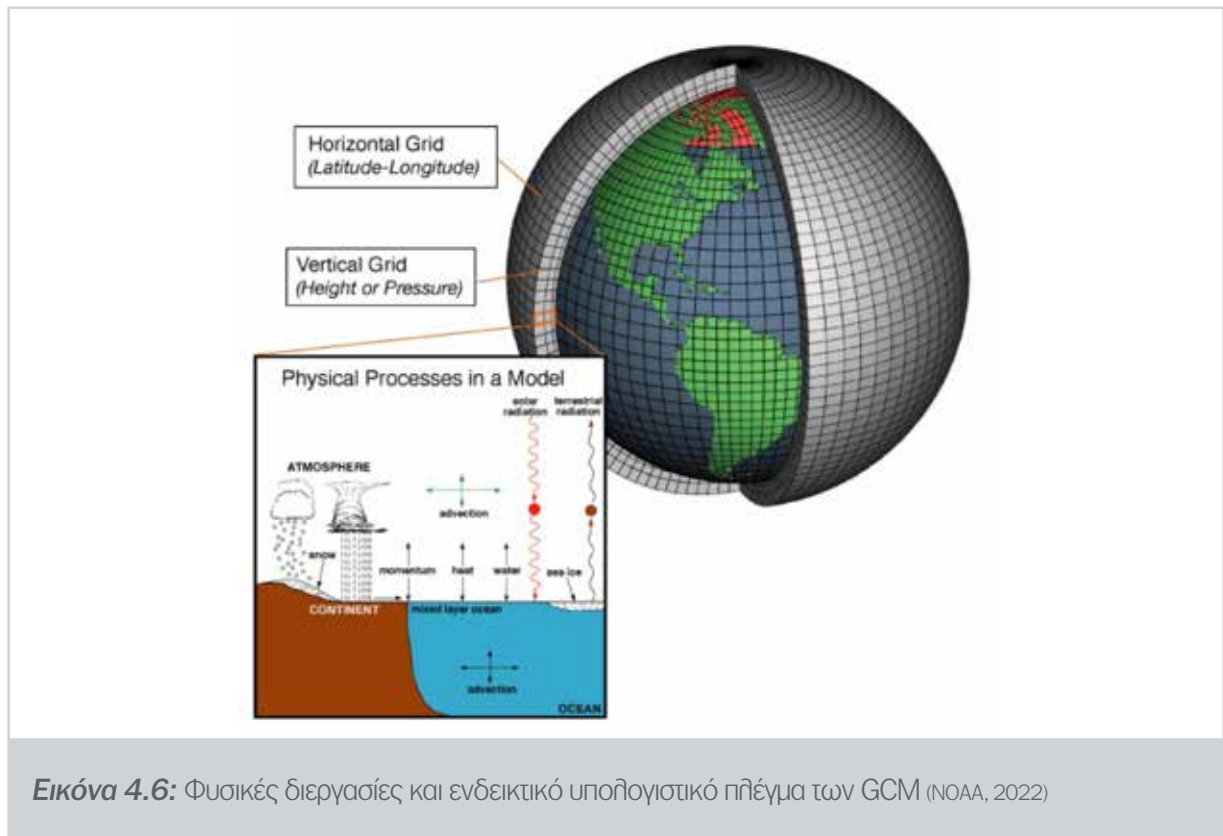


Εικόνα 4.5: Χρονική εξέλιξη του ρυθμού της πρόσθετης ακτινοβολίας των τυπικών σεναρίων SSP (O'Neill et al., 2016)

4.3.3 Κλιματικά μοντέλα

Παγκόσμια κλιματικά μοντέλα

Τα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (Global Climate Models, GCM) ή ακριβέστερα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCM) είναι μαθηματικά μοντέλα, που αποτελούνται από εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα, την επιφάνεια της γης, τον ωκεανό και τις πολικές περιοχές (βλ. Εικόνα 4.6). Οι κύριες εξισώσεις των GCM είναι επτά και βασίζονται στις έξι αρχές διατήρησης, της μάζας του αέρα, της μάζας του νερού, της ενέργειας, και της ποσότητας κίνησης (ορμής) του αέρα, και στο νόμο των ιδεατών αερίων στον αέρα. Επιλύοντας τις εξισώσεις αυτές, προσδιορίζονται επτά μεταβλητές που είναι η θερμοκρασία του αέρα, η πίεση, η πυκνότητα, η περιεκτικότητα υδρατμών και ο άνεμος σε τρεις διευθύνσεις (MIT, 2022).



Εικόνα 4.6: Φυσικές διεργασίες και ενδεικτικό υπολογιστικό πλέγμα των GCM (NOAA, 2022)

Υπολογιστικό πλέγμα, ακρίβεια και αξιοπιστία κλιματικών μοντέλων

Η επίλυση των εξισώσεων των GCM γίνεται σε τρισδιάστατα (3D) πλέγματα, όπως φαίνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 4.6. Τα μοντέλα αυτά έχουν τυπική οριζόντια διάσταση 250–600 km σε όλο τον κόσμο και 10–20 κάθετες στρώσεις στην ατμόσφαιρα και περίπου 30 στρώσεις στους ωκεανούς. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται στον χώρο (με τις παραπάνω διαστάσεις) και στον χρόνο με (χρονικά) βήματα λεπτών, ωρών, ημερών ή ετών. Όσο μικρότερη είναι η διάσταση του πλέγματος και το χρονικό βήμα, τόσο ακριβέστεροι είναι οι υπολογισμοί του μοντέλου (MIT, 2022).

Το κλίμα της Γης επηρεάζεται από διεργασίες και μεταβλητές που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν άμεσα, όπως π.χ. ένα σύννεφο, το οποίο είναι πολύ μικρότερο από τη διάσταση του πλέγματος του μοντέλου, οπότε το μοντέλο δεν μπορεί να «δει» μεμονωμένα σύννεφα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν «παραμετροποιήσεις» ή απλοποιημένες εξισώσεις, που περιγράφουν ικανοποιητικά τις διεργασίες, όπως ενδεικτικά είναι η βροχόπτωση, η χιονόπτωση και η εξάτμιση.

Η εξακρίβωση της αξιοπιστίας ενός κλιματικού μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας διαδικασίας κατά την οποία πραγματοποιούνται υπολογισμοί από σήμερα προς το παρελθόν και συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις τότε παρατηρούμενες κλιματικές και καιρικές συνθήκες, για να εκτιμηθεί πόσο καλά ταιριάζουν μεταξύ τους (hind-casting). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τον έλεγχο της ακρίβειας των κλιματικών μοντέλων και, εάν χρειάζεται, την τροποποίηση των εξισώσεων τους. Επιστημονικές ομάδες σε όλο τον κόσμο δοκιμάζουν και συγκρίνουν τα αποτελέσματα των μοντέλων τους με παρατηρήσεις και αποτελέσματα άλλων μοντέλων (NOAA, 2022).

Περιοχικά κλιματικά μοντέλα

Εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεων πλέγματος που έχουν τα GCM καλύπτουν ολόκληρη τη Γη και μπορούν να δείξουν τις κλιματικές τάσεις με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο σε πολύ μεγάλη κλίμακα, όπως π.χ. τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην Ελλάδα, αλλά όχι στην Αθήνα. Τα Περιοχικά Κλιματικά Μο-

ντέλα (Regional Climate Models, RCM) εστιάζουν σε συγκεκριμένες περιοχές και έχοντας διαστάσεις πλέγματος της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων μπορούν να αναπαριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια την τοπογραφία και τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Έτσι, μπορούν να προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τον τρόπο με τον οποίο η ΚΑ επηρεάζει περιορισμένες περιοχές, όπως π.χ. πώς αναμένεται να μεταβληθεί η βροχόπτωση στα επόμενα 40 έτη στην περιοχή της Αθήνας, ή πώς η αλλαγή χρήσεων γης σε μια περιοχή θα επηρεάσει το μελλοντικό τοπικό κλίμα της.

Γενικά, τα GCM μπορούν να εφαρμοστούν για την κατανόηση των συνεπειών των ανθρώπινων ενεργειών σε ολόκληρο τον κόσμο, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των GCM από την IPCC, για την αξιολόγηση των ενεργειών που απαιτούνται για την επίτευξη των παγκόσμιων κλιματικών στόχων που ορίζονται στη Συμφωνία του Παρισιού. Συνήθως, εφαρμόζονται τα RCM για τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η ΚΑ επηρεάζει τομείς, όπως τη γεωργία, την ενέργεια, την υγεία και συγκεκριμένα οικοσυστήματα, και για την κατάρτιση των σχεδίων προσαρμογής στη μελλοντική ΚΑ (βλ. ΠΕΣΠΚΑ, 2020).

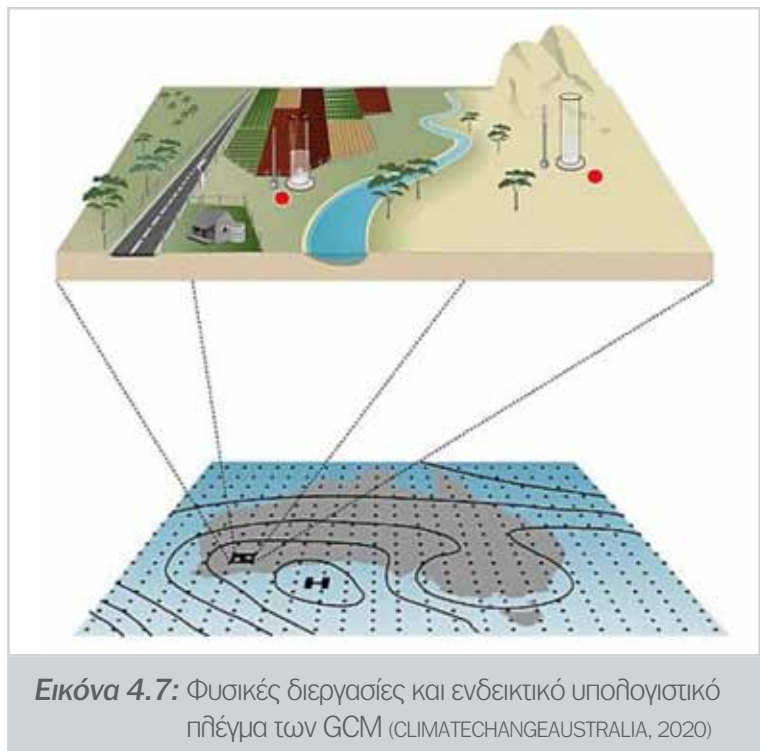
Κλιματικά μοντέλα και μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Πρακτικά, τα κλιματικά μοντέλα μπορεί να θεωρηθούν ότι αποτελούν επέκταση των ΜΠΚ (βλ. υποκεφάλαιο 3.5). Τα ΜΠΚ ξεκινούν από το παρόν και πραγματοποιούν προγνώσεις για συγκεκριμένες περιοχές ανά μικρά χρονικά διαστήματα, παρέχοντας μια λεπτομερή εικόνα της αναμενόμενης ημερήσιας εξέλιξης των καιρικών συνθηκών.

Τα κλιματικά μοντέλα είναι πιθανολογικά και εκτιμούν πώς θα αλλάξουν οι μέσες κλιματικές συνθήκες σε μια περιοχή στις επόμενες δεκαετίες, εντοπίζοντας τις περιοχές με μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι θερμότερες ή ψυχρότερες και πιο υγρές ή ξηρές από το συνηθισμένο, βασιζόμενα σε παγκόσμια μοτίβα και σε ιστορικά δεδομένα των τύπων καιρού που εμφανίστηκαν στο παρελθόν.

Υποκλιμάκωση κλιματικών μοντέλων

Με τα GCM πραγματοποιούνται υπολογισμοί σε πολύ αδρά πλέγματα διαστάσεων που συχνά είναι μεγαλύτερες από 100 km x 100 km. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ανάλυση αυτή δεν είναι επαρκής για πολλές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν πολύ μικρότερες διαστάσεις πλέγματος, ώστε να λαμβάνονται καλύτερα υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως π.χ. το τοπικό κλίμα και η τοπική τοπογραφία. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με μια υπολογιστική διαδικασία που καλείται υποκλιμάκωση ή καταβίβαση κλίμακας (downscaling), με την οποία υπολογισμοί των GCM μετατρέπονται σε πληροφορίες υψηλότερης ανάλυσης (CLIMATECHANGEAUSTRALIA, 2020), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Φυσικές διεργασίες και ενδεικτικό υπολογιστικό πλέγμα των GCM (CLIMATECHANGEAUSTRALIA, 2020)

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την υποκλιμάκωση των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου:

- ▶ **Δυναμική υποκλιμάκωση.** Χρησιμοποιούνται μοντέλα κλίματος μικρότερης διάστασης πλέγματος, που μπορεί να είναι τα RCM, στα οποία εφαρμόζονται οι ίδιες διεργασίες των GCM και οι οριακές συνθήκες από αυτά, καθώς και δεδομένα παρατηρήσεων για να προσδιοριστεί το τοπικό κλίμα. Η μέθοδος αυτή έχει πολλή πλεονεκτήματα, αλλά απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς πόρους, μεγάλους όγκους δεδομένων και υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας (COPERNICUS, 2022).
- ▶ **Στατιστική υποκλιμάκωση.** Δημιουργούνται στατιστικές σχέσεις μεταξύ των ιστορικών παρατηρούμενων κλιματικών δεδομένων και των κλιματικών χαρακτηριστικών που υπολογίζονται με τα GCM για την ίδια ιστορική περίοδο. Σε αντίθεση με τη δυναμική υποκλιμάκωση, οι στατιστικές μέθοδοι είναι εύκολο να εφαρμοστούν και να ερμηνευτούν, απαιτούν ελάχιστους υπολογιστικούς πόρους, αλλά βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στις ιστορικές παρατηρήσεις του κλίματος. Η στατιστική υποκλιμάκωση συνδυάζεται με τη διαδικασία διόρθωσης μεροληπτικών σφαλμάτων των GCM.

Διασυγκρίσεις κλιματικών μοντέλων CMIP και CORDEX

Τα κλιματικά μοντέλα ενημερώνονται και βελτιώνονται συνεχώς από πολλές ομάδες ερευνητών σε όλο τον κόσμο, π.χ. με την αύξηση της χωρικής ανάλυσης των πλεγμάτων υπολογισμών ή την προσθήκη νέων φυσικών διεργασιών. Αυτές οι ερευνητικές ομάδες πραγματοποιούν με τα μοντέλα τους τυποποιημένα υπολογιστικά πειράματα και δημοσιεύουν τα αποτελέσματά τους, έτσι ώστε αυτά να καθίστανται συγκρίσιμα (Riahi et al., 2017).

Η διαδικασία αυτή της διασύγκρισης των μοντέλων πραγματοποιείται μέσω έργων – προγραμμάτων συνεργασίας μεταξύ επιστημονικών/ερευνητικών ιδρυμάτων. Συνοπτικά, περιλαμβάνει την ανάπτυξη των κλιματικών μοντέλων, την αξιολόγησή τους στη προσομοίωση του πρόσφατου παρελθόντος κλίματος, και στην πραγματοποίηση υπολογισμών εκτιμήσεων των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.

Δύο από τα πλέον σημαντικότερα έργα διασύγκρισης είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Το Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), το οποίο ξεκίνησε το 1995 και σε διάφορες φάσεις του δημοσιεύονται τα αποτελέσματα των μοντέλων. Οι δυο τελευταίες φάσεις του είναι η πέμπτη και η έκτη, οι οποίες καλούνται CMIP5 and CMIP6, αντίστοιχα (WCRP, 2022).
- ▶ Το Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX, 2022), το οποίο έχει ως αποστολή τη διοργάνωση ενός διεθνώς συντονισμένου πλαισίου για την παραγωγή βελτιωμένων περιοχικών προγνώσεων για την ΚΑ για όλες τις χερσαίες περιοχές παγκοσμίως. Ο ευρωπαϊκός κλάδος του CORDEX είναι το EURO-CORDEX (2022).

Το CMIP είναι το τυπικό πειραματικό πρωτόκολλο για τη διερεύνηση των υπολογισμών των GCM παρέχοντας μια υποδομή που υποστηρίζει τη διάγνωση, την επικύρωση, τη διασύγκριση, την τεκμηρίωση και την πρόσβαση σε δεδομένα κλιματικών μοντέλων. Αυτό το πλαίσιο επιτρέπει στην διεπιστημονική κοινότητα των ερευνητών να αναλύει τα GCM με συστηματικό τρόπο, μια διαδικασία που συνεισφέρει στη βελτίωσή τους. Η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης (AR5) της IPCC (2014) περιείχε κλιματικά μοντέλα της φάσης CMIP5 (2022) και η έκτη έκθεση αξιολόγησης (AR6), IPCC (2021) περιλαμβάνει νέα μοντέλα CMIP6 (2022) τελευταίας τεχνολογίας. Τα δεδομένα του CMIP6 βασίζονται σε υπολογιστικά πειράματα από περίπου 100 διαφορετικά κλιματικά μοντέλα που παράγονται σε 50 ομάδες μοντελοποίησης (CMIP6, 2022). Συνδυάζοντας πολλά διαφορετικά μοντέλα και πραγματοποιώντας πολλαπλές προσομοιώσεις, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με το πλήρες φάσμα πιθανών μελλοντικών κλιματικών αλλαγών με τις σχετικές αβεβαιότητές τους (Eyring et al., 2016).

Το CORDEX είναι υπεύθυνο για την προώθηση και τον συντονισμό της επιστήμης και της εφαρμογής των περιοχικών κλιματικών μοντέλων υποκλιμάκωσης μέσω παγκόσμιων συνεργασιών.

Τα έργα CMIP και CORDEX υποστηρίζονται από το Παγκόσμιο Πρόγραμμα Έρευνας για το Κλίμα (World Climate Research Program, WRCP). Πληροφορίες για αυτά μπορεί να βρεθούν στις εκθέσεις αξιολόγησης της IPCC (2014).

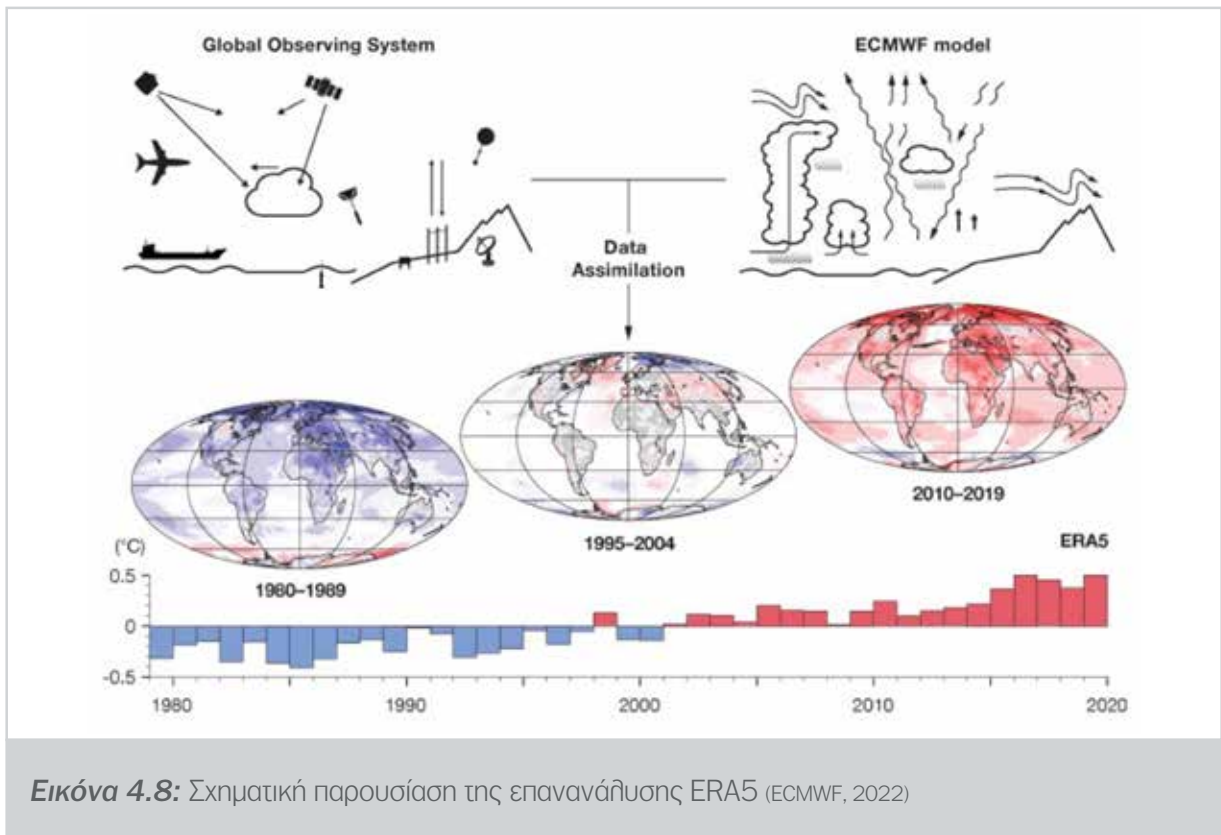
Επανάληψη κλίματος ERA5

Με την επανάληψη του κλίματος, συνδυάζονται (1) δεδομένα παρατηρήσεων και (2) μοντέλα για τη δημιουργία νέων δεδομένων, τα οποία είναι χρονοσειρές πολλών κλιματικών μεταβλητών.

Τα δεδομένα που δημιουργούνται είναι:

- ▶ ομοιόμορφα κατανομημένα στο χρόνο και στο χώρο, σε αντίθεση με τις αρχικές παρατηρήσεις, η κατανομή των οποίων δεν είναι ομοιόμορφη, και
- ▶ πλήρη, δηλ. συνεχή στο χρόνο χωρίς κενά.

Ενδεικτικά, περιγράφεται συνοπτικά η ERA5 (Hersbach et al., 2020) που είναι η πέμπτη και πλέον πρόσφατη επανάληψη για το παγκόσμιο κλίμα, η οποία παρήχθη από την ECMWF (2022) και φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8: Σχηματική παρουσίαση της επανάληψης ERA5 (ECMWF, 2022)

Στην ERA4 χρησιμοποιείται το ΜΠΚ IFS (βλ. κεφάλαιο 3), στο οποίο εισάγονται ως δεδομένα οι κλιματικές συνθήκες που είναι ένα σενάριο KA, όπως το CMIP5, και οι οριακές συνθήκες στην επιφάνεια της θάλασσας. Περισσότερα στοιχεία για το μοντέλο IFS και συγκεκριμένα για την έκδοση Cycle 41r2, που εφαρμόζεται σήμερα, μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία (IFS, 2018).

Το ERA5 παρέχει ωριαία, ημερήσια και μηνιαία δεδομένα από το 1950 για εκατοντάδες μεταβλητές με διάσταση πλέγματος περίπου 30 km σε 137 επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι το υψόμετρο των 80 km (περίπου). Σήμερα, το σύνολο δεδομένων της ERA5 χρησιμοποιεί περισσότερες από 100 δισεκατομμύρια παρατηρήσεις και καταλαμβάνει περισσότερο από 9 PB χώρο αποθήκευσης, με περίπου το 25% των πιο απαιτούμενων δεδομένων να είναι αποθηκευμένα σε δίσκο για γρήγορη πρόσβαση (Bell et al., 2021).

Μαζί με την ERA5, παράγεται το σύνολο δεδομένων ERA5-Land το οποίο είναι διαθέσιμο για δημόσια χρήση για την περίοδο από το 1950 μέχρι 2-3 μήνες πριν από σήμερα. Το ERA5-Land παρέχει δεδομένα κάθε ώρα για μια σειρά μεταβλητών επιφάνειας που βασίζονται στην ERA5 έχοντας μικρότερη διάσταση πλέγματος που είναι ίση με περίπου 9 km. Το ERA5-Land περιλαμβάνει πληροφορίες για αβεβαιότητες για όλες τις μεταβλητές σε μειωμένες χωρικές και χρονικές αναλύσεις (Munoz-Sabater et al. 2021).

Ενδεικτικές εφαρμογές στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο του έργου «Κατάρτιση του Περιφερειακού Σχεδίου για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή Περιφέρειας Αττικής» (ΠΕΣΠΚΑ, 2020) και ειδικότερα στο παραδοτέο 5, «Σενάρια κλιματικής αλλαγής με χρήση του επιλεγμένου περιφερειακού κλιματικού μοντέλου» πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- ▶ **Σενάρια ΚΑ.** Θεωρήθηκαν δύο σενάρια, το μέτριο σενάριο RCP4.5 και το ακραίο σενάριο RCP8.5 (βλ. Πίνακα 4.6).
- ▶ **Κλιματικό μοντέλο.** Εφαρμόστηκε το RCM WRF έκδοσης v3.9.1 (Skamarock et al., 2008). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε τριπλό πλέγμα, όπου το πρώτο πλέγμα περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Ελλάδας με χωρική ανάλυση 9 km x 9 km, το δεύτερο την ευρύτερη περιοχή της Στερεάς Ελλάδας και της ανατολικής Πελοποννήσου με χωρική ανάλυση 3 km x 3 km και το τρίτο είναι εστιασμένο στην ευρύτερη Περιφέρεια Αττικής με χωρική ανάλυση 1 km x 1 km. Στον κατακόρυφο άξονα θεωρήθηκαν 38 επίπεδα Eta (έως τα 50 hPa) με μεγαλύτερη ανάλυση κοντά στην επιφάνεια και πάνω από το αστικό οριακό στρώμα.
- ▶ **Αρχικές και οριακές συνθήκες.** Οι αρχικές, πλευρικές και οριακές συνθήκες ελήφθησαν από τα δεδομένα των GCM Era-Interim Project (NCAR, 2023) με χωρική ανάλυση από 1.125ο x 1.125ο έως 0.703ο x 0.703ο και ανανέωση κάθε 6 ώρες.

Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου IMPACT2C που είχε ως στόχο την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της ΚΑ από μια άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 2°C, εξετάστηκε το υδατικό ισοζύγιο του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης υπό ένα διατομεακό πρίσμα σχετικά με τις ανάγκες νερού (αγροτικός τομέας, τουρισμός, ύδρευση, κ.ά.). Συνοπτικά, πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- ▶ **Σενάρια ΚΑ.** Καθορίστηκαν τέσσερις εύλογοι συνδυασμοί σεναρίων συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου - κοινωνικοοικονομικών εξελίξεων (SSP1-RCP4.5, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP4.5, και SSP3-RCP8.5 (βλ. Πίνακα 4.7).
- ▶ **Κλιματικό μοντέλο.** Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πέντε ζεύγη GCM - RCM: (1) KNMI-RACMO22E, (2) SMHI-RCA4, (3) IPSL-INERIS-WRF331F, (4) SMHI-RCA4, και (5) CSC-REMO του προγράμματος Euro-CORDEX πλεγματικής ανάλυσης 0.11°, των οποίων τα αποτελέσματα υπέστησαν επεξεργασία με στατιστική υποκλιμάκωση σε επίπεδο σταθμού προκειμένου να τροφοδοτήσουν το μοντέλο επιπτώσεων της ΚΑ.

Στο πλαίσιο του έργου AQUAMAN (2016) που είχε στόχο να συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη διαχείριση του Υδατικού Διαμερίσματος της Κρήτης και στο υφιστάμενο Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- ▶ **Σενάρια ΚΑ.** Θεωρήθηκαν τα τρία σενάρια RCP2.6, RCP4.5 και RCP8.5 (βλ. Πίνακα 4.5).
- ▶ **Κλιματικό μοντέλο.** Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα τρία κλιματικά πειράματα: (1) ENSEMBLES, (2) NARCCAP και (3) CORDEX. Τα δυο πρώτα αποτελούν «προηγούμενης» γενιάς πειράματα, καθώς είχαν εκτελεστεί με χρήση οριακών συνθηκών από GCM του CMIP3, τα οποία παρείχαν προσομοιώσεις για τα προηγούμενης γενιάς σενάρια SRES.

4.3.4 Μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των πλημμυρών

Στο υποκεφάλαιο 1.1 αναφέρθηκαν συνοπτικά οι κύριες επιπτώσεις της ΚΑ στη συμπεριφορά των πλημμυρών. Η περισσότερο σημαντική επίπτωση της ΚΑ είναι στα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης και ακολουθεί η επίδραση στην εδαφική υγρασία. Τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται στο ΜΠΠ και ειδικότερα, στο υδρολογικό μοντέλο. Η μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών εξαιτίας της ΚΑ, μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

- ▶ **Βήμα 1.** Θεωρείται μια σειρά σεναρίων ΚΑ για τα οποία πραγματοποιούνται υπολογισμοί με κλιματικά μοντέλα.

Αρχικά, επιλέγεται η γενιά και ο τύπος των κλιματικών προσομοιώσεων («πειραμάτων»), όπως των CMIP5, CMIP6 ή CORDEX. Για υψηλότερης χωρικής ανάλυσης κλιματικές προσομοιώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα EURO-CORDEX (χωρικής ανάλυσης ~ 11km), στα οποία οι προσομοιώσεις για τη μεθιλοντική περίοδο έχουν πραγματοποιηθεί με τα σενάρια RCP. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από τα τελευταίας γενιάς παγκόσμια κλιματικά μοντέλα CMIP6 (χωρικής ανάλυσης τουλάχιστον 100 km).

Στη συνέχεια, επιλέγονται τα σενάρια ΚΑ. Από τα υπάρχοντα σενάρια αναλύονται οι κλιματικές προσομοιώσεις για τα σενάρια RCP ή τα πλέον σύγχρονα SSP-RCP (βλ. υποκεφάλαιο 4.3.2). Τα τελευταία είναι διαθέσιμα μόνο για τα GCM. Συχνά, αναλύονται τα κλιματικά δεδομένα από ένα μέσο σενάριο, όπως το RCP4.5 ή το SSP2-4.5, και ένα πολύ δυσμενές, ακραίο σενάριο, όπως είναι το RCP8.5 ή το SSP585. Σε περίπτωση που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί επεξεργασία του συνόλου των διαθέσιμων μοντέλων, επιλέγεται ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο από τα διαθέσιμα μοντέλα που καλύπτει όλο το φάσμα των πιθανών μεθιλοντικών αλλαγών στην περιοχή εφαρμογής. Για αυτή τη διαδικασία υπάρχουν αρκετές μεθοδολογίες (βλ. Mendlik & Gobiet, 2015). Η παραπάνω επιλογή ενός περιορισμένου υποσυνόλου μοντέλων μπορεί επίσης να γίνει αξιολογώντας την ικανότητά τους να προσομοιώσουν κατά την ιστορική περίοδο των κλιματικών προσομοιώσεων σε σύγκριση με παρατηρήσεις, τη μεταβλητή ενδιαφέροντος που στην εξεταζόμενη περίπτωση μπορεί να είναι η ακραία βροχόπτωση. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, εφαρμόζονται προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων πολύ υψηλής ανάλυσης, της τάξης των 1-2 km. Στις εφαρμογές αυτές, λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων, οι κλιματικές προσομοιώσεις καλύπτουν βραχυπρόθεσμες χρονικές περιόδους, όπως π.χ. τη χρονική περίοδο εξέλιξης ενός γεγονότος πλημμύρας.

Τέλος, πραγματοποιείται η ίδια προσομοίωση, αλλά σε συνθήκες ενός «εικονικού» μεθιλοντικού κλίματος. Ένα παράδειγμα αντίστοιχης εφαρμογής περιγράφεται συνοπτικά στους Koutroulis et. al (2015) για τη μελέτη τριών συμβάντων πλημμύρας που εκδηλώθηκαν στην Κρήτη σε συνθήκες

ενός θερμότερου κλίματος κατά +2°C κατά μέσο όρο παγκοσμίως, σχετικά με την προβιομηχανική περίοδο.

- ▶ **Βήμα 2.** Πραγματοποιείται επεξεργασία των αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων εφαρμόζοντας κατάλληλη υποκλιμάκωση και διόρθωση μεροληπτικών σφαλμάτων με τη χρήση σημειακών ή πηλεγματικών παρατηρήσεων βλ. υποκεφάλαιο 4.2).

Σε περίπτωση που η ανάλυση γίνεται σε επίπεδο σταθμού, αξιοποιούνται τα διαθέσιμα καταγεγραμμένα μεγάλης χρονικής διάρκειας δεδομένα βροχόπτωσης από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην περιοχή διερεύνησης. Στην περίπτωση πηλεγματικών δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πηλεγματικά δεδομένα παρατηρήσεων (π.χ. E-OBS) ή επανανάληψης (π.χ. ERA5-Land).

Σε γενικές γραμμές επιδιώκεται η δημιουργία κλιματικής πληροφορίας υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπου απαιτείται, για να εστιαστεί η περιοχή εφαρμογής. Αυτό χρησιμεύει στον μετέπειτα προσδιορισμό και υπολογισμό κατάλληλων κλιματικών δεικτών που αφορούν τις πλημμύρες. Χαρακτηριστικοί δείκτες είναι μεταξύ άλλων η αλληλαγή στην ένταση της βροχόπτωσης για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς και η αλληλαγή στην περίοδο επαναφοράς για συγκεκριμένα κατώφλια βροχόπτωσης.

Η παραπάνω διαδικασία είναι σχετικά πολύπλοκη και απαιτεί δεδομένα και ειδικευμένους επιστήμονες, κυρίως κλιματολόγους, μετεωρολόγους και υδρολόγους με ειδίκευση στα κλιματικά μοντέλα.

Μια απλούστερη μέθοδος είναι αυτή της χρονικής επέκτασης των ιστορικών χρονοσειρών των μηνιαίων βροχοπτώσεων για να αναγνωριστεί η τάση μεταβολής που οφείλεται στην ΚΑ. Με βάση την επίδραση αυτή στη μέση βροχόπτωση προσαρμόζεται η κατανομή βροχόπτωσης, όπως π.χ. αυξάνοντας τη μέγιστη τιμή της.

Μια ακόμα απλούστερη προσέγγιση είναι να θεωρηθούν τρία σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης εξαιτίας της ΚΑ για κάθε ετήσιο πλημμυρικό γεγονός, έστω 5 %, 10 % και 15 %. Εναλλακτικά, μπορεί να θεωρηθεί μια αύξηση της ακραίας βροχόπτωσης κατά ένα ποσοστό, έστω 7 % σύμφωνα με την εξίσωση Clausius-Clapeyron, για κάθε 1°C αύξηση της θερμοκρασίας. Σημειώνεται, ότι αρκετοί ερευνητές έχουν καταλήξει σε μεγαλύτερα ποσοστά ανάλογα την εποχή και την θερμοκρασία, όπως 7-21% με βάση παρατηρήσεις στην περιοχή της Κρήτης (Grillakis & Koutroulis, 2018).

Η μέθοδος που θα επιλεγεί εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της περιοχής εφαρμογής, όπως την έκταση και τον πληθυσμό της, τον κίνδυνο πλημμύρας που διατρέχει, και τις επιπτώσεις της πλημμύρας. Στην επιλογή αυτή, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

- ▶ Τα απαιτούμενα δεδομένα.
- ▶ Η επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- ▶ Η διαθεσιμότητα των επιστημόνων με τις απαιτούμενες ειδικότητες.

4.4 Υπολογισμοί υδρολογικών μοντέλων

4.4.1 Σκοπός

Με τα υδρολογικά μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου υπολογίζονται (α) το πλημμυρογράφημα ή (β) η πλημμυρική παροχή αιχμής ή απλή πλημμυρική αιχμή σε ένα υδατόρεμα. Με την πλημμυρική αιχμή σχεδιάζονται τα αντιπλημμυρικά έργα (παροχή σχεδιασμού).

Η πλημμυρική αιχμή προσδιορίζεται με τις ακόλουθες δυο προσεγγίσεις (ΚΥΑ, 2017):

Αξιοποιώντας υδρομετρικά δεδομένα, δηλ. δεδομένα στάθμης-παροχής σε διατομή του υδατορέματος εφαρμόζοντας στατιστικές μεθόδους, εφόσον είναι εγκατεστημένος σταθμός συνεχούς καταγραφής της στάθμης της επιφάνειας ροής στη διατομή.

Αξιοποιώντας βροχομετρικά δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στην περιοχή μελέτης, από τα οποία εξάγεται η χαρακτηριστική όμβρια καμπύλη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όμβρια καμπύλη από τα ΣΔΚΠ (ΥΠΕΝ, 2018) ή άλλη όμβρια καμπύλη από πρόσφατη εγκεκριμένη υδρολογική μελέτη στην ευρύτερη περιοχή, ή να αναπτυχθεί νέα όμβρια καμπύλη, αξιοποιώντας διαθέσιμα δεδομένα μέγιστης έντασης βροχής διαφορετικών διαρκειών.

Στην πλειονότητα των ελληνικών λεκανών απορροής, δεν υπάρχουν διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα, καθόσον συνήθως δεν υπάρχει ο κατάλληλος εγκατεστημένος σταθμός. Έτσι, εφαρμόζεται η δεύτερη προσέγγιση αξιοποιώντας βροχομετρικά δεδομένα. Με την προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής, κατά κανόνα με την ορθολογική μέθοδο, ή ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων επεισοδίου.

Η ορθολογική μέθοδος εφαρμόζεται σε «μικρά» υδατορέματα ή υδατορέματα σε «απλές» λεκάνες απορροής εμβαδού μέχρι 5 ή 10 km² με ένα μόνο κύριο κλάδο υδατορέματος χωρίς άλλες υπολεκάνες. Σε περιπτώσεις μεγάλων λεκανών απορροής, στις οποίες η επιφανειακή αποθήκευση του νερού επηρεάζει τη χρονική κατανομή της απορροής, η ορθολογική μέθοδος δεν είναι κατάλληλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις προσδιορίζεται το πλημμυρογράφημα απορροής (Westphal, 2001), το οποίο αποτελεί τη γραφική παράσταση της χρονικής μεταβολής της παροχής σε μια διατομή του υδατορέματος. Η μεταβολή αυτή επηρεάζεται από ένα συνδυασμό φυσιογραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στη λεκάνη απορροής και αναπαριστά τη συνολική επίδραση του επεισοδίου βροχής, των υδρολογικών απωλειών, της επιφανειακής απορροής, της ενδορροής και της υπόγειας ροής. Σε περιπτώσεις λεκανών απορροής μεγάλης κλίμακας με εκτεταμένο υδρογραφικό δίκτυο, είναι σκόπιμο το μοντέλο να διαχωρίζεται σε επιμέρους υπολεκάνες, ώστε να μελετώνται ξεχωριστά οι εισροές, οι απώλειες, ο μετασχηματισμός σε πλημμυρική απορροή και η βασική απορροή σε κάθε υπολεκάνη και να συντίθεται το τελικό πλημμυρογράφημα στη διατομή ελέγχου σύμφωνα με τα επιμέρους πλημμυρογραφήματα.

4.4.2 Υπολογισμός πλημμυρικής αιχμής

Γενικά

Η ορθολογική μέθοδος τυχάνει ευρείας εφαρμογής στην ελληνική πρακτική και συνήθως εφαρμόζεται σε σχετικά μικρές λεκάνες απορροής (Τσακίρης, 1995). Βασίζεται στην αρχή ότι σε βροχές που παρουσιάζουν ομοιόμορφη ένταση και κατανομή στη λεκάνη απορροής, η μέγιστη απορροή εμφανίζεται όταν στην έξοδό της φθάσει νερό από όλα τα σημεία της. Η ορθολογική μέθοδος μετασχηματίζει τη βροχή σε απορροή σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (Μιμίκου και Μπαλιτάς, 2012):

$$Q_T = 0.278CiA \quad (4.1)$$

όπου Q_T είναι η μέγιστη πλημμυρική παροχή (ή πλημμυρική αιχμή) [m³/s] για δεδομένη περίοδο επαναφοράς T [έτη], C είναι αδιάστατος συντελεστής απορροής [-] που εξαρτάται από τα μορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και τις χρήσεις γης, i είναι η μέση ένταση βροχό-

πτώσης [mm/h] για δεδομένη περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια ίση προς το χρόνο συγκέντρωσης και A είναι η επιφάνεια της λεκάνης [km²], που συνεισφέρει την απορροή της στη εξεταζόμενη θέση. Ο αριθμητικός συντελεστής 0.278 (=1000/3600) εισάγεται στην εξίσωση, εφόσον για τα υπόλοιπα μεγέθη χρησιμοποιούνται οι προαναφερθείσες μονάδες.

Για να φθάσει η πλημμυρική παροχή τη μέγιστη τιμή της πρέπει η διάρκεια της βροχόπτωσης να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, ώστε όλα τα σημεία της να συνεισφέρουν ταυτόχρονα στην απορροή (Μαμάσης, 2012· Ευστρατιάδης, 2011). Επιπλέον, υιοθετείται η παραδοχή ότι η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας είναι ίση με την περίοδο επαναφοράς της βροχής. Επισημαίνεται ότι η ορθολογική μέθοδος αποτελεί την απλούστερη μέθοδο προσδιορισμού της πλημμυρικής αιχμής και είναι επαρκής στην περίπτωση που η βροχόπτωση έχει ομοιόμορφη ένταση σε όλη τη διάρκειά της και σε όλη την έκταση της λεκάνης (Κουτσογιάννης, 2016).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα υπολογισμού της πλημμυρικής αιχμής με την ορθολογική μέθοδο, που είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Βήμα 1.** Υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης.
- ▶ **Βήμα 2.** Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης.
- ▶ **Βήμα 3.** Υπολογισμός του συντελεστή απορροής.
- ▶ **Βήμα 4.** Υπολογισμός της πλημμυρικής αιχμής.

Βήμα 1. Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής (t_c) είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια σταγόνα βροχής να φτάσει από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης απορροής στην έξοδό της. Εκφράζει τη χρονική καθυστέρηση με την οποία εμφανίζεται η πλημμυρική αιχμή σε σχέση με το χρόνο που ξεκίνησε η βροχή. Η διαδρομή του νερού περιλαμβάνει σε πρώτη φάση την κίνηση πάνω στο έδαφος σε μη διαμορφωμένες μισγάγγειες με ταχύτητα ροής πολύ μικρότερη της ταχύτητας με την οποία κινείται αφότου συναντήσει το διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο (υδατόρεμα).

Ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται αναλύοντας ζεύγη τιμών μετρήσεων βροχογραφημάτων και υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Όταν δεν υπάρχουν οι μετρήσεις αυτές, όπως ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι, εκ των οποίων οι πλέον προτεινόμενες, σύμφωνα με το Π.Δ. 696/1974 (ΠΔ, 1974) και τις ΟΜΟΕ (2001), είναι η μέθοδος Giandotti και η μέθοδος Kirpich. Στα ελληνικά πανεπιστημιακά συγγράμματα προτείνονται οι μέθοδοι Passini και SCS. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παραπάνω τέσσερις μέθοδοι.

Εξίσωση Giandotti. Η εμπειρική εξίσωση Giandotti γράφεται ως εξής (Μιμίκου & Μπαϊτάς, 2012):

$$t_c = \frac{(4A^{0.5} + 1.5L)}{(0.8\Delta H^{0.5})} \quad (4.2)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης [h], A είναι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής που συνεισφέρει την απορροή της στη θέση διερεύνησης [km²], L είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας (μεγαλύτερης διαδρομής του νερού στη λεκάνη απορροής) [km] και ΔH είναι η διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης απορροής από το υψόμετρο στην έξοδό της [m].

Εξίσωση Kirpich. Η εξίσωση Kirpich γράφεται ως εξής:

$$t_c = 0.01947L^{0.77} S^{-0.385} \quad (4.3)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης [min], L είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας (μεγαλύτερης διαδρομής του νερού στη λεκάνη) [m] και S είναι η μέση κλίση της λεκάνης απορροής [m/m].

Εξίσωση Passini. Η εξίσωση Passini γράφεται ως εξής (Βαφειάδης, 2001):

$$t_c = 0.108 \frac{(AL)^{1/3}}{S^{1/2}} \quad (4.4)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης [h], A είναι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής που συνεισφέρει την απορροή της στη θέση διερεύνησης [km²], L είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας [km] και S είναι η μέση κλίση της λεκάνης απορροής [m/m].

Εξίσωση SCS (πλήιον NRCS). Η εξίσωση SCS (1972) γράφεται ως εξής:

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{(7700H^{0.38})} \quad (4.5)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης [h], L είναι το μήκος του κυρίου υδατορέματος [ft] και H είναι η υψομετρική διαφορά μεταξύ του πλήιον απομακρυσμένου σημείου της λεκάνης απορροής και της εξόδου της [ft].

Σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Η εξίσωση Giandotti είναι η πιο διαδεδομένη στην ελληνική πρακτική. Έχει εφαρμογή σε απλές λεκάνες απορροής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μια κύρια μισγάγγεια και δεν αποτελούνται από υπολεκάνες (Κουτσογιάννης, 2016).
- ▶ Η εξίσωση Kirpich αναπτύχθηκε το 1940 (Kirpich, 1940) χρησιμοποιώντας δεδομένα της Soil Conservation Service (SCS) από μικρές αγροτικές λεκάνες στο Tennessee, έκτασης από 0.5 μέχρι 45 ha με κλίσεις 3-10% και φυτοκάλυψη έως 56% και με καλά σχηματισμένο υδρογραφικό δίκτυο.

Βήμα 2. Υπολογισμός κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης

Ως (σημειακή) κρίσιμη ένταση βροχόπτωσης θεωρείται η ένταση της βροχόπτωσης για διάρκεια βροχόπτωσης ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής. Υπολογίζεται από τις εξισώσεις των όμβριων καμπυλών. Η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών βασίζεται στην πιθανοτική ανάλυση των παρατηρούμενων ακραίων υψών βροχής (h) ή (χρονικά μέσων) εντάσεων βροχής (i) από βροχογραφικά δεδομένα σταθμών της περιοχής ή γειτονικών. Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχουν εξισώσεις όμβριων καμπυλών γενικής εφαρμογής που είναι ανεξάρτητες από τις τοπικές συνθήκες (Κουτσογιάννης, 2016).

Στα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018) περιγράφεται η μεθοδολογία για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών και προσδιορίζονται οι τιμές των πέντε παραμέτρων τους για 676 σταθμούς σε επίπεδο χώρας. Η εξίσωση των όμβριων καμπυλών έχει την ακόλουθη μορφή:

$$i(d,T) = \frac{\bar{h}'(T^k - \psi')}{(1 + \delta/\theta)^n} \quad (4.6)$$

όπου $i(d,T)$ είναι η ένταση βροχής δεδομένης χρονικής κλίμακας (διάρκειας) d και περιόδου επαναφοράς T , κ είναι η παράμετρος σχήματος [-], η' είναι η παράμετρος κλίμακας [-], ψ' είναι η παράμετρος θέσης της συνάρτησης κατανομής [-], και θ και n είναι οι παράμετροι της συνάρτησης διάρκειας [-].

Στα υδρολογικά μοντέλα που προσομοιώνουν ένα πλημμυρικό επεισόδιο με δεδομένα βροχής – απορροής, θεωρείται ότι η πλημμύρα που αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς παράγεται από επεισόδιο βροχής (καταιγίδα σχεδιασμού) αντίστοιχης περιόδου επαναφοράς. Η εξίσωση (4.6) εφαρμόζεται για την κατάρτιση των σημειακών όμβριων καμπυλών, και την εκτίμηση της σημειακής κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης στις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών. Όταν στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής υπάρχουν περισσότεροι από ένα σταθμοί, η κρίσιμη ένταση βροχόπτωσης υπολογίζεται με χωρική ολοκλήρωση των επί μέρους σημειακών κρίσιμων εντάσεων, όπως π.χ. με τη μέθοδο Thiessen.

Βήμα 3. Υπολογισμός του συντελεστή απορροής

Ο συντελεστής απορροής (C) εκφράζει πρακτικά το ποσοστό του νερού που διασχίζει την επιφάνεια της λεκάνης απορροής κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, το οποίο φτάνει στο εξεταζόμενο σημείο συγκέντρωσης της ροής προς το ποσοστό νερού που χάνεται, διηθείται στο έδαφος, απορροφάται από τη βλάστηση, εξατμίζεται ή/και κατακρατείται στις επιφανειακές κοιιλότητες του εδάφους. Ο συντελεστής απορροής υπολογίζεται ως το άθροισμα τεσσάρων επιμέρους συντελεστών που εκφράζουν την επίδραση μιας σειράς παραμέτρων, από την εξίσωση:

$$C=C_f (C_r+C_i+C_v+C_s) \quad (4.7)$$

Ο συντελεστής C_f εκφράζει την επίδραση του ανάγλυφου της επιφάνειας της λεκάνης [-], ο συντελεστής C_i τη διηθητικότητα του εδάφους [-], ο συντελεστής C_v την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης [-], ο συντελεστής C_s την αποθηκευτικότητα της επιφάνειας του εδάφους [-] και ο συντελεστής C_r την εδαφική υγρασία κατά την έναρξη της βροχής [-]. Οι συντελεστές αυτοί εκτιμώνται με βάση τους πίνακες των ΟΜΟΕ (2013). Ο συντελεστής C_f είναι διορθωτικός συντελεστής προσαύξησης και εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς. Για περίοδο επαναφοράς 25, 50, και 100 έτη, η τιμή του C_f είναι ίση με 1.10, 1.20 και 1.25, αντίστοιχα (ΟΜΟΕ – ΑΣΥΕΟ, 2002).

Βήμα 4. Υπολογισμός πλημμυρικής αιχμής

Η πλημμυρική αιχμή Q_T υπολογίζεται από την εξίσωση (4.1) θέτοντας σε αυτή τις προσδιορισθείσες τιμές των C , i και A .

4.4.3 Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος

Μεθοδολογία υπολογισμού

Για τον προσδιορισμό του πλημμυρογραφήματος χρησιμοποιούνται μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου (Grimaldi et al., 2012) εφαρμόζοντας μια διαδικασία δύο βημάτων. Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των υδρολογικών ελλειμμάτων από τη συνολική βροχόπτωση, εκτιμώντας έτσι την ενεργό βροχόπτωση, δηλ. την επιφανειακή (πλημμυρική) απορροή που παράγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζεται η θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΜΥ), για τη διόδευση της πλημμυρικής απορροής στην έξοδο της λεκάνης, και την εκτίμηση του τελικού υδρογραφήματος, στο οποίο προστίθεται η βασική ροή.

Το ΜΥ είναι το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους 1 cm που έχει

ομοιόμορφη ένταση και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής (Sherman, 1932). Σε λεκάνες απορροής που δεν διαθέτουν υδρομετρικά δεδομένα, χρησιμοποιείται το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΣΜΥ), αξιοποιώντας τα γεωμορφολογικά και λοιπά χαρακτηριστικά της, προκειμένου να μετασχηματιστεί χωροχρονικά η απορροή σε πλημμυρική παροχή.

Για να υπολογιστεί το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού, θεωρείται μια σειρά παραδοχών (Μιμίκου και Μπαλιτάς, 2012) και εφαρμόζονται τα ακόλουθα βήματα υπολογισμού:

- ▶ **Βήμα 1.** Καθορισμός της διάρκειας της βροχόπτωσης σχεδιασμού.
- ▶ **Βήμα 2.** Καθορισμός της περιόδου επαναφοράς της καταιγίδας σχεδιασμού.
- ▶ **Βήμα 3.** Καθορισμός της χρονικής διακριτότητας της καταιγίδας σχεδιασμού.
- ▶ **Βήμα 4.** Υπολογισμός του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
- ▶ **Βήμα 5.** Προσδιορισμός του βροχογραφήματος σχεδιασμού.
- ▶ **Βήμα 6.** Προσδιορισμός της ενεργού βροχόπτωσης.
- ▶ **Βήμα 7.** Κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος.
- ▶ **Βήμα 8.** Κατάρτιση του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού.

Βήμα 1. Καθορισμός της διάρκειας της βροχόπτωσης σχεδιασμού

Η διάρκεια της βροχόπτωσης σχεδιασμού (D) συνδέεται άμεσα με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής και πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με αυτόν, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πλημμυρική παροχή. Συνήθως, η διάρκεια βροχής λαμβάνεται ως πολλαπλάσια τιμή των 3h ή 6h. Στα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018), θεωρείται ίση με 48 h στις μεγάλες λεκάνες απορροής και 12 ή 24h στις μικρές λεκάνες απορροής. Στο Ερευνητικό Πρόγραμμα ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (2014), η διάρκεια του βροχογραφήματος σχεδιασμού επιλέχθηκε μεγαλύτερη ή ίση από το τριπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της συνοδικής λεκάνης απορροής.

Βήμα 2. Καθορισμός της περιόδου επαναφοράς της καταιγίδας σχεδιασμού

Η περίοδος επαναφοράς (T) της καταιγίδας σχεδιασμού σημαίνει ότι θα παρουσιαστεί ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο από αυτό της βροχόπτωσης σχεδιασμού κατά μέσο όρο (τουλάχιστον) μια φορά στα T έτη ζωής του έργου. Σημειώνεται, ότι το μέγεθος της περιόδου επαναφοράς είναι απλά και μόνο ένα στατιστικό μέγεθος. Έτσι, δεν σημαίνει ότι η υπέρβαση της βροχόπτωσης σχεδιασμού θα γίνει αποκλειστικά μόνο μια φορά στα T έτη, αλλά μπορεί να συμβαίνει και κάθε χρόνο με πιθανότητα $1/T$ (ΥΠΕΧΩ-ΔΕ, 2002). Στο παρελθόν υπήρχε η άποψη ότι η περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης σχεδιασμού δεν ταυτίζεται με την περίοδο επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού (πλημμυρική αιχμή), λόγω της επίδρασης των υδρολογικών απωλειών (κατακράτηση, διήθηση κλπ.) και των συνθηκών εδαφικής υγρασίας. Εντούτοις, υπάρχει και η αντίθετη άποψη (Larson & Reich, 1973), ότι στην πραγματικότητα οι δύο περίοδοι επαναφοράς τείνουν να συμπίπτουν. Η τελευταία άποψη υιοθετείται στα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018), στα οποία εξετάζονται τρία σενάρια πλημμυρών υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης, που αντιστοιχούν σε τιμές περιόδου επαναφοράς ίσες με 50, 100 και 1000 έτη.

Βήμα 3. Καθορισμός της χρονικής διακριτότητας της καταιγίδας σχεδιασμού

Η χρονική διακριτότητα (Δt) είναι η διάρκεια κάθε τμηματικού ύψους βροχής και καθορίζει το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Σύμφωνα με τα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018), σε περίπτωση που η λεκάνη απορροής

χωρίζεται σε υπολεκάνες, το χρονικό βήμα πρέπει να είναι υποπολλαπλάσιο του μικρότερου από τους χρόνους συγκέντρωσης των υπολεκανών, ώστε να απεικονίζεται σωστά το σχήμα του εκάστοτε μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η χρονική διακριτότητα πρέπει να είναι αρκετά λεπτομερή για να προσδιορίζεται ο ανερχόμενος κλάδος και η παροχή αιχμής του υδρογραφήματος ικανοποιητικά, αλλά όχι πολύ μικρή με αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση του χρόνου υπολογισμών. Σύμφωνα με τον Westphal (2001) για το επιλεγμένο χρονικό βήμα Δt , πρέπει να ισχύει:

$$\frac{t_c}{5} \leq \Delta t \leq \frac{t_c}{3} \quad (4.8)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής κατά Giandotti.

Βήμα 4. Υπολογισμός του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής

Δεδομένου ότι οι όμβριες καμπύλες αναφέρονται σε σημειακή ένταση βροχής στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, απαιτείται ο μετασχηματισμός τους σε επιφανειακά μέσες εντάσεις. Στην περίπτωση που η έκταση της λεκάνης απορροής είναι αρκετά μεγάλη, η σημειακή ένταση της βροχής είναι αισθητά μεγαλύτερη από τη μέση επιφανειακή ένταση στη λεκάνη, με αποτέλεσμα να προκύπτουν υπερεκτιμώμενες τιμές της παροχής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται μείωση των υπολογιζόμενων τιμών με την εφαρμογή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής, ο οποίος έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ▶ Είναι μικρότερος της μονάδας.
- ▶ Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης της λεκάνης απορροής.
- ▶ Είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας της βροχόπτωσης.
- ▶ Εξαρτάται (σε κάποιο βαθμό) από την περίοδο επαναφοράς.

Στην Ελλάδα προτείνεται να χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση που εφαρμόστηκε στη Μεγάλη Βρετανία (NERC, 1975):

$$\phi = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01 \ln A}}{d^{0.35}} \quad \phi \geq 0.25 \quad (4.9)$$

όπου ϕ είναι ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής [-], A είναι η έκταση της λεκάνης απορροής [km^2] και d είναι η διάρκεια βροχής [h]. Η εξίσωση αυτή εφαρμόστηκε στα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018).

Η διαδικασία επιφανειακής αναγωγής με εφαρμογή του συντελεστή ϕ , γίνεται κατά τον υπολογισμό των τμηματικών εντάσεων βροχής $i(d,T)$, θεωρώντας την έκταση της συνολικής λεκάνης (A) και όχι τις επιμέρους εκτάσεις των υπολεκανών.

Βήμα 5. Προσδιορισμός του βροχογραφήματος

Ο προσδιορισμός του βροχογραφήματος, που ορίζεται ως η κατανομή της ολικής επιφανειακής βροχόπτωσης (σε μορφή έντασης ή ύψους βροχής) σε μια λεκάνη απορροής συναρτήσει του χρόνου, πραγματοποιείται για την καταιγίδα σχεδιασμού ή για ένα πραγματικό επεισόδιο βροχής.

Για τον προσδιορισμό αυτό καταρτίζεται πίνακας με τις σημειακές εντάσεις για τη διάρκεια βροχόπτωσης, οι οποίες ανάγονται σε επιφανειακές εντάσεις και υπολογίζονται τα ύψη βροχής, η κατανομή των οποίων συνήθως γίνεται με εφαρμογή ενός τυποποιημένου χρονικού προφίλ (Chow et al., 1988). Σύμφωνα με την μέθοδο των Εναθλασόμενων Ύψων Βροχής, που είναι και η πλέον ευρέως χρησιμο-

ποιούμενη σε μελέτες σχεδιασμού, τοποθετούνται τα τμηματικά ύψη βροχής, έτσι ώστε η μεγαλύτερη τμηματική βροχόπτωση να βρίσκεται στο μέσο του βροχογραφήματος και οι υπόλοιπες τιμές να διατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά εναλλάξ δεξιά και αριστερά της μέγιστης τιμής, μέχρι να συμπληρωθούν οι επιμέρους διάρκειες.

Βήμα 6. Προσδιορισμός της ενεργού βροχόπτωσης

Για να προσδιοριστεί η ενεργός βροχόπτωση (δηλαδή το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή), η πλέον διαδιδόμενη προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος SCS (1972, βλ. Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012), η οποία και χρησιμοποιήθηκε στα ΣΔΚΠ. Η μέθοδος SCS έχει μετονομαστεί σε NCRS.

$$H = \begin{cases} 0 & P \geq 0.2S \\ \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & P < 0.2S \end{cases} \quad (4.10)$$

όπου H είναι το ενεργό ύψος της βροχόπτωσης [mm], P είναι το ολικό ύψος βροχόπτωσης που υπολογίζεται αθροιστικά από την έναρξη της βροχόπτωσης [mm], S είναι η παράμετρος μέγιστης δυναμικής κατακράτησης [mm], η οποία συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης (απορροής) CN (Curve Number) μέσω της εξίσωσης

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Οι τιμές του CN εκτιμώνται με βάση τον υδρολογικό τύπο του εδάφους (διηθητικότητα), την κάλυψη του εδάφους (χρήσεις γης) και τις προγενέστερες συνθήκες υγρασίας του εδάφους.

Υδρολογικοί τύποι εδάφους. Τα εδάφη διακρίνονται στους ακόλουθους τέσσερις τύπους με βάση τους ρυθμούς διήθησης του νερού της βροχής στο έδαφος, δηλ. τη μακροσκοπική διαπερατότητα τους:

- ▶ Τύπος Α. Εδάφη με χαμηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής. Πρόκειται κυρίως για βαθιά εδάφη, ελαφρά με αδρή υφή αμμώδη, πηλοαμμώδη και αμμοπηλώδη. Όταν αυτά είναι κορεσμένα με νερό έχουν υψηλό ρυθμό διήθησης που είναι μεγαλύτερος από 7.62 mm/h,
- ▶ Τύπος Β. Εδάφη με μέτριο δυναμικό επιφανειακής απορροής. Είναι εδάφη βαθιά έως μέτρια βαθιά, μέτριας υφής πηλώδη, ιλυοπηλώδη με μέτρια διηθητικότητα που κυμαίνεται από 3.81 μέχρι 7.62 mm/h.
- ▶ Τύπος Γ. Εδάφη με σχετικά υψηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής. Είναι εδάφη με ορίζοντα που παρεμποδίζει τη διήθηση και εδάφη λεπτής υφής αμμοαργιλοπηλώδη με μικρή διηθητικότητα που κυμαίνεται από 1.27 μέχρι 3.81 mm/h.
- ▶ Τύπος Δ. Εδάφη με πολύ υψηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής. Είναι εδάφη πολύ λεπτής υφής αργιλοπηλώδη, ιλυοαργιλοπηλώδη, αμμοαργιλώδη, ιλυοαργιλώδη και αργιλώδη, με διηθητικότητα μικρότερη από 1.27 mm/h.

Κάλυψη εδάφους. Η κύρια πηγή των διαθέσιμων δεδομένων κάλυψης-χρήσεων γης είναι το CORINE Land Cover 2018 (CLC, 2018).

Προγενέστερες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις συνθήκες προγενέστερης υγρασίας:

- ▶ Τύπος I: Ξηρές συνθήκες, που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών είναι μικρότερη από 13 mm ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης.
- ▶ Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεταξύ 13 και 38 mm ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης.
- ▶ Τύπος III: Υγρές συνθήκες (σχεδόν κορεσμένα εδάφη), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεγαλύτερη από 38 mm ή μεγαλύτερη από 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης.

Γενικά, οι τιμές του CN κυμαίνονται θεωρητικά από 0 έως 100 και πρακτικά από 30 έως 98. Μικρές διαφορές στην τιμή του CN της τάξης των 5 μονάδων μπορεί να δίνουν μεγάλες διαφορές στην απορροή που φτάνουν μέχρι 30-35%.

Συνήθως, οι τιμές του CN λαμβάνονται από πίνακες για προγενέστερες μέσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και συμβολίζονται ως CN_{II}. Σε σημείωμα του ΥΠΕΝ (2022) περιγράφεται η μεθοδολογία εκτίμησης του CN_{II} και στα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018) εξετάστηκαν τρία σενάρια που αντιστοιχούν στις παραπάνω συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να δημιουργηθεί ένας χάρτης του CN σε περιβάλλον GIS για την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής που αποτελείται από υποπεριοχές. Για το σύνολο της λεκάνης απορροής μπορεί να υπολογιστεί μια σταθμισμένη μέση τιμή του CN για μέσες συνθήκες υγρασίας με βάση την παρακάτω εξίσωση

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} \cdot CN_i \right) \quad (4.12)$$

όπου A_i είναι η έκταση της υποπεριοχής i [km²], A η έκταση της λεκάνης απορροής [km²] και CN_i είναι ο CN της υποπεριοχής i [-].

Η αναγωγή των τιμών του CN_{II} σε ξηρές και υγρές συνθήκες μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες εξισώσεις, αντίστοιχα:

$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}} \quad (4.13)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}} \quad (4.14)$$

Βήμα 7. Κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντάται πληθώρα μεθοδολογιών κατάρτισης ΣΜΥ, μεταξύ των οποίων και το πλέον διαδεδομένο κατά SCS. Η SCS μετά από μελέτη μεγάλου αριθμού λεκανών όρισε ένα τυπικό αδιάστατο ΣΜΥ, που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη, με δεδομένα εισόδου το εμβαδό και τον χρόνο αιχμής της. Το ΣΜΥ αυτό έχει κωδωνοειδές σχήμα και η παροχή σε κάθε χρονική στιγμή εκφράζεται ως ποσοστό της παροχής αιχμής.

Ο χρόνος ανόδου (βλ. υποκεφάλαιο 2.2.1) προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$t_a = D/2 + t_{Lag} \quad (4.15)$$

όπου t_a είναι ο χρόνος ανόδου [h], D είναι η διάρκεια της μοναδιαίας βροχόπτωσης [h] και t_{Lag} είναι ο χρόνος υστέρησης ή επιβράδυνσης στη λεκάνη απορροής [h], δηλ. η χρονική διαφορά μεταξύ του κέντρου βάρους των κατακρημνισμάτων και της αιχμής του πλημμυρογραφήματος Q_p .

Σύμφωνα με τα ΣΔΠΚ (ΥΠΕΝ, 2018), ο χρόνος υστέρησης προκύπτει από την εξίσωση

$$t_{Lag} = 0.6t_c \quad (4.16)$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti [h], βλ. εξίσωση (4.2).

Εάν μια λεκάνη χωριστεί σε αρκετές υπολεκάνες και εφαρμοστεί σε κάθε μια χωριστά το αδιάστατο υδρογράφημα, τότε το τελικό πλημμυρικό υδρογράφημα της λεκάνης απορροής υπολογίζεται με σύνθεση των υδρογραφημάτων των υπολεκάνων με ικανοποιητική ακρίβεια. Το πλημμυρικό υδρογράφημα παράγεται με επαλληλία της ενεργού βροχόπτωσης με το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS.

Βήμα 8. Κατάρτιση του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού

Το πλημμυρικό υδρογράφημα υπολογίζεται με επαλληλία της ενεργού βροχόπτωσης με το υπολογισμένο ΜΥΓ. Συχνά, προστίθεται και μια σταθερή βασική ροή, που εκτιμάται με βάση τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής (π.χ. μέση ετήσια παροχή). Σε κάθε περίπτωση, αυτή αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής παροχής.

Εάν μια λεκάνη απορροής χωριστεί σε υπολεκάνες, τότε η υπολογιστική διαδικασία εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε υπολεκάνη, και το συνολικό πλημμυρογράφημα στην έξοδο της συνολικής λεκάνης υπολογίζεται από τη σύνθεση των επιμέρους πλημμυρογραφημάτων των υπολεκάνων. Σε περίπτωση που οι υπολεκάνες ορίζονται σε διαφορετικά τμήματα του υδατορέματος, έχουν δηλαδή διαφορετική έξοδο, για τη σύνθεση τους απαιτείται η εφαρμογή μιας απλής μεθόδου υδρολογικής διόδευσης, π.χ. Muskingum, ή μιας πληρέστερης υδροδυναμικής διόδευσης.

4.5 Υπολογισμοί υδροδυναμικών μοντέλων

4.5.1 Σκοπός

Οι ροές των πλημμυρών είναι ταχέως μεταβαλλόμενες και οι εξισώσεις που τις περιγράφουν είναι οι εξισώσεις Saint Venant ή εξισώσεις ρηκών υδάτων (SWE, Shallow Water Equations). Επιλύοντας αυτές τις εξισώσεις σε ένα υδατόρεμα προσδιορίζονται τα κύρια υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής που είναι συνήθως τα βάθη και οι ταχύτητες ροής.

4.5.2 Εξισώσεις υδροδυναμικών μοντέλων

Παραδοχές

Για να λάβουν οι εξισώσεις ροής τη σχετικά απλή μονοδιάστατη (1D) μορφή τους, ξεκινώντας από την πολύπλοκη αρχική τρισδιάστατη (3D) μορφή τους, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στον Stamou (2017) κάνοντας μια σειρά από παραδοχές. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- ▶ η κατανομή της πίεσης (p) είναι υδροστατική,
- ▶ η πυκνότητα είναι σταθερή, και
- ▶ η κλίση του πυθμένα (S_0) είναι πολύ μικρή.

Επιλύοντας τις εξισώσεις ροής μπορεί να προσδιοριστούν:

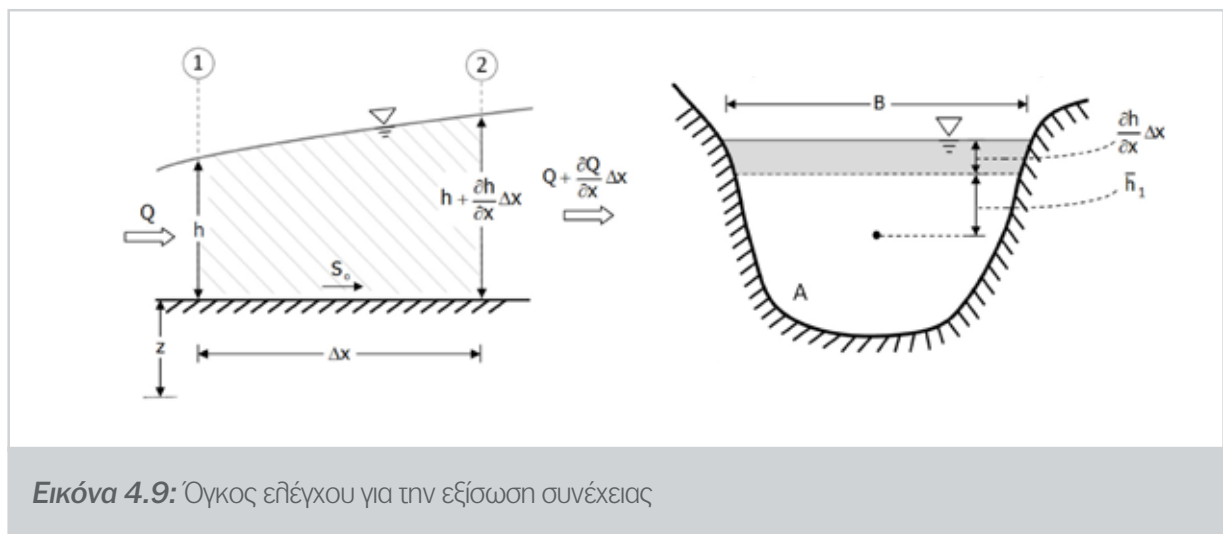
- ▶ το βάθος ροής (h), και
- ▶ η μέση ταχύτητα ροής (V) ή η παροχή (Q).

Για την εξαγωγή των εξισώσεων ροής, εφαρμόζεται η μέθοδος της μονοδιάστατης ανάλυσης (Στάμου, 2016) κατά τη διεύθυνση της ροής (x) σε ένα μικρό όγκο ελέγχου του υδατορέματος.

Εξισώσεις 1D ροής ρηκών υδάτων

Εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης μάζας του νερού στον όγκο ελέγχου που φαίνεται στην Εικόνα 4.9, σύμφωνα με την οποία:

«Μάζα νερού που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου» – «Μάζα νερού που εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου» = «Ρυθμός μεταβολής της μάζας του νερού στον όγκο ελέγχου».



Εικόνα 4.9: Όγκος ελέγχου για την εξίσωση συνέχειας

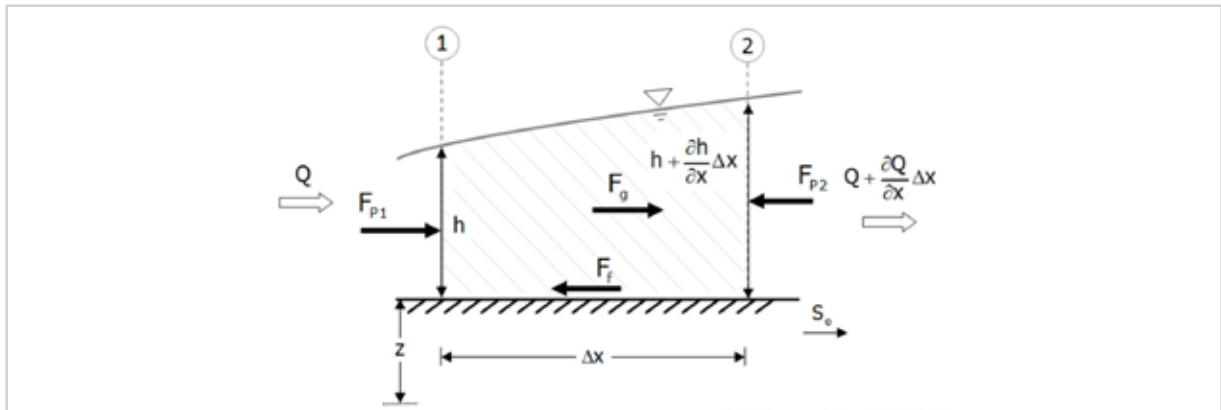
Μετά από πράξεις (Stamou, 2014) προκύπτει η εξίσωση συνέχειας:

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(VA)}{\partial x} = 0 \quad (4.17)$$

όπου h είναι το βάθος ροής [m], B είναι το πλάτος ροής στην επιφάνεια [m], V είναι η μέση ταχύτητα ροής [m/s] και A είναι η επιφάνεια της διατομής της ροής [m²], η οποία είναι συνάρτηση του x και του h .

Εφαρμόζεται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα (ισορροπία δυνάμεων) στον όγκο ελέγχου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10, σύμφωνα με τον οποίο:

«Σύνολο των δυνάμεων (βαρύτητας, πίεσης και τριβών) που ασκούνται στη μάζα του νερού που βρίσκεται στον όγκο ελέγχου» = «Μάζα νερού» x «ρυθμός μεταβολής ταχύτητας του νερού (δηλ. επιτάχυνση) στον όγκο ελέγχου».



Εικόνα 4.10: Όγκος ελέγχου για την εξίσωση ποσότητας κίνησης

Μετά από πράξεις (Stamou, 2014), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση ποσότητας κίνησης (ορμής):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} (S_f - S_o) = 0 \quad (4.18)$$

όπου

$$S_o = \frac{\partial z_b}{\partial x}, S_f = \frac{\tau_o}{\gamma R_H}, R_H = \frac{A}{P_w}, \tau_o = \frac{f}{4} \rho = \frac{V|V|}{2} \quad (4.19)$$

S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας [-], S_o είναι η κλίση του πυθμένα [-], R_H είναι η υδραυλική ακτίνα [m], P_w είναι η βρεχόμενη περίμετρος [m], τ_o η διατμητική τάση ορίου [N/m^2] και f ο συντελεστής τριβών [-] κατά Colebrook – White (Στάμου, 2016).

Στις ροές με ελεύθερη επιφάνεια, για τον υπολογισμό της κλίσης της γραμμής ενέργειας χρησιμοποιείται συνήθως η εξίσωση Manning, η οποία γράφεται ως εξής:

$$Q = \frac{1}{n} (R_H)^{2/3} (S_f)^{1/2} A \Rightarrow S_f = \frac{(nQ)^2}{(A)^2 (R_H)^{4/3}} = \frac{(nQ)^2}{(A)^2 (R_H)^{4/3}} \quad (4.20)$$

όπου n είναι ο συντελεστής τριβών της εξίσωσης Manning [-].

Επιλύοντας τις εξισώσεις (4.17) και (4.18) υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της ροής h και V .

Συνήθης μορφή των εξισώσεων ροής

Στα ευρέως χρησιμοποιούμενα υδροδυναμικά μοντέλα χρησιμοποιείται η ακόλουθη μορφή των εξισώσεων ροής:

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4.21)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (4.22)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της ροής [m^2], Q είναι η παροχή [m^3/s], t είναι ο χρόνος [s], x είναι η απόσταση κατά τη διεύθυνση της ροής [m], q είναι η παροχή ανά μονάδα μήκους [m^2/s], V είναι η μέση ταχύτητα ροής [m/s], h είναι η στάθμη της επιφάνειας της ροής [m], g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2] και S_f είναι η κλίση γραμμής ενέργειας [-].

Επιλύοντας τις εξισώσεις (4.21) και (4.22) υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της ροής A και Q .

Απλοποιημένες εξισώσεις 1D κύματος διάχυσης

Όταν στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης (4.18) ή (4.22) αγνοηθούν οι όροι επιτάχυνσης (ή αδράνειας), δηλ. όταν η ροή του πλημμυρικού κύματος κυριαρχείται από τις δυνάμεις της βαρύτητας, της πίεσης και της τριβής, τότε προκύπτουν οι Εξισώσεις Κύματος Διάχυσης (Diffusion Wave Equations, DWE).

$$\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_o = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f = 0 \quad (4.23)$$

καθόσον

$$\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_o = 0$$

Η εφαρμογή των DWE διασφαλίζει μια ικανοποιητικά ακριβή λύση όταν πληρούνται οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή τους (Cimorelli et al., 2018). Γενικά, η εφαρμογή των SWE συνιστάται για ισχυρά δυναμικά πλημμυρικά κύματα, όπως αυτά που δημιουργούνται από τη θραύση φράγματος και πλημμύρες ταχείας απόκρισης, απότομες συστολές και διαστολές, συστήματα υδατορεμάτων με σχεδόν επίπεδη κλίση (μικρότερη από 0.0002), διάδοση κυμάτων εξαιτίας απότομου ανοίγματος ή κλεισίματος θυροφραγμάτων, κύματα γύρω από βάθρα γεφυρών, υπερύψωση της επιφάνειας της ροής σε στροφές αγωγών κ.λπ. (Brunner, 2021b). Ωστόσο, ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι δυνατό η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τη χρήση των εξισώσεων DWE να είναι ικανοποιητική (Moussa & Bocquillon, 2009).

Απλοποιημένες εξισώσεις 1D κύματος σε αγωγό ορθογωνικής διατομής

Ορίζεται η ταχύτητα κύματος (C) ως εξής:

$$C = \sqrt{g h} \quad (4.24)$$

Θεωρώντας αγωγό ορθογωνικής διατομής και αγνοώντας τις τριβές ($S_f = 0$), οι εξισώσεις SWE γράφονται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -h \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + S_o \quad (4.26)$$

Παραγωγίζοντας την πρώτη εξίσωση ως προς x και τη δεύτερη ως προς t προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$V(t,x) = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + V \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial t} + (-gh) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right) \frac{\partial V}{\partial t} - \left(2g \frac{\partial h}{\partial x}\right) \frac{\partial V}{\partial x} + \left(-g \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) V = 0 \quad (4.27)$$

Παραγωγίζοντας την πρώτη εξίσωση ως προς t και τη δεύτερη ως προς x προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$h(t,x) = \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + V \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial t} + (-gh) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - \left(V \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right) h = 0 \quad (4.28)$$

Στις εξισώσεις (4.27) και (4.28), ισχύει $A=1$, $B=V$, $C=-gh$ και η διακρίνουσα είναι ίση με:

$$\Delta = B^2 - 4AC = V^2 - 4(1)(-gh) = V^2 + 4gh > 0 \quad (4.29)$$

οπότε από μαθηματικής άποψης οι εξισώσεις είναι υπερβολικές και καλούνται «εξισώσεις κύματος 2ης τάξης».

Μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων ροής

Γενικά, οι διαφορικές εξισώσεις ροής δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά. Έτσι, για την επίλυσή τους εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες είναι συνήθως οι ακόλουθες:

- ▶ Μέθοδος διαφορικών όγκων (FVM).
- ▶ Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM).
- ▶ Μέθοδος των χαρακτηριστικών.

Στα περισσότερα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα (βλ. υποκεφάλαιο 4.6) εφαρμόζονται οι δύο πρώτες μέθοδοι. Σύμφωνα με αυτές, ένα υδατόρεμα χωρίζεται σε μικρά τμήματα, στα οποία υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της ροής ως εξής:

- ▶ Στη FVM ολοκληρώνονται οι εξισώσεις ροής σε κάθε τμήμα, το οποίο καλείται διαφορικός όγκος, και μετά από πράξεις προκύπτουν οι γραμμικές εξισώσεις με τις οποίες προσδιορίζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών της ροής στα κέντρα των διαφορικών όγκων.
- ▶ Στη FDM αντικαθίσταται κάθε όρος των εξισώσεων ροής σε κάθε τμήμα από τις προσεγγιστικές εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών. Μετά από πράξεις προκύπτουν οι γραμμικές εξισώσεις, οι οποίες λύνονται σχετικά εύκολα (μιας και δεν είναι πλέον διαφορικές εξισώσεις), για τον προσδιορισμό των τιμών των χαρακτηριστικών της ροής στα άκρα των τμημάτων.

Μερικές χρήσιμες πρακτικές παρατηρήσεις είναι οι ακόλουθες:

- ▶ Και στις δύο μεθόδους προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά ροής σε διακριτές θέσεις που είναι τα άκρα ή τα κέντρα των κελιών, δηλ. οι εξισώσεις που προκύπτουν δεν είναι πλέον συνεχείς συναρτήσεις, όπως οι αρχικές διαφορικές εξισώσεις.
- ▶ Και με τις δύο μεθόδους πρακτικά μετατρέπονται οι διαφορικές εξισώσεις που δεν μπορούν να λυθούν σε γραμμικές εξισώσεις που επιλύονται με απλή αντικατάσταση (ρητά σχήματα) ή με την επίλυση συστήματος εξισώσεων (πεπλεγμένα σχήματα).
- ▶ Η FDM είναι πολύ πιο απλή από τη FVM. Όμως, η FVM εξασφαλίζει τη διατήρηση της μάζας, της ποσότητας κίνησης και της ενέργειας και διαμορφώνεται πολύ πιο εύκολα από ότι η FDM σε περιπτώσεις ροών με σύνθετη γεωμετρία με μη-δομημένα πλέγματα. Για αυτό το λόγο εφαρμόζεται σε πολλά σύνθετα μοντέλα CFD (Computational Fluid Dynamics).

Εξίσωση ενέργειας

Επιλύοντας τις δύο εξισώσεις ροής υπολογίζονται τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της ροής. Συχνά, στους

υπολογισμούς εφαρμόζεται η εξίσωση ενέργειας (Στάμου, 2016) μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών (1) και (2), η οποία γράφεται ως εξής:

$$H_1=H_2 \Rightarrow z_1+y_1+\frac{V_1^2}{2g}=z_2+y_2+\frac{V_2^2}{2g}+\Delta H_{1-2} \quad (4.30)$$

όπου H_i είναι το ύψος ενέργειας στη διατομή i (m), z_i είναι η στάθμη του πυθμένα στη διατομή i (m), y_i είναι το βάθος ροής στη διατομή i (m), V_i είναι η μέση ταχύτητα της ροής στη διατομή i (m/s), ΔH_{1-2} είναι οι συνολικές απώλειες ενέργειας μεταξύ των διατομών 1 και 2 (m) και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²).

Οι συνολικές απώλειες (γραμμικές και τοπικές) ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2) υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta H_{1-2}=J_E L+k\left|\frac{V_2^2}{2g}-\frac{V_1^2}{2g}\right| \quad (4.31)$$

όπου J_E είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας μεταξύ των διατομών (1) και (2) [-], η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση Manning, L είναι το μήκος μεταξύ των δυο διατομών [m] και k είναι ο συντελεστής τοπικών απωλειών λόγω συστολής ή διαστολής [-].

Εξισώσεις 2D ροής

Οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης της δισδιάστατης ροής είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(hU)}{\partial x}+\frac{\partial(hV)}{\partial y}=q \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,xx}h\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,yy}h\frac{\partial U}{\partial y}\right)-\frac{\tau_{b,x}}{\rho R} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial H}{\partial y}+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,xx}h\frac{\partial V}{\partial x}\right)+\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{t,yy}h\frac{\partial V}{\partial y}\right)-\frac{\tau_{b,y}}{\rho R} \quad (4.34)$$

όπου h είναι το βάθος ροής [m], q ο όρος πηγής/καταβόθρας [m/s], U και V είναι οι μέσες ταχύτητες ροής κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα [m s⁻¹], $v_{t,xx}$ και $v_{t,yy}$ είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα [m² s⁻¹], $\tau_{b,x}$ και $\tau_{b,y}$ είναι η διατμητική τάση πυθμένα κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα [kg/m·s²], ρ είναι η πυκνότητα νερού [kg/m³] και R είναι η υδραυλική ακτίνα [m].

Όταν στις εξισώσεις (4.33) και (4.34) αγνοηθούν οι όροι επιτάχυνσης (ή αδράνειας), δηλ. όταν η ροή του πλημμυρικού κύματος κυριαρχείται από τις δυνάμεις της βαρύτητας, της πίεσης και της τριβής, τότε προκύπτουν οι DWE.

Μοντέλο τύρβης

Στις εξισώσεις (4.33) και (4.34) οι συντελεστές τυρβώδους συνεκτικότητας μπορεί να υπολογιστούν από το μοντέλο τύρβης Smagorinsky - Lilly (Smagorinsky, 1963· Deardorff, 1970), στο οποίο θεωρείται ότι η παραγωγή της τυρβώδους ενέργειας και της απόσβεσής της σε μικρές κλίμακες βρίσκονται σε ισορροπία:

$$v_t=Du_*h+(C_s\Delta)^2|\bar{S}| \quad (4.35)$$

όπου v_t είναι ο τανυστής της τυρβώδους συνεκτικότητας [m²/s], D είναι ο τανυστής του συντελεστή

διάχυσης [-], u είναι η ταχύτητα διάτμησης [m/s], C_s είναι ο συντελεστής Smagorinsky, ο οποίος κυμαίνεται από 0.05 μέχρι 0.2 [-], Δ είναι ο (όγκος κελιού)^{1/3} [m] και $|\bar{S}|$ είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης που υπολογίζεται από την εξίσωση (4.39):

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix} D \quad (4.36)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \varphi + D_T \cos^2 \varphi \quad D_{xx} = D_L \cos^2 \varphi + D_T \sin^2 \varphi \quad (4.37)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \varphi + D_T \cos^2 \varphi \quad (4.38)$$

όπου D_L είναι ο συντελεστής διάχυσης κατά τη διεύθυνση της ροής [-], D_T είναι ο συντελεστής διάχυσης κατά την εγκάρσια στη ροή διεύθυνση [-] και φ είναι η γωνία διεύθυνσης της ταχύτητας [-].

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2} \quad (4.39)$$

Το μοντέλο Smagorinsky - Lilly απαιτεί σημαντικό χρόνο για τον υπολογισμό των κλίσεων της ταχύτητας ροής και έτσι είναι από υπολογιστικής άποψης σχετικά ακριβό. Ωστόσο, από φυσικής άποψης είναι περισσότερο ακριβές, ιδίως σε περιοχές υψηλής διάτμησης, όπως π.χ. κοντά σε στερεά όρια. Στην παρούσα εργασία θεωρούνται οι «τυπικές» (default) τιμές του HEC-RAS 1D/2D που είναι $C_s=0.05$, $D_L=0.3$ και $D_T=0.1$.

4.6 Ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόγνωσης πλημμυρών

Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά τα περισσότερο διαδεδομένα υδρολογικά ή/και υδροδυναμικά μοντέλα προσομοίωσης πλημμυρών, τα οποία εφαρμόζονται σε ΜΠΠ.

4.6.1 Μοντέλα HEC

Το ολοκληρωμένο μοντέλο HEC αποτελείται από το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (2022) και το υδροδυναμικό μοντέλο HEC-RAS (2022). Σε πολλές εφαρμογές το μοντέλο HEC-HMS συνδυάζεται και με άλλα υδροδυναμικά μοντέλα (βλ. Πίνακα 4.2).

Το μοντέλο HEC-HMS είναι το πλέον διαδεδομένο για υδρολογικές εφαρμογές στο πεδίο των πλημμυρών (Scharffenberg & Harris, 2008). Αναπτύχθηκε από το USACE (2022) και αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου HEC-1. Πρακτικά, αποτελεί μια υπολογιστική πλατφόρμα διασύνδεσης μοντέλων, που προσομοιώνει διεργασίες του κύκλου μιας πλημμύρας, όπως της επιφανειακής διείδυσης, της άμεσης και βασικής απορροής, των υδρολογικών απωλειών, του μοναδιαίου υδρογραφήματος, και της υδρολογικής διόδευσης πλημμυρών. Επίσης, περιλαμβάνει διεργασίες που είναι απαραίτητες για τη συνεχή υδρολογική προσομοίωση, περιλαμβανομένης της εξατμισοδιαπνοής, της τήξης χιονιού και της εδαφικής υγρασίας.

Στο μοντέλο HEC-HMS υιοθετείται μια ημικατανομημένη σχηματοποίηση της ηλεκάνης απορροής, όπου σε κάθε υποηλεκάνη και για κάθε διεργασία μπορούν να οριστούν διαφορετικά μοντέλα ή διαφορετι-

κές παράμετροι του ίδιου μοντέλου. Η παραγωγή και διαχείριση των χωρικών δεδομένων γίνεται σε περιβάλλον GIS. Επίσης, το HEC-HMS διαθέτει συμπληρωματικά εργαλεία ανάλυσης για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου, την πρόγνωση της ροής, την αξιολόγηση της αβεβαιότητας του μοντέλου, τη διάβρωση και τη μεταφορά στερεών και την ποιότητα του νερού.

Το HEC-RAS (2022) προσομοιώνει την υδροδυναμική συμπεριφορά της ροής του νερού σε δίκτυα φυσικών ή/και τεχνητών αγωγών και σε περιοχές ενδεχόμενης κατάκλισης από την πλημμύρα. Με τους υπολογισμούς, οι οποίοι μπορεί να είναι μονοδιάστατοι ή/και διδιάστατοι, προσδιορίζονται η στάθμη της επιφάνειας ροής, η ταχύτητα ροής και η έκταση των περιοχών κατάκλισης. Το HEC-RAS περιλαμβάνει μια διεπαφή χρήστη, ξεχωριστά προγράμματα ανάλυσης, δυνατότητες αποθήκευσης – διαχείρισης δεδομένων και εγκαταστάσεις γραφικών και εκθέσεων αναφοράς. Το HEC-RAS πραγματοποιεί υπολογισμούς μόνιμης ροής, 1D ή/και 2D μη-μόνιμης ροής, μεταφοράς φερτών, και ποιότητας νερού (Brunner, 2021a).

4.6.2 Μοντέλα MIKE

Τα ολοκληρωμένα μοντέλα MIKE αποτελούν συνδυασμούς των μοντέλων MIKE (2022), που αναπτύχθηκαν από την Εταιρεία DHI, όπως του MIKE SHE (2022) με το MIKE FLOOD (2022). Σημειώνεται, ότι το μοντέλο MIKE FLOOD συνδυάζεται και με άλλα υδρολογικά μοντέλα (βλ. Πίνακα 4.2).

Το MIKE SHE (2022) είναι ένα υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης και μπορεί να διατυπωθεί τόσο ως καταμετρημένο όσο και ως αδιαμέριστο. Με το MIKE SHE προσομοιώνονται (α) οι υδρολογικές διεργασίες του εδάφους, όπως η εξατμισοδιαπνοή, η διήθηση και η ροή των νερών της πλημμύρας πάνω στο έδαφος, (β) η ροή των υπόγειων υδάτων στην ακόρεστη ζώνη και τον υδροφόρο ορίζοντα, (γ) η ροή σε υδατορέματα και αγωγούς, (δ) οι αλληλεπιδράσεις των παραπάνω σε μικρές χωρικές κλίμακες (Abbott et al., 1986), και (ε) οι διεργασίες της άρδευσης και της τήξης του χιονιού και η ποιότητα των νερών.

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς προσομοιώνεται με το μοντέλο MIKE HYDRO River (2022), τον διάδοχο του MIKE 11. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου MIKE SHE περιλαμβάνουν τις δυνατότητες GIS, τη δυνατότητα μοντελοποίησης διεργασιών με βάση τη διαθεσιμότητα δεδομένων, την παρακολούθηση σωματιδίων στα υπόγεια ύδατα και την αυτό-βαθμονόμηση. Επιπλέον, το μοντέλο MIKE SHE είναι συμβατό με την πλατφόρμα OpenMI (2022) και μπορεί να συνδεθεί με άλλα μοντέλα MIKE ή της πλατφόρμας OpenMI.

Το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE FLOOD πραγματοποιεί υδραυλικούς υπολογισμούς της 1D και 2D ροής της πλημμύρας με τα μοντέλα MIKE HYDRO River και MIKE 21 (2022), αντίστοιχα, σε υδατορέματα, πλημμυρικά πεδία, δρόμους με δίκτυα αποχέτευσης με το μοντέλο MIKE+ (2022), που αντικατέστησε το MIKE URBAN+ και άλλα υδραυλικά έργα, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις των παραπάνω. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου MIKE FLOOD περιλαμβάνουν τις δυνατότητες GIS, Graphical User Interface (GUI), ένα ολοκληρωμένο πακέτο υδραυλικών έργων και δυνατότητες πραγματοποίησης παράλληλων υπολογισμών.

4.6.3 Μοντέλο LISFLOOD

Το LISFLOOD (2022) είναι ένα χωρικά πλήρως καταμετρημένο μοντέλο υδατικών πόρων. Χρησιμοποιεί δεδομένα εισόδου που παράγονται σε περιβάλλον raster GIS. Αναπτύχθηκε από το JRC της

Ευρωπαϊκής Επιτροπής από το 1997 με στόχο να αποτελέσει ένα εργαλείο γενικής χρήσης σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (De Roo et al., 2000· Van der Knijff et al., 2010).

Το τυπικό μοντέλο LISFLOOD αποτελείται από τέσσερα επιμέρους μοντέλα, τα οποία υπολογίζουν (α) το ισοζύγιο μάζας του νερού σε τρεις στρώσεις του εδάφους, (β) τη ροή των υπόγειων υδάτων, (γ) τη διόδευση της επιφανειακής απορροής προς τους πλησιέστερους αγωγούς και (δ) τη ροή στους αγωγούς. Έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων υδατικών πόρων, όπως στην προσομοίωση των μέτρων πρόληψης πλημμύρας και της διευθέτησης υδατορεμάτων, την πρόγνωση πλημμύρας, την εκτίμηση και την πρόγνωση της ξηρασίας και της εδαφικής υγρασίας, και τη διερεύνηση των επιπτώσεων της Κλιματικής Αλληλαγής στους υδατικούς πόρους.

Η τρέχουσα πιο σημαντική εφαρμογή του LISFLOOD υλοποιείται στο πλαίσιο του EFAS (2022). Επίσης, το LISFLOOD θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη έκδοση του GloFAS (2022), όπως περιγράφεται αναλυτικά στους Alfieri et al. (2020). Το EFAS και το GloFAS λειτουργούν στο πλαίσιο του Συστήματος Διαχείρισης Έκτακτης Ανάγκης του Copernicus (EMS, 2022), βλ. υποκεφάλαιο 4.7.

4.6.4 Μοντέλο SAC-SMA

Το Sacramento Soil Moisture Accounting Model (SAC-SMA) είναι ένα από τα παλαιότερα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Joint Federal State River Forecasting Center των ΗΠΑ (Burnash et al., 1973).

Το SAC-SMA λαμβάνει υπόψη την εδαφική υγρασία με χωροταξικές ομαδοποιημένες παραμέτρους και προσομοιώνει την απορροή σε μια λεκάνη απορροής. Οι υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης απορροής αναπαρίστανται μέσω ενός εννοιολογικού συστήματος διασυνδεδεμένων «δεξαμενών», κάθε μία από τις οποίες αναφέρεται σε διαφορετική συνιστώσα της απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την εδαφική υγρασία. Από την επαλληλία των επιμέρους ροών παράγεται η συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφεται στον Anderson (1997).

Το SAC-SMA θεωρείται ιδανικό για εφαρμογή σε μεγάλες λεκάνες απορροής και χρησιμοποιεί δεδομένα πολλών ετών για τη βαθμονόμησή του. Το SAC-SMA είναι το βασικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται στο Σύστημα Πρόγνωσης Ποταμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (NWSRFS, 2022) για την έκδοση προγνώσεων σε υδατορέματα. Ο υπολογιστικός κώδικας του SAC-SMA είναι δομημένος σε Fortran και είναι δημόσια προσβάσιμος.

4.6.5 Μοντέλο TOPMODEL

Το TOPOgraphy based hydrological MODEL (TOPMODEL) (Beven & Binley, 2019) είναι ένα καταμεμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης (Beven & Kirkby, 1979). Το εννοιολογικό υπόβαθρο του TOPMODEL βασίζεται στην χρήση ενός δείκτη υδρολογικής ομοιότητας, που υπολογίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

Το δυναμικό TOPMODEL αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα και αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή του αρχικού TOPMODEL, έχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και μικρότερο υπολογιστικό φόρτο (Beven & Freer, 2001). Το TOPMODEL συνδυάζεται με υδροδυναμικά μοντέλα, όπως π.χ. το HEC-RAS (Mai & De Smedt, 2017).

4.6.6 Μοντέλο FLO-2D PRO

Το FLO-2D PRO είναι ένα ολοκληρωμένο υδρολογικό και υδροδυναμικό μοντέλο, με το οποίο προσομοιώνονται διάφορες περιπτώσεις και διεργασίες πλημμυρών, όπως της βροχόπτωσης, της απορροής, της διόδευσης πλημμύρας, της υπερχειλίσης όχθων και ροής σε περιοχές κατάκλισης και αστικές περιοχές (π.χ. σε δρόμους), της πλημμυρικής ροής εξαιτίας θραύσης φράγματος ή αναχωμάτων, της αλληλεπίδρασης της ροής επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, της ροής σε περιοχές με εμπόδια, της ροής σε αγωγούς αποχέτευσης όμβριων υδάτων, των λασπορροών και των ροών με φερτά υλικά. Επίσης, εφαρμόζεται και σε μελέτες ασφάλισης έναντι πλημμυρών (FLO-2D, 2022).

4.7 Συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών μεγάλης κλίμακας

Σήμερα, τα περισσότερα ΜΠΠ εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιοχές, λικάνες απορροής ή χώρες (Alfieri et al., 2012). Η δημιουργία ενός συστήματος πρόγνωσης πλημμυρών σε μεγάλη κλίμακα, όπως π.χ. παγκόσμια ή ηπειρωτική, είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, εξαιτίας των σημαντικών διαφοροποιήσεων στις μετεωρολογικές διεργασίες, στις υδρολογικές διεργασίες (βροχόπτωσης-απορροής), και στις υδροδυναμικές διεργασίες στα υδατορέματα (Pappenberger et al., 2009). Κατά τα τελευταία έτη, έχει καταστεί δυνατή η δόμηση τέτοιων συστημάτων, εξαιτίας (α) της δυνατότητας ολοκληρωμένης προσομοίωσης με ΜΠΠ και μετεωρολογικά μοντέλα, (β) των βελτιώσεων που επιτεύχθηκαν στη διαχείριση των δεδομένων των δορυφορικών παρατηρήσεων και των ΜΠΠ, και (γ) της αυξημένης ισχύος και πόρων των Η/Υ.

Μέχρι σήμερα, έχουν παρουσιαστεί μια σειρά από συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών μεγάλης κλίμακας. Αναλυτικές πληροφορίες βρίσκονται στις ιστοσελίδες τους και μια σύγκρισή τους στους Emerton et al. (2016).

Σε κλίμακα ηπείρου έχουν αναπτυχθεί τα ακόλουθα συστήματα:

- ▶ το European Flood Awareness System (EFAS, 2022) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής,
- ▶ το European Hydrological Predictions for the Environment (E-HYPE, 2022) του Σουηδικού Μετεωρολογικού και Υδρολογικού Ινστιτούτου (SMHI),
- ▶ το Flood Forecasting and Warning Service (FFWS) που διαχειρίζεται το Γραφείο Μετεωρολογίας (BoM) της Αυστραλίας, και
- ▶ το Hydrologic Ensemble Forecasting Service (HEFS, 2022) της NWS των ΗΠΑ.

Σε παγκόσμια κλίμακα έχουν αναπτυχθεί τα ακόλουθα συστήματα :

- ▶ το Global Flood Awareness System (GloFAS, 2022) του ECMWF σε συνεργασία με το JRC και το Πανεπιστήμιο του Reading,
- ▶ το Global Flood Forecasting and Information System (GLOFFIS, 2022) της Deltares, και
- ▶ το Global Flood Monitoring System (GFMS, 2022) που αναπτύχθηκε από τη NASA και το Πανεπιστήμιο του Maryland, και χρησιμοποιεί τις τιμές βροχόπτωσης που υπολογίζονται από δορυφόρους ως δεδομένα εισόδου σε ένα υδρολογικό μοντέλο, για να δημιουργήσει σε πραγματικό χρόνο χάρτες συμβάντων πλημμύρας.

4.8 Βιβλιογραφία

1. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme hydrologique europeen, “she”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1-2), 45-59.
2. Adamowski, J. F. (2008). Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis. *Journal of Hydrology*, 353, 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.013>
3. Aichouri, I., Hani, A., Bougherira, N., Djabri, L., Chaffai, H., & Lallahem, S. (2015) River flow model using artificial neural networks. *Energy Procedia*, 74, 1007–1014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.832>
4. Al-Fawa'Reh, M., Hawamdeh, A., Alrawashdeh, R., & Jafar, M. T. (2021). Intelligent Methods for flood forecasting in Wadi al Wala, Jordan. *Proceedings of 2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN)*, Taiz, Yemen, pp. 1-9. <https://10.1109/ICOTEN52080.2021.9493425>
5. Alfieri, L., Lorini, V., Hirpa, F. A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2020). A global streamflow reanalysis for 1980–2018. *Journal of Hydrology X*, 6, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>
6. Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008>
7. Anderson, E. A. (1997). Hydrologic model calibration using the Interactive Calibration Program (ICP), report, Hydrol. Res. Lab., US Natl. Weather Serv., Silver Spring, Md.
8. AQUAMAN (2016). Τεχνική Έκθεση ΣΑΕ075/8 AQUAMAN, Καινοτόμες Μεθοδολογίες Διαχείρισης Υδατικών Πόρων για την Προσαρμογή της Κλιματικής Αλληλαγής και Διακυβέρνησης της Περιφέρειας Κρήτης, Παραδοτέο 2 - Επιπτώσεις κλιματικών αλληλαγών στη διαχείριση υδατικών πόρων της Κρήτης http://aquaman.tuc.gr/images/users/sotiria/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%BF%CF%84%CE%AD%CE%BF_2.pdf
9. Beven, K., & Binley, A. (2019). TOPMODEL (Topography based Hydrological Model), Model Item, OpenGMS. <https://geomodeling.njnu.edu.cn/modelItem/5ee7cd6a-c71d-45a8-b7d6-060c07978be9>
10. Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horanyi, A., Muoz Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J. R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J. N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>
11. Beven, K. J. & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69.
12. Beven, K., & Freer, J. (2001). A dynamic topmodel. *Hydrological Processes*, 15(10), 1993-2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.252>
13. Blazkova, S., & Beven, K. (2009). A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Skalka catchment, Czech Republic. *Water Resources Research*, 45(12).
14. Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation—a review. *Environmental Modelling & Software*, 18(4), 309-318.
15. Brunner, G. (2021a). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 6.0, USACE CEC: Davis, CA, USA.
16. Brunner, G. (2021b). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 6.0, USACE CEC: Davis, CA, USA.

17. Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service, and State of California, Department of Water Resources.
18. Calver, A., Stewart, E. & Goodsell, G. (2009). Comparative analysis of statistical and catchment modelling approaches to river flood frequency estimation. *Journal of Flood Risk Management*, 2(1), 24-31.
19. Castangia, M., Grajales, L. M., Aliberti, A., Rossi, C., Macii, A., Macii, E., & Patti, E. (2023). Transformer neural networks for interpretable flood forecasting. *Environmental Modelling & Software*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105581>
20. Chang, F. J., & Chang, Y. T. (2006). Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.04.015>
21. Chang, F. J., Chen, P. A., Lu, Y. R., Huang, E., & Chang, K. Y. (2014). Real-time multi-step-ahead water level forecasting by recurrent neural networks for urban flood control. *Journal of Hydrology*. 517, 836–846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.013>
22. Chiang, Y. M., Chang, F. J., Jou, B. J. D., & Lin, P. F. (2007). Dynamic ANN for precipitation estimation and forecasting from radar observations. *Journal of Hydrology*, 334 (1), 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.021>
23. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Larry, W. M. (1988). *Applied Hydrology*. International Edition, MacGraw-Hill, Inc, 149.
24. Chung, C. H., & Salas, J. D. (2000). Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), 259 – 268. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(259\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(259))
25. Cimorelli, L., Cozzolino, L., D’Aniello, A., & Pianese, D. (2018). Exact solution of the Linear Parabolic Approximation for flow-depth based diffusive flow routing. *Journal of Hydrology*, 563, 620–632.
26. CLC (2018). CORINE Land Cover. Copernicus Land Monitoring Service. European Environment Agency (EEA). http://mapsportal.yopen.gr/layers/geonode:gr_clc2018
27. Climate Change in Australia - CLIMATECHANGEAUSTRALIA (2020). <https://www.climatechangeinaustralia.gov.au/en/learning-support/climate-models/downscaling/>
28. CMIP5 (2022). <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>
29. CMIP6 (2022). <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>
30. Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training - COMET (2022). Runoff Processes. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Colorado, US. https://download.comet.ucar.edu/memory-stick/hydro/basic_int/runoff/index.htm
31. COPERNICUS (2022). Copernicus Climate Change Service - Global Impacts. <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet8.pdf>
32. CORDEX (2022). Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, CORDEX. <https://cordex.org/>
33. Danso-Amoako, E., Scholz, M., Kalimeris, N., Yang, Q., & Shao, J. (2012). Predicting dam failure risk for sustainable flood retention basins: A generic case study for the wider Greater Manchester area. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(5), 423–433. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.02.003>
34. De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Van Deursen, W. P. A. (2000). Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. *Hydrological Processes*, 14(11 12), 1981-1992.
35. Dearnorff, J. (1970). A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 41(2), 453–480.
36. DKRZ (2022). Deutsches Klimarechenzentrum. <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>
37. Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2022). A reliable hybrid outlier robust non-tuned rapid machine

- learning model for multi-step ahead flood forecasting in Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, 614. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128592>
38. ECMWF (2022). European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>
 39. EFAS (2022). European Flood Awareness System. <https://www.efas.eu/en>
 40. E-HYPE (2022). European Hydrological Predictions for the Environment. <https://hypeweb.smhi.se>
 41. Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., Salamon, P., Brown, J. D., Hjerdt, N., Donnelly, C., Baugh, C. A., & Cloke, H. L. (2016). Continental and global scale flood forecasting systems. *WIREs Water*, 3, 391-418. <https://doi.org/10.1002/wat2.1137>
 42. EMS (2022). Emergency Management System. <https://emergency.copernicus.eu/>
 43. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
 44. EURO-CORDEX (2022). <https://www.euro-cordex.net/>
 45. FLO-2D (2022). <https://flo-2d.com/flo-2d-pro/>
 46. GFMS (2022). Global Flood Monitoring System. <http://flood.umd.edu/>
 47. Ghose, D. K. (2018). Measuring discharge using back-propagation neural network: a case study on Brahmani River basin. *Intelligent Engineering Informatics. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 695, 591–598. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7566-7_59
 48. Gizaw, M. S., & Gan, T. Y. (2016). Regional flood frequency analysis using support vector regression under historical and future climate. *Journal of Hydrology*, 538, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.041>
 49. GLoFAS (2022). Global Flood Awareness System. <https://www.globalfloods.eu/>
 50. GLOFFIS (2022). Global Flood Forecasting and Information System. <https://www.deltares.nl/app/uploads/2017/06/Global-to-local-hazard-and-impact-forecasting.pdf>
 51. Grecu, M., & Krajewski, W. F. (2000). A large-sample investigation of statistical procedures for radar-based short-term quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239(1-4), 69-84. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00360-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00360-7)
 52. Grillakis, M. G., & Koutroulis, A. G. (2018). Hydrometeorological Extremes in a Warmer Climate: A Local Scale Assessment for the Island of Crete. *Proceedings 2019*, 7, 22. <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05818>
 53. Grimaldi, S., Petroselli, A., & Serinaldi, F. (2012). Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event based approach. *Hydrological Processes*, 26(20), 3124-3134.
 54. Gupta, A., & Kumar, A. (2022). Two-step daily reservoir inflow prediction using ARIMA-machine learning and ensemble models, *Journal of Hydro-environment Research*, 45, 39-52, <https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.10.002>
 55. Haberlandt, U., Ebner von Eschenbach, A. D., & Buchwald, I. (2008). A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(6), 1353-1367.
 56. Haque, M. H., Sadia, M., & Mustaq, M. (2021). Development of Flood Forecasting System for Someshwari-Kangsa Sub-watershed of Bangladesh-India Using Different Machine Learning Techniques. *Copernicus Meetings*, No. EGU21-15294. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15294>
 57. HEC-HMS (2022). Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

58. HEC-RAS (2022). Hydrologic Engineering Center's River Analysis System. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
59. HEFS (2022). Hydrologic Ensemble Forecasting Service. https://www.weather.gov/abrfc/about_HEFS
60. Heizer, M., Scheidl, C., Eisl, J., Spangl, B., & Hübl, J. (2015). Process type identification in torrential catchments in the eastern Alps. *Geomorphology*, 232, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.007>
61. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
62. Jimeno-Saez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Pulido-Velázquez, D., & Cecilia, J. (2017). Estimation of instantaneous peak flow using machine-learning models and empirical formula in peninsular Spain. *Water*, 9(5), 347. <https://doi.org/10.3390/w9050347>
63. Ju, Q., Yu, Z., Hao, Z., Ou, G., Zhao, J., & Liu, D. (2009). Division-based rainfall-runoff simulations with BP neural networks and Xinanjiang model. *Neurocomputing*, 72, 2873–2883. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.12.032>
64. IFS (2018). Integrated Forecast System. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/80895-ifs-documentation-cy45r1-part-iv-physical-processes>
65. IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
66. IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
67. IPCC (2021). *The Sixth Assessment Report of the IPCC*. https://unfccc.int/topics/science/workstreams/cooperation-with-the-ipcc/the-sixth-assessment-report-of-the-ipcc?gclid=Cj0KCQiAorKfBhCOARIsAHDzsluXLtpYiya52oCWmleR2RDFnilY9xgUk5uVjc_HfyXBV3uljrDWj6kaAgAnEALw_wcB
68. Karyotis, C., Maniak, T., Doctor, F., Iqbal, R., Palade, V., & Tang, R. (2019). Deep Learning for Flood Forecasting and Monitoring in Urban Environments. *Proceedings of 18th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, Boca Raton, FL, USA, pp. 1392–1397. <https://10.1109/ICMLA.2019.00227>
69. Kim, B., Sanders, B. F., Famiglietti, J. S., & Guinot, V. (2015). Urban flood modeling with porous shallow-water equations: A case study of model errors in the presence of anisotropic porosity. *Journal of Hydrology*, 523, 680–692. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.059>
70. Kim, S., Matsumi, Y., Pan, S., & Mase, H. (2016). A real-time forecast model using artificial neural network for after-runner storm surges on the Tottori Coast, Japan. *Ocean Engineering*, 122, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.017>
71. Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*, 10(6), 362.
72. Komorník, J., Komorníková, M., Mesiar, R., Szőkeová, D., & Szolgay, J. (2006). Comparison of forecasting performance of nonlinear models of hydrological time series. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1127–1145. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.05.006>
73. Kourgialas, N. N., Dokou, Z., & Karatzas, G. P. (2015). Statistical analysis and ANN modeling for predicting hydrological extremes under climate change scenarios: The example of a small

- Mediterranean agro-watershed. *Journal of Environmental Management*, 154, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.034>
74. Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tsanis, I.K. et al. (2015). Exploring the ability of current climate information to facilitate local climate services for the water sector. *Earth Perspectives* 2, 6. <https://doi.org/10.1186/s40322-015-0032-5>
 75. Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., & Jacob, D. (2016). Cross sectoral impacts on water availability at +2 °C and +3 °C for East Mediterranean island states: The case of Crete. *Journal of Hydrology*, 532, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.015>
 76. Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K. L., Kram, T., Riahi, K., Winkler, H., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for Climate Change Research: The concept of shared climate policy assumptions. *Climatic Change*, 122(3), 401–414. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5>
 77. Larson, C. L., & Reich, B. M. (1973). Relationship of observed rainfall and runoff recurrence intervals. In *Floods and Droughts. Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology*.
 78. Le, X. H., Ho, H. V., Lee, G., & Jung, S. (2019). Application of long short-term memory (LSTM) neural network for flood forecasting. *Water*, 11(7), 1387. <https://doi.org/10.3390/w11071387>
 79. LISFLOOD (2022). <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-lisflood>
 80. Lohani, A. K., Goel, N. K., Bhatia, K. K. S. (2014). Improving real time flood forecasting using fuzzy inference system. *Journal of Hydrology*, 509, 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.021>
 81. Luchetta, A. & Manetti, S. (2003). A real time hydrological forecasting system using a fuzzy clustering approach, *Computers & Geosciences*, 29(9), 1111-1117. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00137-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00137-7)
 82. Luu, C., Meding, J., & Mojtahedi, M. (2019). Analyzing Vietnam's national disaster loss database for flood risk assessment using multiple linear regression-TOPSIS. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101153>
 83. Maddox, R. A., Zhang, J., Yong, B., & Howard, K. (2002) Weather Radar Coverage over the Contiguous United States. *Weather and Forecasting*, 17, 927-934. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<0927:WRCOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0927:WRCOTC>2.0.CO;2)
 84. Mai, D., & De Smedt, F. (2017). A combined hydrological and hydraulic model for flood prediction in Vietnam applied to the Huong River Basin as a test case study. *Water*, 9(11), 879. <https://doi.org/10.3390/w9110879>
 85. Mendlik, T., & Gobiet, A. (2016). Selecting climate simulations for impact studies based on multivariate patterns of climate change. *Climatic Change* 135, 381–393. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1582-0>
 86. Mekanik, F., Imteaz, M., Gato-Trinidad, S., & Elmahdi, A. (2013). Multiple regression and artificial neural network for long-term rainfall forecasting using large scale climate modes. *Journal of Hydrology*, 503, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.035>
 87. MIKE (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/>
 88. MIKE + (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mikeplus>
 89. MIKE 21 (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>
 90. MIKE FLOOD (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood>
 91. MIKE HYDRO River (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-hydro-river>
 92. MIKE SHE (2022). <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>
 93. MIT (2022). MIT – Climate Portal. <https://climate.mit.edu/explainers/climate-models>
 94. Mitsopoulos, G, Diakakis, M., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E., & Stamou, A. I. (2023). Flood

- Risk Reduction using Nature-Based Solutions in Climate Change Conditions, Proceedings of the 40th IAHR World Congress, 21-25 August 2023, Vienna, Austria.
95. Moges, S. A., & Taye, M. T. (2019). Chapter 30 - Regional flood frequency curves for remote rural areas of the Nile River Basin: The case of Baro-Akobo drainage basin, Ethiopia. In Melesse, A. M., Abtew, W., & Senay, G. (Eds.), *Extreme Hydrology and Climate Variability*, Elsevier, pp. 385-393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00030-0>
 96. Moretti, G., & Montanari, A. (2007). AFFDEF: a spatially distributed grid-based rainfall-runoff model for continuous time simulations of river discharge. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 823-836.
 97. Mosavi, A., & Edalatifar, M. A. (2018). A Hybrid Neuro-Fuzzy Algorithm for Prediction of Reference Evapotranspiration. *Proceedings of INTER-ACADEMIA 2018: Recent Advances in Technology Research and Education*, Cham, Switzerland, pp. 235-243. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99834-3_31
 98. Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau K. W. (2018). Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review. *Water*, 10(11), 1536. <https://doi.org/10.3390/w10111536>
 99. Mosavi, A., Rabczuk, T., & Varkonyi-Koczy, A. R. (2017). Reviewing the novel machine learning tools for materials design. *Proceedings of INTER-ACADEMIA 2017: Recent Advances in Technology Research and Education*, Cham, Switzerland, pp. 50-58. http://doi.org/10.1007/978-3-319-67459-9_7
 100. Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K. et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
 101. Moussa, R., & Bocquillon, C. (2009). On the use of the diffusive wave for modelling extreme flood events with overbank flow in the floodplain. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 116-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.006>
 102. Munoz-Sabater, J., Dutra, E., Agusti-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodriguez-Fernandez, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). Era5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
 103. NCAR (2023). National Center for Atmospheric Research. ERA-Interim Project, DOI: 10.5065/D6CR5RD9. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds627.0/>
 104. National Research Council. (1994). Estimating bounds on extreme precipitation events: A brief assessment. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9195>
 105. Nayak, M. A., & Ghosh, S. (2013). Prediction of extreme rainfall event using weather pattern recognition and support vector machine classifier. *Theoretical and Applied Climatology*, 114 (3), 583-603. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0867-3>
 106. Nayak, P., Sudheer, K., Rangan, D., & Ramasastri, K. (2005). Short-term flood forecasting with a neurofuzzy model. *Water Resources Research*, 41 (4). <https://doi.org/10.1029/2004WR003562>
 107. NERC (1975). Flood Studies Report, Natural Environmental Research Council. Department of the Environment, London.
 108. Nevo, S., Morin, E., Gerzi Rosenthal, A., Metzger, A., Barshai, C., Weitzner, D., Voloshin, D., Kratzert, F., Elidan, G., Dror, G., Begelman, G., Nearing, G., Shalev, G., Noga, H., Shavitt, I., Yuklea, L., Royz, M., Giladi, N., Peled Levi, N., ... Matias, Y. (2022). Flood forecasting with machine learning models in an operational framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 4013-4032. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4013-2022>
 109. Nguyen, D. T., & Chen, S. T. (2020). Real-Time Probabilistic Flood Forecasting Using Multiple Machine Learning Methods. *Water*, 12, 787. <https://doi.org/10.3390/w12030787>
 110. NOAA (2022). <https://www.climate.gov/media/10042>

111. NWSRFS (2022). U.S. National Weather Service River Forecast System. https://www.weather.gov/owp/oh_hrl_nwsrfs_users_manual_htm_xrfsdocpdf
112. O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (scenariomip) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
113. OpenMI (2022). Open Modelling Interface. <https://publicwiki.deltares.nl/display/OPENMI/Home>
114. Ortiz-García, E., Salcedo-Sanz, S., & Casanova-Mateo, C. (2014). Accurate precipitation prediction with support vector classifiers: A study including novel predictive variables and observational data. *Atmospheric Research*, 139, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.012>
115. Pappenberger, F., Cloke, H. L., Balsamo, G., Ngo-Duc, T., & Oki, T. (2009). Global runoff routing with the hydrological component of the ECMWF NWP System. *International Journal of Climatology*, 30(14), 2155–2174. <https://doi.org/10.1002/joc.2028>
116. Puttinaovaratt, S., & Horkaew, P. (2020). Flood Forecasting System Based on Integrated Big and Crowdsourced Data by Using Machine Learning Techniques. *IEEE Access*, 8, 5885–5905. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963819>
117. Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
118. Saghafian, B., Haghnegahdar, A., & Dehghani, M. (2017). Effect of ENSO on annual maximum floods and volume over threshold in the southwestern region of Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 62 (7), 1039–1049. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1296229>
119. Saksena, S. (2017, January 13). Introduction to Flood Frequency Analysis. *Data and Model Driven Hydrology Education*. <https://serc.carleton.edu/pageset/119/1>
120. Scharffenberg, W., & Harris, J. (2008). Hydrologic engineering center hydrologic modeling system, HEC-HMS: interior flood modeling. In *World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a*, pp. 1-3.
121. Seo, D. J., & Breidenbach, J. P. (2002). Real-Time Correction of Spatially Nonuniform Bias in Radar Rainfall Data Using Rain Gauge Measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 3, 93–111. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2)
122. Shen, H. Y., & Chang, L. C. (2013). Online multistep-ahead inundation depth forecasts by recurrent NARX networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 935–945. <https://doi.org/10.5194/hess-17-935-2013>
123. Sherman, L. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage basins. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 332–339.
124. Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:gcewtp>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2)
125. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. 10.5065/D68S4MVH
126. Soil Conservation Service - SCS (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. Department of Agriculture, Washington DC, 762 p.

127. Stamou A. (2014). Rapidly Varying Flows in Hydraulic Engineering, Technical University of Munich, Munich.
128. Stamou A. (2017). Environmental Hydrodynamic Modelling, Technical University of Munich, Munich.
129. Torabi, M., Hashemi, S., Saybani, M. R., Shamshirband, S., & Mosavi, A. (2019). A Hybrid clustering and classification technique for forecasting short-term energy consumption. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38 (1), 66–76. <https://doi.org/10.1002/ep.12934>
130. Tsakiri, K., Marsellos, A., & Kapetanakis, S. (2018). Artificial neural network and multiple linear regression for flood prediction in Mohawk River, New York. *Water*, 10(9), 1158. <https://doi.org/10.3390/w10091158>
131. USACE (2022). U.S. Army Corp of Engineers. <https://www.usace.army.mil/>
132. Valipour, M., Banihabib, M. E., & Behbahani, S. M. R. (2013). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *Journal of Hydrology*, 476, 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.017>
133. Van Der Knijff, J. M., Younis, J., & De Roo, A. P. J. (2010). LISFLOOD: a GIS based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 189-212.
134. Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The Representative Concentration Pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
135. Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland–Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 208-225.
136. Westphal, J. A. (2001). Hydrology for drainage system design and analysis. stormwater collection systems design handbook.
137. WCRP (2022). World Climate Research Program WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>.
138. Wright, D. B., Yu, G., & England, J. F. (2020). Six decades of rainfall and flood frequency analysis using stochastic storm transposition: Review, progress, and prospects. *Journal of Hydrology*, 585. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124816>.
139. Xu, Z., & Li, J. (2002). Short-term inflow forecasting using an artificial neural network model. *Hydrological Processes*, 16(12), 2423–2439. <https://doi.org/10.1002/hyp.1013>
140. Yan, B., Mu, R., Guo, J., Liu, Y., Tang, J., & Wang, H. (2022). Flood risk analysis of reservoirs based on full-series ARIMA model under climate change. *Journal of Hydrology*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127979>.
141. Yu, P.S., Yang, T.C., Chen, S.Y., Kuo, C.M., & Tseng, H.W. (2017). Comparison of random forests and support vector machine for real-time radar-derived rainfall forecasting. *Journal of Hydrology*, 552, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.020>
142. Βαφειάδης, Μ. (2001) Σημειώσεις Επιφανειακή Υδρολογία: Χρόνος Συγκεντρώσεως. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη.
143. ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (2014). Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων. Ανάθεση: ΓΠΕΤ, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε. - Γραφείο Μαχαίρα - Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος (ΕΜΠ) - Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Πλαίσιο: ΕΣΠΑ "Συνεργασία", Μάρτιος 2011–Μάρτιος 2014.
144. Ευστρατιάδης, Α. (2011). Σημειώσεις Υδρολογίας Πλημμυρών και Σχεδιασμού Έργων Αποχέτευσης

- σης Ομβρίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα.
145. Κουτσογιάννης, Δ. (2016). Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα.
 146. ΚΥΑ (2017). Κοινή Υπουργική Απόφαση Αριθμ. οικ. 140055/2017, ΦΕΚ 428/Β/15-2-2017, Τεχνικές προδιαγραφές σύνταξης του περιεχομένου του φακέλου οριοθέτησης κατ' εφαρμογή της παραγράφου 5 του άρθρου 2 του ν. 4258/2014 - Διευκρινίσεις για την εφαρμογή της διαδικασίας οριοθέτησης. <https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/antiseismikos-kanonismos/koine-upourgike-apophase-oik-140055-2017.html>
 147. Μαμάσης, Ν. (2012). Σημειώσεις για Πλημμύρες – Εκτίμηση Πλημμυρικών Αιχμών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα.
 148. Μιμίκου, Μ. Α. & Μπαλτάς, Ε. Α. (2012). Τεχνική Υδρολογία, 6η Έκδοση, Εκδ. Παπασωτηρίου, ISBN: 9789604910663.
 149. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ, 2001). http://www.ggde.gr/dmdocuments/omoe_1_1.pdf
 150. ΟΜΟΕ (2002). Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων. Τεύχος 8 : Αποχέτευση – Στράγγιση - Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ - ΑΣΥΕΟ). <http://www.ggde.gr/dmdocuments/dmeot7.pdf>
 151. ΟΜΟΕ (2013). Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων. Τεύχος 1: Λειτουργική Κατάταξη Οδικού Δικτύου (ΟΜΟΕ - ΛΚΟΔ). http://www.ggde.gr/dmdocuments/omoe_1_1.pdf
 152. ΠΕΣΠΚΑ (2020). Περιφερειακό Σχέδιο Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή Αττικής, Περιφέρεια Αττικής. https://www.patt.gov.gr/koinonia/perivallon/pespka/pespka_kentriki/
 153. ΠΔ (1974). <https://segm.gr/%CF%80%CE%B4-69674/>
 154. Στάμου, Α. Ι. (2016). Εφαρμοσμένη Υδραυλική - Ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια, 3η έκδοση, Παπασωτηρίου, ISBN 9789604911097.
 155. Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί Πόροι Ι: Τεχνική Υδρολογία & εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων, Αθήνα.
 156. ΥΠΕΝ (2018). Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας. https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=504
 157. ΥΠΕΝ (2022). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. ΣΧΕΔΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΗΣ ΧΩΡΑΣ. Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής CN με την μεθοδολογία SCS. https://floods.ypeka.gr/egyfloods/reports/Ipologismos_CN.pdf
 158. ΥΠΕΧΩΔΕ (2002). Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων – Τεύχος 8: Αποχέτευση, Στράγγιση, Υδραυλικά Έργα Οδών, ΟΜΟΕ – ΑΣΥΕΟ.

Εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας

Μ. Διακάκης, Α. Ι. Στάμου

5.1 Η Οδηγία της Ευρωπαϊκή Ένωσης για τις πλημμύρες

Για τη μείωση και τη διαχείριση των κινδύνων που ενέχουν οι πλημμύρες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η Οδηγία αυτή δημοσιεύτηκε στην Επίσημη Εφημερίδα τον Νοέμβριο του 2007 (ΕΥ, 2007) και συχνά αναφέρεται ως «**Οδηγία για τις Πλημμύρες**» (ΟΠ).

Σύμφωνα με την ΟΠ, «κίνδυνος πλημμύρας» είναι η πιθανότητα ενός συμβάντος πλημμύρας μαζί με την πραγματική ζημιά στην ανθρώπινη υγεία και τη ζωή, το περιβάλλον και την οικονομική δραστηριότητα που συνδέονται με αυτό το συμβάν. Ο κίνδυνος πλημμύρας εκφράζεται ποσοτικά σε χρηματικές μονάδες ή σε μονάδες απώλειας ζωής (Merz et al., 2004), όταν αυτές είναι μετρήσιμες, ή εκτιμάται ποιοτικά, όπως π.χ. με κατανομή σε τάξεις, όταν οι ζημιές είναι άυλεις, όπως κοινωνικές, περιβαλλοντικές, ή/και πολιτιστικές (Pistrika & Tsakiris, 2007).

Η ΟΠ απαιτεί από τα κράτη μέλη να πραγματοποιήσουν τα ακόλουθα:

- ▶ **Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας (ΠΑΚΠ).** Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ) στις οποίες βρίσκονται οι Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ). Η πρώτη τους υλοποίηση έγινε το Δεκέμβριο του 2011.
- ▶ **Κατάρτιση Χαρτών Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας** στις ΖΔΥΚΠ. Η πρώτη τους υλοποίηση έγινε το Δεκέμβριο του 2013.
- ▶ **Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ).** Η πρώτη τους υλοποίηση έγινε το Δεκέμβριο του 2015. Τα ΣΔΚΠ εστιάζουν
 - ⦿ στην πρόληψη των ζημιών που προκαλούνται από πλημμύρες με την αποφυγή κατασκευής κατοικιών και βιομηχανιών σε σημερινές και μελλοντικές πλημμυρικές περιοχές,
 - ⦿ στην προστασία, δηλ. τη λήψη μέτρων δομικών ή μη-δομικών για τη μείωση της πιθανότητας πλημμύρας ή/και των επιπτώσεων των πλημμυρών σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, και
 - ⦿ στην ετοιμότητα, δηλ. την παροχή οδηγιών και κώδικα συμπεριφοράς στο κοινό (επιχειρήσεις/ ινστιτούτα) σχετικά με το τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση πλημμύρας (ΕΥ, 2007).

5.2 Αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας

5.2.1 Βασικές έννοιες

Η ΠΑΚΠ είναι μια διεπιστημονική εργασία (D ez-Herrero & Garrote, 2020) που συνδυάζει διάφορες πηγές και είδη πληροφοριών και μοντέλων, για να εκτιμήσει εκ των προτέρων για μια πιθανή πλημμύρα:

- ▶ πώς θα συμπεριφερθεί, όπως π.χ. ποια θα είναι η έκταση της περιοχής κατάκλισης και τα βάθη και οι ταχύτητες ροής αυτής,
- ▶ πόσο πιθανή είναι, και

- ▶ ποιες μπορεί να είναι οι συνέπειές της (De Moel et al., 2015).

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της ΟΠ, η ΠΑΚΠ ακολουθεί το εννοιολογικό πλαίσιο που συνήθως εφαρμόζεται στη μηχανική και τις φυσικές επιστήμες, ότι ο κίνδυνος (Risk, R) ενσωματώνει τις έννοιες της επικινδυνότητας (Hazard, H) και της τρωτότητας (Vulnerability, V). Με μαθηματικούς όρους, αυτό εκφράζεται ως $R=H \times V$ (Cornwall, 2021).

Επικινδυνότητα. Εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια πλημμύρα συγκεκριμένης έντασης σε περιόδους ετών έως δεκαετιών (Wright, 2015). Η ένταση αναφέρεται συνήθως στο συνδυασμό διαφόρων χαρακτηριστικών της ροής που εκφράζουν την επικινδυνότητα, όπως είναι τα ακόλουθα (Diakakis et al., 2020):

- ▶ η έκταση της περιοχής κατάκλισης,
- ▶ τα βάθη και οι ταχύτητες ροής, π.χ. για την εκτίμηση της διάβρωσης και της ενδεχόμενης κατάρρευσης κτιρίων, και
- ▶ οι ρυθμοί ανόδου της στάθμης του νερού, π.χ. για την εκτίμηση των πιθανών απωλειών και της διάρκειας της πλημμύρας.

Τρωτότητα. Η IPCC ορίζει την τρωτότητα ενός συστήματος στις πλημμύρες ως την τάση ή την προδιάθεση να επηρεαστεί αυτό αρνητικά από ένα συμβάν πλημμύρας. Περιλαμβάνει έννοιες, όπως η ευαισθησία στις ζημιές και η έλλειψη ικανότητας αντιμετώπισης και προσαρμογής στις πλημμύρες (IPCC, 2019).

Σύμφωνα με την UNESCO-IHE (2022), η τρωτότητα ορίζεται ως ο βαθμός της βλάβης που αναμένεται σε ένα σύστημα εξαιτίας ενός συμβάντος πλημμύρας σε συγκεκριμένες συνθήκες έκθεσης, ευαισθησίας και ανθεκτικότητας. Οι έννοιες αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- ▶ **Έκθεση.** Αναφέρεται στην παρουσία στοιχείων του συστήματος που εκτίθενται σε κίνδυνο πλημμύρας, όπως π.χ. είναι τα άτομα, τα κτίρια, οι υπηρεσίες, οι υποδομές ή οι ιδιοκτησίες, και μπορεί να επηρεαστούν δυσμενώς από ένα συμβάν πλημμύρας (IPCC, 2019).
- ▶ **Ευαισθησία.** Σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του συστήματος που εκτίθενται σε κίνδυνο πλημμύρας, τα οποία επηρεάζουν την πιθανότητα να υποστεί αυτό βλάβη από ένα συμβάν πλημμύρας, όπως είναι (α) η ευαισθητοποίηση και η ετοιμότητα του κοινού σχετικά με τον κίνδυνο πλημμύρας με τον οποίο ζουν (πριν από την πλημμύρα), (β) οι φορείς που συμμετέχουν στο μετριασμό και τη μείωση των επιπτώσεων του κινδύνου πλημμύρας, και (γ) η ύπαρξη πιθανών μέτρων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας, όπως είναι οι οδοί εκκένωσης.
- ▶ **Ανθεκτικότητα.** Είναι η ικανότητα του συστήματος να προγνώσει, να αντιμετωπίσει και να αντισταθεί σε ένα συμβάν πλημμύρας και να ανακάμψει μετά από αυτό και τις επιπτώσεις του, διατηρώντας σημαντικά επίπεδα απόδοσης στα κοινωνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και φυσικά συστατικά του (Connelly et al., 2015· UNESCO-IHE, 2022).

Η τρωτότητα ενός συστήματος σε συμβάντα πλημμυρών φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ΠΑΚΠ (Antony et al., 2020), οι οποίες εξαρτώνται από παράγοντες που μπορεί να ταξινομηθούν στις ακόλουθες επτά ομάδες: υδρολογικοί και υδροδυναμικοί, μετεωρολογικοί, γεωμορφολογικοί, χαρακτηριστικά κάλυψης, ιδιότητες εδάφους, υποδομές και κοινωνικοοικονομικοί (Dung et al., 2022). Στην πράξη, δεν είναι σαφές ποιες είναι οι άμεσες επιπτώσεις τους στον κίνδυνο πλημμύρας και πώς αυτοί οι παράγοντες αλληλοεπηρεάζονται (Munra et al., 2022).

Πίνακας 5.1

Τρωτότητα συστήματος στις πλημμύρες		
Έκθεση	Στοιχεία σε κίνδυνο και χαρακτηριστικά πλημμύρας	Πριν την πλημμύρα
Ευαισθησία	Προετοιμασία, ετοιμότητα και ικανότητα αντιμετώπισης πλημμύρας – Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ)	Πριν και κατά τη διάρκεια της πλημμύρας
Ανθεκτικότητα	Ικανότητα αντιμετώπισης	Κατά τη διάρκεια και μετά την πλημμύρα

5.2.2 Αξιολόγηση επικινδυνότητας πλημμύρας

Οι μέθοδοι αξιολόγησης της επικινδυνότητας πλημμύρας είναι κυρίως ποσοτικές και συχνά βασίζονται σε υπολογισμούς με υδρολογικά, υδροδυναμικά ή ολοκληρωμένα υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα (Mitsoroulos et al., 2022). Επιπλέον, υπάρχουν και ποιοτικές μέθοδοι που βασίζονται κυρίως στην κρίση των ειδικών (Pita et al., 2021). Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας πλημμύρας απαιτεί επαρκή δεδομένα παρατήρησης που μπορούν να βασιστούν σε καταγεγραμμένα συμβάντα πλημμυρών. Τα τελευταία συνδυάζονται με χρονοσειρές υδρολογικών και υδροδυναμικών παραμέτρων, όπως βροχοπτώσης, παροχής υδατορεμάτων, βάθους ροής, στάθμης της επιφάνειας ροής, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων και των αντίστοιχων μεγεθών των πιθανών πλημμυρών, όπως π.χ. μέσω αναλύσεων συχνότητας για τον προσδιορισμό των περιόδων επαναφοράς για συγκεκριμένες στάθμες της επιφάνειας ροής.

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας πλημμύρας στο πλαίσιο της ΟΠ απαιτεί την προετοιμασία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας για τρία σενάρια πλημμυρών υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης, για καθένα από τα οποία παρουσιάζονται στους χάρτες επικινδυνότητας τα ακόλουθα στοιχεία κινδύνου:

- ▶ η έκταση της πλημμύρας,
- ▶ τα βάθη ή/και οι στάθμες της επιφάνειας ροής, και
- ▶ οι ταχύτητες ροής ή οι παροχές.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των περιόδων επαναφοράς και των πιθανοτήτων από τα 25 κράτη μέλη περιλαμβάνουν: κρίση εμπειρογνομώνων, ανάληψη ιστορικών δεδομένων, στατιστική ανάλυση, μοντελοποίηση, υδρολογική μοντελοποίηση βροχοπτώσεων-απορροών και υδρολογικές μελέτες (EC & Nixon, 2016).

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της ΟΠ στην Ελλάδα, τα παραπάνω τρία σενάρια αναφέρονται σε περιόδους επαναφοράς (T) ίσες με 50, 100 και 1000 έτη, ενώ ο κίνδυνος πλημμύρας ενσωματώνει ως στοιχεία κινδύνου το μέγιστο βάθος και τη μέγιστη ταχύτητα ροής (ΥΠΕΝ, 2018).

5.2.3 Αξιολόγηση της πλημμυρικής τρωτότητας

Συνήθως, η εκτίμηση της τρωτότητας από τις πλημμύρες αναφέρεται στην εκτίμηση των **ζημιών** ως αποτέλεσμα της πλημμύρας σε κατασκευές που χρησιμοποιούνται για ανθρώπινη στέγη, που είναι κυρίως τα κτίρια (Custer και Nishijima, 2015). Ο όρος «ζημιά» συχνά αναφέρεται στη βλάβη των (φυσικών)

στοιχείων που κινδυνεύουν (π.χ. των κτιρίων), καθώς και στην ποσότητα των πόρων που απαιτούνται για την αποκατάσταση των στοιχείων αυτών στην αρχική τους λειτουργία.

Η κατανόηση, ο ποσοτικός προσδιορισμός και η ανάλυση της τρωτότητας των φυσικών στοιχείων είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό στρατηγικών και την υιοθέτηση μιας μεθόδου για τη μείωσή της (Parathoma-Köhle, 2016). Οι ζημιές από τις πλημμύρες εκτιμώνται συνήθως σε κλίμακα πόλης και σε επίπεδο αντικειμένου, όπως είναι συνήθως ένα κτίριο. Μπορούν να αναπτυχθούν μοντέλα ζημιών από πλημμύρες για κτίρια χρησιμοποιώντας:

- ▶ Πραγματικά δεδομένα απωλειών εξαιτίας μιας πλημμύρας που μπορούν να συλλεχθούν αμέσως μετά από αυτή, ή
- ▶ συνθετικά δεδομένα που προκύπτουν μετά από αναλύσεις με βάση τις γνώμες ειδικών, ερευνών ή συνεντεύξεων (Merz et al., 2010).

Τα παραπάνω «δεδομένα ζημιάς» μπορούν να συνδυαστούν με παραμέτρους που επηρεάζουν τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά, δηλ. την επικινδυνότητα της πλημμύρας, και τα χαρακτηριστικά αντοχής, δηλ. την τρωτότητα.

Οι δημοφιλείς μέθοδοι για την αξιολόγηση της τρωτότητας πλημμύρας είναι (α) η καμπύλη τρωτότητας, (β) οι πίνακες τρωτότητας και (γ) η χρήση δεικτών (Nasiri et al., 2019). Η μέθοδος των δεικτών έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες, όπως τα οικοδομικά υλικά, τον τύπο κατασκευής, τον αριθμό των ορόφων, το επίπεδο συντήρησης, τα υλικά του ισογείου κ.ά.

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της ΟΠ στην Ελλάδα ορίστηκαν οι ακόλουθες πέντε κατηγορίες τρωτότητας: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μεσαία, σημαντική και πολύ σημαντική. Αυτή η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε λεπτομερή ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων της πλημμύρας, δηλ. του βαθμού βλάβης, σε τέσσερις κατηγορίες δεικτών – στοιχείων που βρίσκονται σε κίνδυνο, οι οποίες είναι ο πληθυσμός, η εθνική οικονομία, τα περιβαλλοντικά και τα πολιτιστικά στοιχεία (ΥΠΕΝ, 2018).

5.2.4 Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας και μέτρα μείωσης του κινδύνου πλημμύρας

Τα ΣΔΚΠ καταρτίζονται με επίκεντρο τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας μέσω μέτρων πρόληψης, προστασίας και ετοιμότητας (βλ. υποκεφάλαιο 5.1). Τα μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας μπορεί να είναι δομικά (καλούνται και κατασκευαστικά) και μη-δομικά.

Δομικά μέτρα. Είναι φυσικές κατασκευές για τη μείωση ή την αποφυγή πιθανών επιπτώσεων κινδύνων, ή μηχανικές τεχνικές/τεχνολογίες για την επίτευξη αντοχής σε κινδύνους και ελαστικότητας σε κατασκευές ή συστήματα (UNDRR, 2022).

Τα δομικά μέτρα μπορεί να είναι:

- ▶ Βαριές κατασκευές συνήθως από σκυρόδεμα (γκρι έργα), όπως φράγματα και αναχώματα (Guo et al., 2020 · Dong et al., 2017), αγωγοί παράκαμψης και εκτροπής και διευθετημένοι αγωγοί.
- ▶ Πράσινα έργα, δηλ. τεχνολογίες που βασίζονται στη φύση (Nature-Based Solutions, NBS), όπως η αποκατάσταση υδατορεμάτων και πλημμυρικών πεδίων, η απομάκρυνση αναχωμάτων, η φύτευση δέντρων, η δημιουργία πλημμυρικών πεδίων ή αποθηκευτικών χώρων στην πλημμυρική πεδιάδα και ξύλινα φράγματα ή μηχανικά οδοστρώματα σε ποτάμια ή/και πλημμυρικά πεδία (Panagiotatou & Stamou, 2022).

Μη δομικά μέτρα. Είναι μέτρα που δεν περιλαμβάνουν φυσικές κατασκευές, αλλά χρησιμοποιούν γνώ-

σεις, πρακτικές ή συμφωνίες για τη μείωση των κινδύνων και των επιπτώσεων των καταστροφών, ιδίως μέσω πολιτικών και νόμων, και ενεργειών ευαισθητοποίησης του κοινού, κατάρτισης και εκπαίδευσης (UNDRR, 2022). Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν τη χαρτογράφηση των ζωνών κινδύνου, τη βελτίωση της πρόγνωσης καιρού, τη βελτίωση των ΣΕΠΠ, την εκπαίδευση, τις ασκήσεις ετοιμότητας, τα σήματα αναγνώρισης κινδύνου, τους ελέγχους χρήσεων γης, τους οικοδομικούς κώδικες και άλλα (Sayers et al., 2013).

5.3 Αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας στην Ελλάδα

5.3.1 Μεθοδολογία υπολογισμών

Στα ΣΔΚΠ, η ΠΑΚΠ πραγματοποιείται με τα ακόλουθα τρία βήματα:

- ▶ **Βήμα 1.** Εκτίμηση της επικινδυνότητας της πλημμύρας.
- ▶ **Βήμα 2.** Εκτίμηση της τρωτότητας σε πλημμύρα.
- ▶ **Βήμα 3.** Εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε κελιά μεγέθους 500 m x 500 m που ορίζονται μέσα στη μέγιστη έκταση της περιοχής κατάκλισης που υπολογίζεται για την πλημμύρα που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς T=50, 100 και 1000 έτη. Σε κάθε κελί οι συνθήκες πλημμύρας θεωρούνται σταθερές.

5.3.2 Εκτίμηση της επικινδυνότητας πλημμύρας

Η επικινδυνότητα της πλημμύρας προσδιορίζεται σε κάθε κελί ως εξής:

- ▶ Χρησιμοποιούνται ως μέτρο της έντασης της πλημμύρας το μέγιστο βάθος ροής (D) και η μέγιστη ταχύτητα ροής (U) και προσδιορίζεται η κλίση επικινδυνότητας πλημμύρας από τις ακόλουθες κλίσεις: πολύ χαμηλή (Very Low, VL), χαμηλή (Low, L), μέτρια (Medium, M), υψηλή (High, H) και πολύ υψηλή (Very High, VH) με βάση τον Πίνακα 5.2.
- ▶ Αντιστοιχείται σε κάθε κλίση ένα σκορ (βαθμολογία), σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3, το οποίο είναι πρακτικά η πιθανότητα της πλημμύρας.

Πίνακας 5.2

Κλίσεις της επικινδυνότητας πλημμύρας				
Βάθος ροής, D (m)	Ταχύτητα ροής, U (m/s)			
	<0.5	0.5-2.0	2.0-4.0	>4.0
<0.2	VL	VL	VL	L
0.2-0.5	L	L	M	M
0.5-1.0	L	M	H	H
1.0-1.5	M	M	H	VH
1.5-2.0	H	H	VH	VH
>2.0	VH	VH	VH	VH

Πίνακας 5.3

Αντιστοιχία κλάσης επικινδυνότητας – βαθμολογίας (σκορ)		
Κλάση επικινδυνότητας	Περιγραφή	Σκορ
VL	Very Low (πολύ χαμηλή)	0.2
L	Low (χαμηλή)	0.4
M	Medium (μέτρια)	0.6
H	High (υψηλή)	0.8
VH	Very High (πολύ υψηλή)	1.0

5.3.3 Εκτίμηση της πλημμυρικής τρωτότητας

Θεωρούνται οι τέσσερις κατηγορίες επιπτώσεων που φαίνονται στον Πίνακα 5.4 και οι αντίστοιχοι δείκτες χρήσεων και η βαθμολογία τους που φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Ο Πίνακας 5.5 αποτελεί συνοπτική μορφή του πίνακα των ΣΔΚΠ (ΥΠΕΝ, 2018).

Πίνακας 5.4

Αντιστοιχία κατηγορίας και βαθμολογίας επιπτώσεων	
Κατηγορία επιπτώσεων	Βαθμός κατηγορίας επιπτώσεων
Στον πληθυσμό	ΕκΑ ^ο
Στην οικονομία	ΕκΟ ^ο
Στο περιβάλλον	ΕκΠε ^ο
Στην πολιτιστική κληρονομιά	ΕκΠο ^ο
Μέγιστη δυναμική επίπτωση	$Εκ^ο = ΕκΑ^ο + ΕκΟ^ο + ΕκΠε^ο + ΕκΠο^ο$

Για την αποτίμηση της μέγιστης πιθανής επίπτωσης της πλημμύρας, η οποία αφορά τη σημασία, την τρωτότητα και την έκθεση των χρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη βάση του WISE-WFD (2022) για την αναφορά των ιστορικών πλημμυρών στο πλαίσιο της ΠΑΠΚ που γίνεται ανά εξαετία από τα Κράτη Μέλη και τις κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος, ορίζονται οι ακόλουθες πέντε κλάσεις τρωτότητας: πολύ χαμηλή (Very Low, VL), χαμηλή (Low, L), μέτρια (Medium, M), υψηλή (High, H) και πολύ υψηλή (Very High, VH) με βάση τον Πίνακα 5.6.

Σε κάθε κελί εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία:

- ▶ **Βήμα 1.** Για κάθε κατηγορία επιπτώσεων υπολογίστηκαν οι βαθμοί των δεικτών χρήσεων (BA), οι οποίοι περιλαμβάνονται στα αρχεία raster, και προστέθηκαν με βάση τους Πίνακες 5.4 και 5.5.
- ▶ **Βήμα 2.** Για το σύνολο των κατηγοριών επιπτώσεων υπολογίζεται ο ολικός βαθμός ως το άθροισμα των επιμέρους αθροισμάτων των τεσσάρων κατηγοριών επιπτώσεων, ο οποίος αποτελεί τη μέγιστη δυναμική επίπτωση.
- ▶ **Βήμα 3.** Με βάση την υπολογισθείσα μέγιστη δυναμική επίπτωση προσδιορίζεται η κλάση τρωτότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.5

Κατηγορίες επιπτώσεων, δείκτες χρήσεων και βαθμολογία τους (ΥΠΕΝ, 2018)		
Κατηγορίες Επιπτώσεων	Δείκτες Χρήσεων	Βαθμός
Στον πληθυσμό ΕκΑ^ο	Αστικές συγκεντρώσεις (πυκνότητα ≥ 80 άτομα/ha)	500
	Αστικές συγκεντρώσεις (πυκνότητα < 80 άτομα/ha)	250
	Άλλες κοινωνικές υποδομές, π.χ. νηπιαγωγεία, σχολεία, πανεπιστήμια, μονάδες φροντίδας ηλικιωμένων	250
	Υποδομές κοινής ωφέλειας, σταθμοί – υποσταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας	150
	Υποδομές κοινής ωφέλειας, σταθμοί – υποσταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας	100
	Υποδομές μηχανισμού πολιτικής προστασίας	250
Οικονομικές ΕκΟ^ο	Αστικές συγκεντρώσεις (πυκνότητα ≥ 80 άτομα/ha)	250
	Αστικές συγκεντρώσεις (πυκνότητα < 80 άτομα/ha) και «εξωαστικές συγκεντρώσεις»	100
	Αγροτικές περιοχές με θερμοκήπια	150
	Αγροτικές περιοχές με καλλιέργειες	100
	Αγροτικές περιοχές με ρυζοκαλλιέργειες	0
	Κτηνοτροφικές μονάδες (σταυλικές εγκαταστάσεις, στοιχεία του ΟΠΕΚΕΠΕ)	50
	Αναπτυγμένες τουριστικές περιοχές, σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο για τον Τουρισμό (Άρθρο 4 του ΦΕΚ 1138 Β/2009)	250
	Αναπτυσσόμενες τουριστικές περιοχές, σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο για τον Τουρισμό (Άρθρο 4 του ΦΕΚ 1138 Β/2009)	50
	«Βιομηχανικές συγκεντρώσεις» (θεσμοθετημένες ΒΙΠΕ και άλλες «άτυπες βιομηχανικές συγκεντρώσεις»)	250
	Βιομηχανίες SEVESO, IPPC εκτός βιομηχανικών συγκεντρώσεων	150
	Λοιπές μεμονωμένες βιομηχανικές μονάδες εκτός βιομηχανικών συγκεντρώσεων	50
	Διακοπή διευρωπαϊκού και πρωτεύοντος εθνικού οδικού δικτύου (σε αυτοκινητόδρομους), ενεργούς σιδηροδρομικούς άξονες και αεροδρόμια	150
	Διακοπή δευτερεύοντος εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου	100
Περιβαλλοντικές ΕκΠε^ο	Βιομηχανικές εγκαταστάσεις IPPC ή Seveso, στον βαθμό που κρίνεται ότι είναι ευάλωτες σε πλημμύρες	500
	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με δυναμικότητα > 100.000 ισοδύναμο πληθυσμό (ι.π.)	150
	Μέσες ΕΕΛ με δυναμικότητα 10.000 – 100.000 ι.π.	100
	Μέσες ΕΕΛ με δυναμικότητα < 10.000 ι.π.	50

	Χώροι διαχείρισης και διάθεσης στερεών αστικών αποβλήτων	100
	Προστατευόμενες περιοχές ειδών και οικοτόπων (Παράρτημα IV, σημείο vi της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ), στο βαθμό που κρίνεται ότι είναι ευάλωτοι σε πλημμύρες	50
Στην πολιτιστική κληρονομιά ΕκΠο^ο	Μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς διεθνούς σημασίας	150
	Μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς εθνικής και περιφερειακής σημασίας	50

Πίνακας 5.6

Αντιστοιχία μέγιστης δυναμικής επίπτωσης - κλάσης τρωτότητας	
Μέγιστη δυναμική επίπτωση (ΕκΑ ^ο)	Κλάση τρωτότητας
<50	Very Low (πολύ χαμηλή)
50-125	Low (χαμηλή)
125-200	Medium (μέτρια)
200-400	High (υψηλή)
>400	Very High (πολύ υψηλή)

5.3.4 Εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας

Υπολογίζεται ο κίνδυνος πλημμύρας σε κάθε κελί με βάση την εξίσωση:

$$\text{Risk} = \text{Vulnerability} \times \text{Hazard} \quad \text{ή} \quad \text{ΕπΑ}^{\circ} = \text{Εκ}^{\circ} \times \text{ΒΑ}^{\circ}$$

δηλ. πολλαπλασιάζοντας την τιμή της υπολογισθείσας μέγιστης δυναμικής επίπτωσης από πλημμύρα (ΕκΑ^ο) με το βαθμό επιρροής επικινδυνότητας πλημμύρας. Ο χαρακτηρισμός του κινδύνου φαίνεται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7

Αντιστοιχία μέγιστης δυναμικής επίπτωσης – χαρακτηρισμού κινδύνου	
Μέγιστη δυναμική επίπτωση (ΕκΑ ^ο)	Χαρακτηρισμός κινδύνου
<50	Very Low (πολύ χαμηλή)
50-125	Low (χαμηλή)
125-200	Medium (μέτρια)
200-400	High (υψηλή)
>400	Very High (πολύ υψηλή)





5.4 Εκτίμηση της πλημμυρικής τρωτότητας με βάση το στοιχείο «κτίρια»

Η πλημμυρική τρωτότητα μπορεί να εκτιμηθεί σε κλίμακα πόλης χρησιμοποιώντας το στοιχείο κινδύνου «κτίριο» εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία των Diakakis et al. (2017) για ξαφνικές πλημμύρες. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει:

- ▶ την καλύτερη διαφοροποίηση των γενικών κατηγοριών κτιρίων, όπως π.χ. των τύπων κατοικιών, καθώς και ύπαρξη μικρότερη ετερογένεια σε αυτές τις κατηγορίες, και
- ▶ την πραγματοποίηση επιτόπιων επισκέψεων και ατομικών επιθεωρήσεων για τον καθορισμό ή τη βελτίωση των καμπυλών ζημιών.

Στη μεθοδολογία αυτή θεωρούνται ως δεδομένα τρωτότητας τα κύρια χαρακτηριστικά των κτιρίων, τα οποία συσχετίζονται με την ευπάθειά τους στις πλημμύρες. Τα χαρακτηριστικά αυτά προσδιορίζονται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Blanco-Vogt & Schanze, 2014· Kelman, 2002· Golz et al., 2015· Stephenson & D'Ayala 2014· Fedeski & Gwilliam, 2007· Diakakis et al., 2017) και καταγράφονται με επιτόπιες επισκέψεις στην περιοχή εφαρμογής και τη χρήση οπτικού υλικού από την πλατφόρμα Google Street View (Google, 2022). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι εννέα και φαίνονται στον Πίνακα 5.8 με ενδεικτικές φωτογραφίες και τις συντομογραφίες τους.

Πίνακας 5.8

Χαρακτηριστικά των κτιρίων, ενδεικτικές φωτογραφίες και συντομογραφίες τους		
Χαρακτηριστικά κτιρίου		Συντομογραφία
Παράθυρο υπόγειου τύπου		LW
Ράμπα υπόγειου γκαράζ		UGR
Πιλοτή κάτω από το ύψος του εδάφους		PLT1
Πιλοτή στο ύψος του εδάφους		PLT2
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου κάτω από το ύψος του εδάφους		BLO1
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου στο ύψος του εδάφους		BLO2
Μια ανοικτή πλευρά		ADJ1
Δύο ανοικτές πλευρές		ADJ2
Τρεις ανοικτές πλευρές		ADJ3

Στη συνέχεια περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία εφαρμόζεται στην πόλη της Μάνδρας (βλ. υποκεφάλαια 8.1.9 και 8.4.6).

- ▶ **Βήμα 1.** Καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων υπολογισμού της τρωτότητας που είναι οι κατόψεις των κτιρίων και τα χαρακτηριστικά τους που φαίνονται στον Πίνακα 5.8. Προετοιμασία των χαρτών δεδομένων υπολογισμού τρωτότητας μετά από ψηφιοποίησή τους και αποθήκευση των χαρακτηριστικών των κτιρίων σε βάση δεδομένων.

Η καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιείται με επισκέψεις στην περιοχή μελέτης. Η επεξεργασία περιλαμβάνει την προετοιμασία πέντε χαρτών με κατάλληλη χρωματική σήμανση με τα ακόλουθα αντικείμενα: (1) Όρια κτιρίων, (2) Θέση χαμηλότερου ανοίγματος σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους, (3) Ύπαρξη ράμπας υπογείου γκαράζ, (4) Ύπαρξη παράθυρου σε υπόγειο χώρο, και (5) ύπαρξη και θέση πιλοτής σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους.

- ▶ **Βήμα 2.** Προσδιορισμός των στατιστικά σημαντικών χαρακτηριστικών των κτιρίων. Πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος πολλαπλής παλινδρόμησης για να προσδιοριστούν ποια από τα χαρακτηριστικά των κτιρίων του Πίνακα 5.9 παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική συσχέτιση με το αν θα πλημμυρίσει εσωτερικά το κτίριο. Θεωρείται ως στατιστικά σημαντική η συσχέτιση ενός χαρακτηριστικού (P1 μέχρι P9) που παρουσιάζει σημαντικότητα μικρότερη ή ίση του 0.05. Στον Πίνακα 5.9 φαίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών των κτιρίων (A1 μέχρι A9) και των αντίστοιχων συντελεστών συσχέτισής τους (B1 μέχρι B9) που υπολογίζονται κατά την παλινδρόμηση. Τα A1 μέχρι A9 λαμβάνουν την τιμή «1» όταν το χαρακτηριστικό υπάρχει στο κτίριο και «0» όταν δεν υπάρχει.

Πίνακας 5.9

Χαρακτηριστικά των κτιρίων και αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης			
Χαρακτηριστικό κτιρίου (Συντομογραφία)	Σύμβολο	P	B
Παράθυρο υπόγειου τύπου (LW)	A1	P1	B1
Ράμπα υπόγειου γκαράζ (UGR)	A2	P2	B2
Πυλωτή κάτω από το ύψος του εδάφους (PLT1)	A3	P3	B3
Πυλωτή στο ύψος του εδάφους (PLT2)	A4	P4	B4
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου κάτω από το ύψος του εδάφους (BLO1)	A5	P5	B5
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου στο ύψος του εδάφους (BLO2)	A6	P6	B6
Μια ανοικτή πλευρά (ADJ1)	A7	P7	B7
Δυο ανοικτές πλευρές (ADJ2)	A8	P8	B8
Τρεις ανοικτές πλευρές (ADJ3)	A9	P9	B9

- ▶ **Βήμα 3.** Προσδιορισμός της εξίσωσης του εμπειρικού δείκτη τρωτότητας. Ο εμπειρικός δείκτης τρωτότητας (Y) αναπτύχθηκε και ελέγχθηκε με στατιστικές μεθόδους (πολλαπλή παλινδρόμηση) εξετάζοντας τη συμπεριφορά 2274 κτιρίων σε όλη την Αττική κατά τη διάρκεια συμβάντων πλημμύρας (Diakakis et al., 2017).

Στην εξίσωση του δείκτη (5.1) χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συσχέτισης ως πολλαπλασιαστές των χαρακτηριστικών των κτιρίων (βλ. Πίνακα 5.10).

$$Y=A_0+\sum_1^9 A_i B_i \tag{5.1}$$

- **Βήμα 4.** Υπολογισμός της πιθανότητας να πλημμυρίσει ένα κτίριο. Η πιθανότητα να πλημμυρίσει ένα κτίριο (p) υπολογίζεται από την εξίσωση (5.2).

$$Y = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad \text{ή} \quad p = \frac{\exp^{(Y)}}{\exp^{(Y)} + 1} \quad (5.2)$$

Η πιθανότητα να πλημμυρίσει ένα κτίριο λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1.

- **Βήμα 5.** Προσδιορισμός της κλάσης τρωτότητας κάθε κτιρίου και σύνταξη των χαρτών τρωτότητας της περιοχής εφαρμογής. Με βάση τον Πίνακα 5.10 και με στοιχείο εισόδου τον δείκτη τρωτότητας προσδιορίζεται η κλάση τρωτότητας για κάθε κτίριο και στη συνέχεια συντάσσονται οι χάρτες τρωτότητας στο σύνολο της περιοχής εφαρμογής.

Πίνακας 5.10

Αντιστοιχία δείκτη τρωτότητας – κλάσης τρωτότητας	
Δείκτης τρωτότητας	Κλάση τρωτότητας
0.0 - 0.2	Very Low (πολύ χαμηλή)
0.2 - 0.4	Low (χαμηλή)
0.4 - 0.6	Medium (μέτρια)
0.6 - 0.8	High (υψηλή)
0.8 - 1.0	Very High (πολύ υψηλή)

5.5 Βιβλιογραφία

1. Antony, R., Rahiman, K. U. A., & Vishnudas, S. (2020). Flood hazard assessment and flood inundation mapping - A review. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-8151-9_20
2. Blanco-Vogt, A., & Schanze, J. (2014). Assessment of the physical flood susceptibility of buildings on a large scale – conceptual and methodological frameworks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2105–2117. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2105-2014>
3. Connelly, A., Carter, J. G., & Handley, J. (2015). State of the art report (4). Vulnerability assesment. Definition, indicators and existing assessment Methods. <https://resin-cities.eu/resources/sota/vulnerability/>
4. Cornwall, W. (2021). Europe's deadly floods leave scientists stunned. *Science*, 373(6553), 372–373. <https://doi.org/10.1126/science.373.6553.372>
5. Custer, R., & Nishijima, K. (2015). Flood vulnerability assessment of residential buildings by explicit damage process modelling. *Natural Hazards*, 78(1), 461–496. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1725-7>
6. De Moel, H., Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E., & Ward, P. J. (2015). Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6), 865–890. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9654-z>
7. Diakakis, M., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A., & Skordoulis, M. (2017). Identifying elements that affect the probability of buildings to suffer flooding in urban areas using google street

- view. A case study from Athens metropolitan area in Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.02.002>
8. Diakakis, M., Andreadakis, E., Nikolopoulos, E. I., Spyrou, N. I., Gogou, M. E., Deligiannakis, G., Katsetsiadou, N. K., Antoniadis, Z., Melaki, M., Georgakopoulos, A., Tsaprouni, K., Kalogiros, J., & Lekkas, E. (2019). An integrated approach of ground and aerial observations in flash flood disaster investigations. the case of the 2017 Mandra Flash Flood in Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 290–309. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.015>
 9. Diakakis, M., Deligiannakis, G., Antoniadis, Z., Melaki, M., Katsetsiadou, N. K., Andreadakis, E., Spyrou, N. I., & Gogou, M. (2020). Proposal of a flash flood impact severity scale for the classification and mapping of Flash Flood Impacts. *Journal of Hydrology*, 590, 125452. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125452>
 10. D ez-Herrero, A., & Garrote, J. (2020). Flood risk analysis and assessment, applications and uncertainties: A bibliometric review. *Water*, 12(7), 2050. <https://doi.org/10.3390/w12072050>
 11. Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green Versus Grey Infrastructure. *Water Research*, 124, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>
 12. Dung, N. B., Long, N. Q., Goyal, R., An, D. T., & Minh, D. T. (2022). The role of factors affecting flood hazard zoning using analytical hierarchy process: A Review. *Earth Systems and Environment*, 6(3), 697–713. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00235-4>
 13. EU (2007). European Union, Directive 2007/60/EC of the European Council and European Parliament of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Off. J. Eur. Union* 2007, 27–34.
 14. Fedeski, M., & Gwilliam, J. (2007). Urban Sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and Urban Planning*, 83(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.012>
 15. Golz, S., Schinke, R., & Naumann, T. (2015). Assessing the effects of Flood Resilience Technologies on building scale. *Urban Water Journal*, 12(1), 30–43. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2014.939090>
 16. Google (2022). <https://www.google.com/streetview/>
 17. Guo, Z., Chen, L., Yin, K., Shrestha, D. P., & Zhang, L. (2020). Quantitative risk assessment of slow-moving landslides from the viewpoint of decision-making: A case study of the Three Gorges Reservoir in China. *Engineering Geology*, 273, 105667. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105667>
 18. IPCC (2019). Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Special Report: The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
 19. Kelman, I. (2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England. [Doctoral dissertation, University of Cambridge].
 20. Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Review article “Assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697–1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
 21. Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., & Schmidtke, R. (2004). Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 153–163. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-153-2004>
 22. Mitsopoulos, G., Panagiotatou, E., Sant, V., Baltas, E., Diakakis, M., Lekkas, E., & Stamou, A. (2022). Optimizing the performance of coupled 1D/2D hydrodynamic models for early warning of flash floods. *Water*, 14(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/w14152356>
 23. Munpa, P., Kittipongvises, S., Phetrak, A., Sirichokchatchawan, W., Taneepanichskul, N.,

- Lohwacharin, J., & Polprasert, C. (2022). Climatic and hydrological factors affecting the assessment of flood hazards and resilience using modified undrr indicators: Ayutthaya, Thailand. *Water*, 14(10), 1603. <https://doi.org/10.3390/w14101603>
24. Nasiri, H., Yusof, M. J., Ali, T. A., & Hussein, M. K. (2019). District flood vulnerability index: Urban decision-making tool. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(5), 2249–2258. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1797-5>
 25. EC & Nixon, S. (2016). European Commission, Directorate-General for Environment, EU overview of methodologies used in preparation of flood hazard and flood risk maps : final report, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/204606>
 26. Panagiotatou, E., & Stamou, A. (2022). Mathematical Modelling of Nature-Based Solutions for flood risk reduction under Climate Change conditions. Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress IAHR, Athens, Greece.
 27. Papathoma-Köhle, M. (2016). Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: Application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1771–1790. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1771-2016>
 28. Pistrika, A. K., & Tsakiris, G. (2007). Flood risk assessment: A methodological framework. *European Water Resources Association*, 14-16.
 29. Pita, G. L., Albornoz, B. S., & Zaracho, J. I. (2021). Flood depth-damage and fragility functions derived with structured expert judgment. *Journal of Hydrology*, 603, 126982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126982>
 30. Sayers, P., Li, Y., Galloway, G., Penning-Rowsell, E., Shen, F., Wen, K., Chen, Y., & Le Quesne, T. (2013). Flood risk management: a strategic approach. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000220870>
 31. Stephenson, V., & D'Ayala, D. (2014). A new approach to flood vulnerability assessment for historic buildings in England. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1035–1048. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1035-2014>
 32. UNESCO-IHE (2022). Institute for Water Education. Flood Vulnerability Indices (FVI). <http://www.unesco-ihe-fvi.org/>
 33. UNDRR (2022). United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Structural and non-structural measures. <https://www.undrr.org/terminology/structural-and-non-structural-measures>
 34. WISE-WFD (2022). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise-wfd-4/wise-wfd-database-1>
 35. Wright, D. B. (2015). *Methods in Flood Hazard and Risk Assessment*. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22982>
 36. ΥΠΕΝ (2018). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας. https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=504

Κέντρα Πρόγνωσης Πλημμυρών

Δ. Καλογεράς, Γ. Τζάνες, Α. Ι. Στάμου

6.1 Εισαγωγή

Ένα Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ) έχει τη νομική εξουσιοδότηση να εκδίδει έγκυρες προγνώσεις και προειδοποιήσεις σε τοπικό, περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο. Το ΚΠΠ πρέπει να είναι αναγνωρίσιμο από τις υπηρεσίες και το κοινό ως έγκυρη πηγή προγνώσεων και προειδοποιήσεων πλημμυρών. Οι προγνώσεις πλημμυρών που εκδίδει το ΚΠΠ πρέπει να πληρούν τα υψηλότερα εφικτά τεχνικά πρότυπα και να δημοσιοποιούνται χωρίς περαιτέρω έλεγχο από άλλους φορείς. Συνήθως, ένα ΚΠΠ μπορεί να είναι αυτόνομο, να υποστηρίζεται από άλλους φορείς, ή να αποτελεί τμήμα μιας κρατικής υπηρεσίας, όπως είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ).

Οι κύριες συνιστώσες ενός ΚΠΠ είναι οι ακόλουθες:

- ▶ Οι κτιριακές εγκαταστάσεις του ΚΠΠ.
- ▶ Ο εξοπλισμός του ΚΠΠ.
- ▶ Το προσωπικό του ΚΠΠ.

6.2 Κτιριακές εγκαταστάσεις Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Οι εγκαταστάσεις ενός ΚΠΠ συνήθως βρίσκονται σε κτίρια που ανήκουν στο μητρικό κυβερνητικό τμήμα τους (WMO, 2011). Οι κύριοι χώροι του κτιρίου ενός ΚΠΠ είναι συνήθως οι ακόλουθοι:

- ▶ **Αίθουσα επιχειρήσεων.** Αποτελεί ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο για όλες τις εγκαταστάσεις και το προσωπικό. Περιλαμβάνει γραφεία, τερματικά υπολογιστών και σταθμούς εργασίας, εγκαταστάσεις απεικόνισης δεδομένων και εξοπλισμό εκτύπωσης και αντιγραφής. Στην περίπτωση που ένα ΚΠΠ βασίζεται σε ραδιοφωνική (ασύρματη) επικοινωνία με τερματικούς σταθμούς, ο χώρος των χειριστών διαχωρίζεται από των υπόλοιπων εργαζομένων για την απομόνωση του παραγόμενου θορύβου.
- ▶ **Αίθουσα διακομιστών και τηλεμετρικού εξοπλισμού.** Είναι ειδικά διαμορφωμένος χώρος με ελεγχόμενη πρόσβαση, όπου φιλοξενούνται οι διακομιστές και ο τηλεμετρικός εξοπλισμός. Η θερμοκρασία και η υγρασία στην αίθουσα αυτή ελέγχονται και διατηρούνται εντός συγκεκριμένων ορίων, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του εξοπλισμού.
- ▶ **Γραφείο διευθυντή επιχειρήσεων.** Είναι ξεχωριστός χώρος με πρόσβαση σε τηλεφωνική γραμμή και στο διαδίκτυο.
- ▶ **Γραφεία προσωπικού.** Είναι μια ή περισσότερες αίθουσες για τη στέγαση του προσωπικού.
- ▶ **Αίθουσα ενημέρωσης.** Ορισμένα ΚΠΠ διαθέτουν αίθουσα ενημέρωσης με εγκαταστάσεις μετάδοσης ραδιοφώνου και τηλεόρασης για επικοινωνία με τα ΜΜΕ.

Οι εγκαταστάσεις ενός ΚΠΠ πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο ανθεκτικότητας. Για το λόγο αυτό, τα ΚΠΠ πρέπει να εγκαθίστανται σε περιοχές που είναι προστατευμένες από φυσικούς

κινδύνους, διασφαλίζοντας έτσι την απρόσκοπτη λειτουργία τους. Η προσβασιμότητα στους χώρους ενός ΚΠΠ από το προσωπικό υπηρεσίας του πρέπει να είναι επίσης διασφαλισμένη. Το προσωπικό υπηρεσίας πρέπει να διαθέτει κλειδιά, πάσο και άδεια ασφαλείας για την εξουσιοδότηση της εισόδου του σε ένα ΚΠΠ και στους επιμέρους χώρους του.

Για τη διασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας ενός ΚΠΠ απαιτούνται:

- ▶ **Εφεδρικές εγκαταστάσεις.** Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στο Ηνωμένο Βασίλειο έχουν δημιουργηθεί διπλοί κόμβοι διαχείρισης δεδομένων (data-management hubs) για όλες τις τροφοδοσίες υδρομετεωρολογικών δεδομένων σε δύο ΚΠΠ, τα οποία απέχουν απόσταση μεταξύ τους μεγαλύτερη από 200 km, κυρίως για να αποφευχθεί ο αντίκτυπος μιας διακοπής ρεύματος στο εθνικό δίκτυο. Ειδικότερα, σε χώρες που αντιμετωπίζουν ζητήματα τοπικής ασφάλειας, επιβάλλεται η δημιουργία εφεδρικών εγκαταστάσεων σε περιοχές υψηλής ασφάλειας, όπως είναι π.χ. οι στρατιωτικές βάσεις, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία ενός ΚΠΠ ακόμα και στην περίπτωση πολιτικών αναταραχών (WMO, 2011).
- ▶ **Αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.** Στις εγκαταστάσεις ενός ΚΠΠ πρέπει να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια αδιάλειπτα, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του. Συνεπώς, απαιτείται η εγκατάσταση συσκευών Αδιάλειπτης Παροχής Ισχύος (UPS) σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη με τον αντίστοιχο βοηθητικό εξοπλισμό, όπως είναι οι αυτόματοι μεταγωγικοί διακόπτες. Ο σκοπός των παραπάνω είναι (α) η παροχή υψηλής ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρονικά συστήματα, και (β) η παροχή ενέργειας για το χρονικό διάστημα που είναι αδύνατη η τροφοδοσία ενός ΚΠΠ από το τοπικό δίκτυο.

6.3 Εξοπλισμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

6.3.1 Εξοπλισμός

Στον εξοπλισμό ενός ΚΠΠ περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

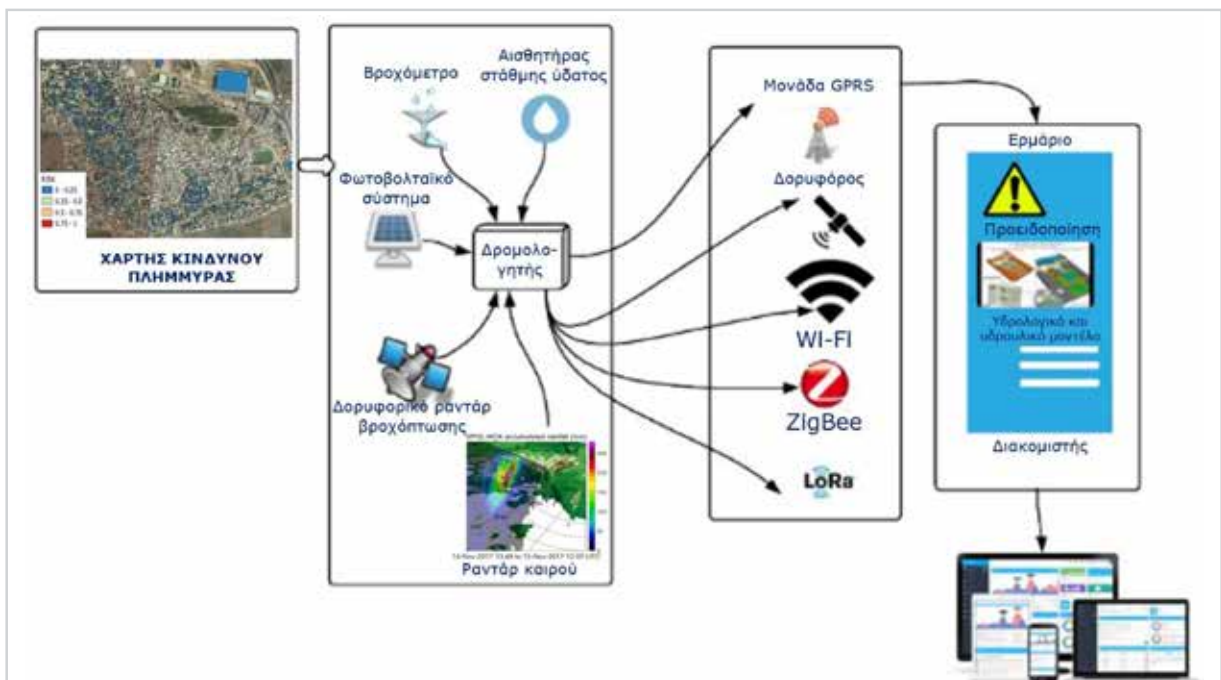
- ▶ **Μετρητικός εξοπλισμός του Δικτύου Παρακολούθησης (ΔΠ).** Ένα ΚΠΠ έχει στην εποπτεία του ένα σύνολο μετρητών, όπως περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.2. Αυτοί είναι κυρίως (α) βροχόμετρα και βροχογράφοι για τη μέτρηση του ύψους της βροχόπτωσης στη λεκάνης απορροής, (β) μετρητές της στάθμης της επιφάνειας ροής, και (γ) μετρητές των ταχυτήτων ροής στα υδατορέματα, με τους οποίους προσδιορίζεται και η παροχή. Οι μετρητές αυτοί αποτελούν για ένα ΚΠΠ κρίσιμη υποδομή, η οποία χρειάζεται να είναι ανθεκτική σε βλάβες και να παρέχει αδιάλειπτα τα παραγόμενα δεδομένα στο Μοντέλο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ) του Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης Πλημμυρών (ΣΕΠΠ).
- ▶ **Επικοινωνιακές υποδομές του ΔΠ.** Οι καταγραφές του μετρητικού εξοπλισμού μεταδίδονται στο ΚΠΠ μέσω των υποδομών τηλεπικοινωνίας, οι οποίες (α) είναι ιδιόκτητες και εποπτεύονται εξολοκλήρου από το ΚΠΠ, άμεσα ή μέσω συμβολαίων συντήρησης με υπεργολάβους, ή (β) ανήκουν σε πάροχο υπηρεσιών τηλεπικοινωνίας.
- ▶ **Υποδομές ενεργειακής τροφοδοσίας του ΔΠ.** Για την ενεργειακή τροφοδοσία του μετρητικού εξοπλισμού και των επικοινωνιακών υποδομών του ΔΠ απαιτούνται επιπλέον υποδομές. Στην περίπτωση που ο μετρητικός εξοπλισμός και οι επικοινωνιακές υποδομές τοποθετούνται σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο σε μικρή απόσταση, για την ενεργειακή τροφοδοσία τους εγκαθίστανται πυλώνες που φέρουν φωτοβολταϊκό σύστημα και συσσωρευτές ενέργειας (μπαταρίες).

- **Διακομιστές και σταθμοί εργασίας με το απαραίτητο υλισμικό.** Αυτά είναι απαραίτητα για (α) τη συλλογή, την επεξεργασία, την ανάλυση και την παρουσίαση των δεδομένων, (β) την πραγματοποίηση υπολογισμών με τα ΜΠΠ, (γ) τη συνεργασία με άλλα ΚΠΠ, (δ) την έγκαιρη λήψη αποφάσεων και (ε) την προετοιμασία και διάδοση των προϊόντων προειδοποίησης.

Ενδεικτικές διατάξεις εξοπλισμού ενός ΣΕΠΠ φαίνονται στις Εικόνες 6.1 και 6.2 (Acosta-Coll at al., 2018). Το όργανο πεδίου είναι ένας μετρητής τύπου ραντάρ που μετράει τη στάθμη ροής ενός υδατορέματος (επιτηρούμενο σύστημα). Η πληροφορία αυτή μεταφέρεται μέσω καλωδίωσης στον καταγραφέα δεδομένων και εκεί αποθηκεύεται. Ο καταγραφέας μεταδίδει σε τακτά χρονικά διαστήματα την αποθηκευμένη πληροφορία μέσω των επικοινωνιακών υποδομών (δρομολογητές και κεραίες) στον διακομιστή του ΚΠΠ, ο οποίος την αποθηκεύει και τη διανέμει όπου απαιτείται, όπως π.χ. στους σταθμούς εργασίας του ΚΠΠ. Στο υποκεφάλαιο 6.6 παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές.



Εικόνα 6.1: Ενδεικτική διάταξη του εξοπλισμού ενός ΣΕΠΠ



Εικόνα 6.2: Ενδεικτική διάταξη του εξοπλισμού ενός ΣΕΠΠ (Πηγή: Acosta-Coll at al., 2018)

Οι κρίσιμες υποδομές ενός ΚΠΠ πρέπει να έχουν διαθεσιμότητα που ξεπερνά το 99.99% του χρόνου σε ένα έτος, ενώ πρέπει να παραμένουν στοιχειωδώς επιχειρησιακές, ακόμα και στην περίπτωση μιας μεμονωμένης βλάβης. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται και η δημιουργία εφεδρικών δικτύων μετάδοσης της πληροφορίας (επικοινωνιακών υποδομών) και η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού.

6.3.2 Εφεδρείες και συντήρηση του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Στο πλαίσιο της ασφαλούς λειτουργίας ενός ΚΠΠ, πρέπει να εξασφαλίζονται τα ακόλουθα:

- ▶ **Εφεδρεία υποδομών διαχείρισης δεδομένων.** Πρέπει να υπάρχουν εναλλακτικές τρόποι συλλογής και μετάδοσης των δεδομένων.
- ▶ **Εφεδρεία μετρητών του ΔΠ.** Πρέπει να υπάρχουν εφεδρικοί μετρητές στο ΔΠ ή εφεδρικό ΔΠ, έτσι ώστε όταν το πρωτεύον ΔΠ δεν είναι διαθέσιμο, εξαιτίας αστοχίας εξοπλισμού ή προβληματικής λειτουργίας των υποδομών επικοινωνίας, το ΚΠΠ να εξακολουθεί να λαμβάνει μετρήσεις και να λειτουργεί.
- ▶ **Εφεδρεία λειτουργιών ενός ΚΠΠ.** Πρέπει να έχουν οριστεί οι απαιτούμενες διαδικασίες, έτσι ώστε όταν ένα τοπικό ΚΠΠ αντιμετωπίζει προβλήματα στη λειτουργία του, όπως απώλεια τηλεπικοινωνιών ή ενεργειακής τροφοδοσίας, τότε να μετατίθενται ανεμπόδιστα οι λειτουργίες του σε ένα εφεδρικό ΚΠΠ ή σε εφεδρικές εγκαταστάσεις του ίδιου του ΚΠΠ.

Συνήθως, ένα ΚΠΠ διασυνδέεται με τουλάχιστον δύο άλλα ΚΠΠ. Η παροχή των εν λόγω εφεδρειών αυξάνει το κόστος, ενώ απαιτεί τον τακτικό έλεγχο της διαλειτουργικότητας των ΚΠΠ. Η χρήση εφεδρικού ΚΠΠ είναι ακριβότερη από τη δημιουργία εφεδρικών υποδομών τηλεπικοινωνίας, υλισμικού και λογισμικού.

- ▶ **Εφεδρική παροχή ενέργειας.** Πρέπει να υπάρχει εφεδρική παροχή ενέργειας (α) στις κρίσιμες θέσεις παρατήρησης του ΔΠ, (β) στις υποδομές μετάδοσης των δεδομένων και (γ) στους διακομιστές και στους σταθμούς εργασίας. Σε απομακρυσμένους σταθμούς, όπου δεν είναι δυνατή η τροφοδοσία από το ηλεκτρικό δίκτυο ή/και απαιτείται ενεργειακή αυτονομία, η εφεδρική ισχύς συχνά παρέχεται από συσσωρευτές ενέργειας, οι οποίοι φορτίζουν με τη χρήση φωτοβολταϊκού συστήματος. Στην περίπτωση εγκαταστάσεων με αυξημένες απαιτήσεις ισχύος, όπως των ραντάρ και των Η/Υ ενός ΚΠΠ, η απαραίτητη ισχύς παρέχεται από ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη.

Κάθε ΚΠΠ πρέπει να διαθέτει ένα σαφές, καλή συντονισμένο και υποστηριζόμενο **πρόγραμμα συντήρησης**, με το οποίο εξασφαλίζονται τα ακόλουθα:

- ▶ Όλες οι εργασίες συντήρησης παρακολουθούνται ανεξάρτητα από το αν ένα ΚΠΠ αναλαμβάνει το ίδιο τις εργασίες συντήρησης ή αν τις αναθέτει με σύμβαση σε εξωτερικούς συνεργάτες ή αν πραγματοποιεί συνδυασμό των παραπάνω.
- ▶ Οι εργασίες συντήρησης που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία ενός ΚΠΠ καθορίζονται ρητά και τηρείται το ιστορικό τους. Στην περίπτωση που τα ΣΕΠΠ χρησιμοποιούν τεχνολογίες υπολογιστικού νέφους (βλ. υποκεφάλαιο 6.5), οι εργασίες συντήρησης του υλισμικού είναι πολύ μικρότερες.
- ▶ Υπάρχει η δυνατότητα εκπαίδευσης του προσωπικού σε θέματα συντήρησης ΚΠΠ και ιδίως των ΔΠ, όπως π.χ. της συντήρησης των αισθητήρων.

6.3.3 Λογισμικό του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Σε ένα ΚΠΠ, απαιτούνται διακομιστές και σταθμοί εργασίας με το αντίστοιχο λογισμικό για τη συλλογή, επεξεργασία, παρακολούθηση και παρουσίαση των δεδομένων του ΔΠ και για την παραγωγή και τη

διάδοση των προϊόντων προειδοποίησης. Το λογισμικό διαχωρίζεται (α) στα λειτουργικά συστήματα και (β) στις εφαρμογές.

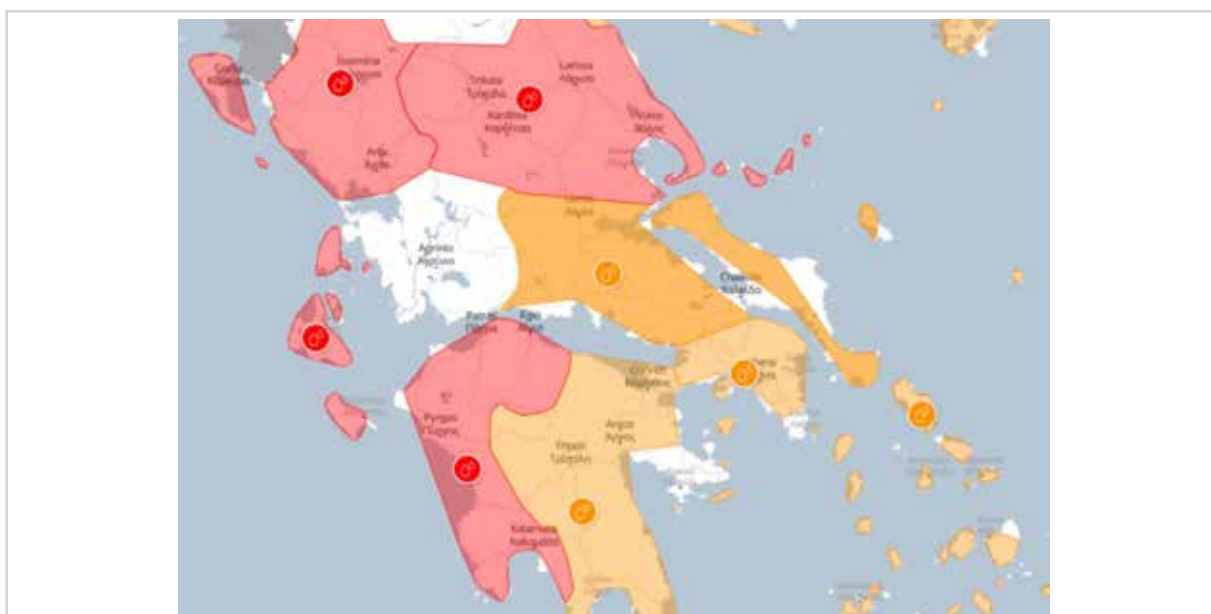
Το λειτουργικό σύστημα των σταθμών εργασίας ενός ΣΕΠΠ μπορεί να είναι ιδιόκτητο λογισμικό, όπως π.χ. το Microsoft Windows και το Red Hat Linux, ή λογισμικό ανοιχτού κώδικα, όπως π.χ. το Linux Ubuntu. Η επιλογή ενός λειτουργικού συστήματος βασίζεται (α) στο κόστος, (β) στην υφιστάμενη εμπειρία του φορέα του ΣΕΠΠ, (γ) στη δυνατότητα υποστήριξης από τον πάροχο του λειτουργικού συστήματος, και (δ) στην απαιτούμενη λειτουργικότητα του συστήματος με τις επιπρόσθετες εφαρμογές (NOAA, 2010). Η χρήση ιδιόκτητου λογισμικού απαιτεί την αγορά του, σε αντίθεση με τη χρήση λογισμικού ανοιχτού κώδικα, το οποίο διανέμεται ελεύθερα χωρίς κόστος. Ωστόσο, με την αγορά ιδιόκτητου λογισμικού παρέχεται και η δυνατότητα υποστήριξης από τον πάροχό του.

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε ένα ΚΠΠ μπορεί να έχουν αναπτυχθεί από άλλους φορείς ή από το προσωπικό του ίδιου του ΚΠΠ, εφόσον αυτό είναι απαραίτητο ή/και εφικτό. Με βάση την υφιστάμενη εμπειρία, οι εφαρμογές ενός ΚΠΠ επιτελούν λειτουργίες που κατατάσσονται στις ακόλουθες γενικές κατηγορίες (NOAA, 2010):

- ▶ Συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων.
- ▶ Παρακολούθηση των δεδομένων για υπέρβαση των κρίσιμων τιμών.
- ▶ Υπολογισμός των απαιτούμενων παραμέτρων με βάση το ΜΠΠ και τα δεδομένα εισόδου.
- ▶ Παρουσίαση των δεδομένων και των υπολογιζόμενων παραμέτρων στον υπεύθυνο προγνώσεων.
- ▶ Δημιουργία και διάδοση προϊόντων προειδοποίησης, βλ. κεφάλαιο 7.

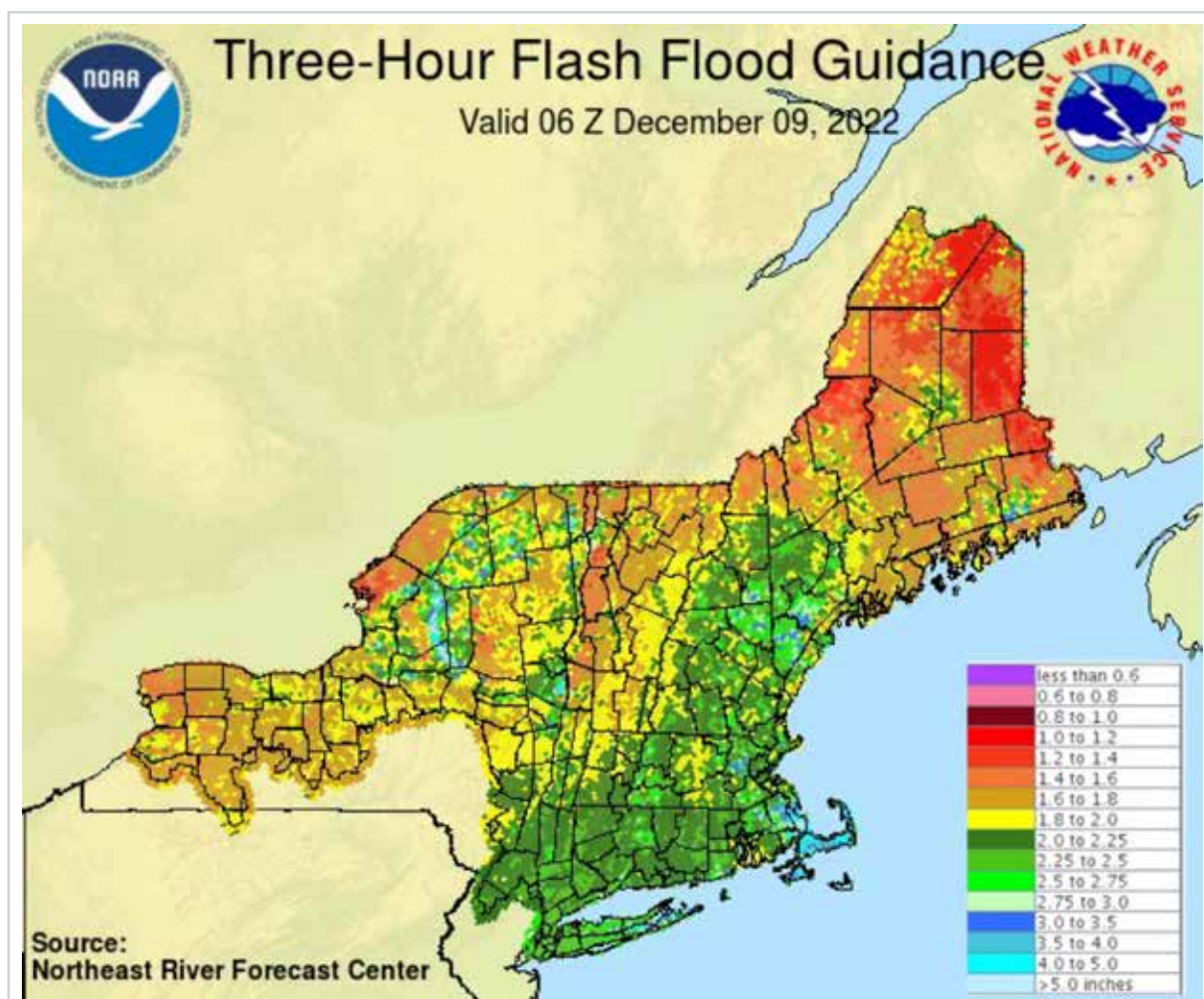
Οι παραπάνω γενικές κατηγορίες εφαρμογών διακρίνονται περαιτέρω στις ακόλουθες επιμέρους εφαρμογές (NOAA, 2010):

- ▶ Συλλογή, αποκωδικοποίηση και ψηφιακή αποθήκευση των δεδομένων παρατήρησης της γης και των υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζονται τα επίπεδα επικινδυνότητας της βροχόπτωσης σύμφωνα με το σύστημα MeteoAlarm (EMY, 2022a) που βρίσκεται στην ιστοσελίδα της EMY (βλ. επίσης κεφάλαιο 3).



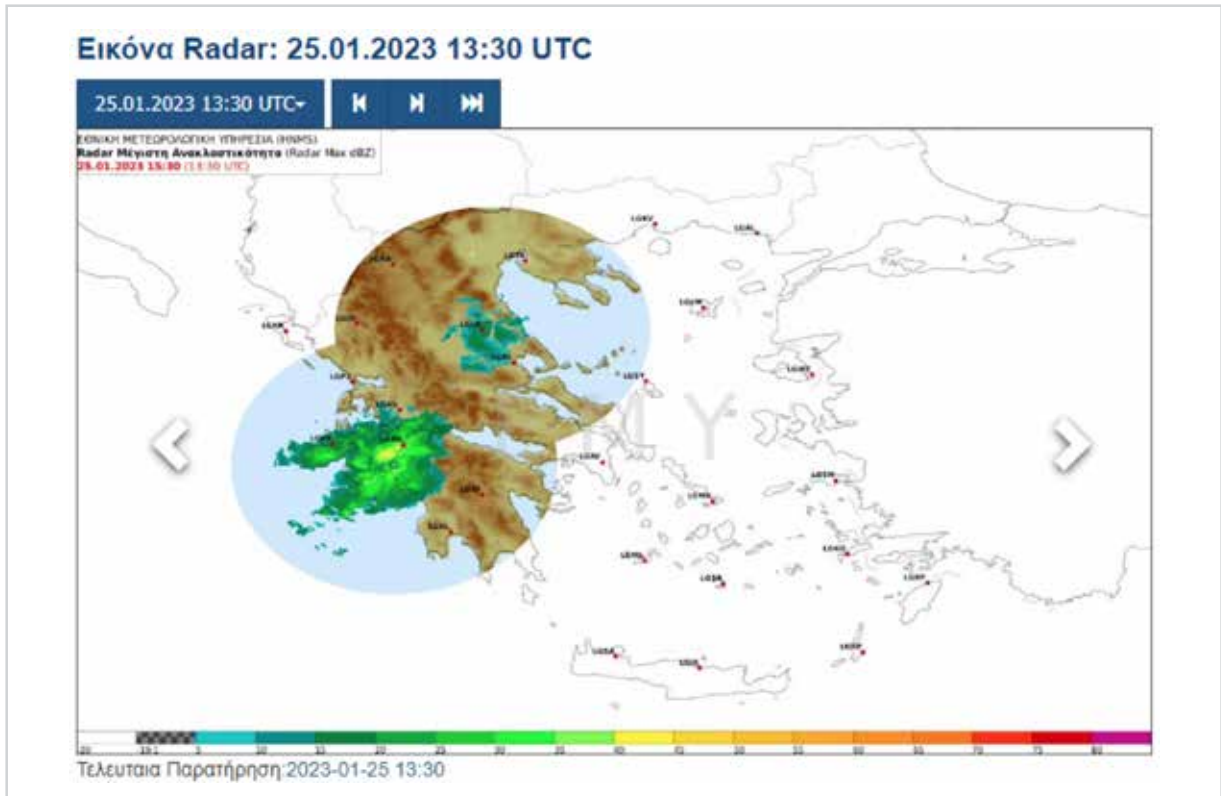
Εικόνα 6.3: Πρόγνωση επικινδυνότητας βροχόπτωσης (Πηγή: EMY, 2022a)

- ▶ Διαχείριση των βάσεων δεδομένων και των μεταδεδομένων.
- ▶ Ποιοτικός και στατιστικός έλεγχος των εισερχόμενων δεδομένων.
- ▶ Παρουσίαση των δεδομένων εισόδου σε κατάλληλη μορφή, όπως π.χ. πίνακα ή εικόνας και τη σύνταξη τεχνικών εκθέσεων - αναφορών.
- ▶ Σύγκριση των εκτιμήσεων και των μετρήσεων με τις αντίστοιχες οριακές τιμές, όπως π.χ. των μετρήσεων βροχόπτωσης σύμφωνα με τις τιμές Flash Flood Guidance (FFG) (βλ. υποκεφάλαιο 2.5.4) και ειδοποίηση του υπευθύνου προγνώσεων όταν γίνεται υπέρβασή τους, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικόνας 6.4.



Εικόνα 6.4: Flash Flood Guidance (FFG) 3 ωρών (Πηγή: NWS, 2022)

- ▶ Υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής των μετρούμενων μεγεθών από το ΔΠ και ειδοποίηση του υπευθύνου προγνώσεων για ενδεχόμενη υπέρβαση οριακών τιμών, όπως των FFG.
- ▶ Χαρτογράφηση και εμφάνιση δεδομένων ανακλαστικότητας των ραντάρ σε πραγματικό χρόνο και ειδοποίηση του υπευθύνου προγνώσεων όταν γίνεται υπέρβαση των οριακών τιμών τους. Στην Εικόνα 6.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο ραντάρ της EMY (2022β).
- ▶ Εμφάνιση δεδομένων συνολικών βροχοπτώσεων που παρατηρούνται από ραντάρ και ειδοποίηση του υπευθύνου προγνώσεων για τις περιοχές που ενδεχομένως κινδυνεύουν από πλημμύρα.



Εικόνα 6.5: Στιγμιότυπο ραντάρ της ΕΜΥ (Πηγή: ΕΜΥ, 2022β)

- ▶ Σύγκριση δεδομένων ανακλαστικότητας των ραντάρ και της έντασης βροχόπτωσης.
- ▶ Δημιουργία κειμένου και γραφικών περιλήψεων των παρατηρούμενων δεδομένων, των καθημερινών προγνώσεων και των προϊόντων προειδοποίησης. Στην Εικόνα 6.6 φαίνεται ενδεικτικά η υπολογιζόμενη με ένα ΜΠΠ περιοχή κατάκλισης.
- ▶ Μετάδοση των προϊόντων προειδοποίησης στα κανάλια επικοινωνίας, βλ. κεφάλαιο 7.



Εικόνα 6.6: Υπολογιζόμενη περιοχή κατάκλισης

6.4 Προσωπικό του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

Ένα ΚΠΠ πρέπει να είναι επαρκώς και κατάλληλα στελεχωμένο. Στο παρελθόν, σε πολλές χώρες, ακόμα και σε αυτές που διαθέτουν ΣΕΠΠ, το κύριο προσωπικό του ΣΕΠΠ εργαζόταν περιστασιακά έχοντας παράλληλα καθήκοντα και σε άλλες υπηρεσίες. Σήμερα, και με τις κατάλληλες τροποποιήσεις του σχετικού νομικού πλαισίου, το προσωπικό απασχολείται αποκλειστικά στο ΣΕΠΠ. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Ηνωμένου Βασιλείου, η οποία διαθέτει οργάνωση δύο επιπέδων για την πρόγνωση και την προειδοποίηση πλημμυρών σε μια κύρια περιοχή. Στο υψηλότερο επίπεδο της κύριας περιοχής, υπάρχει μια ομάδα μόνιμου προσωπικού που είναι υπεύθυνη για (α) την πρόγνωση πλημμύρας, για (β) την παροχή δεδομένων στα ΜΠΠ, (γ) την πραγματοποίηση υπολογισμών με τα ΜΠΠ και την παραγωγή προγνώσεων πλημμυρών και (δ) τη συντήρηση. Μια τυπική κύρια περιοχή περιλαμβάνει τρεις ή περισσότερες επιμέρους περιοχές, για τις οποίες το προσωπικό έχει την ευθύνη για την πραγματοποίηση των προγνώσεων και για την παροχή προειδοποιήσεων για επικείμενες πλημμύρες στο κοινό και στους λοιπούς εμπλεκόμενους. Κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας, οι ομάδες προσωπικού της κύριας και των επιμέρους περιοχών βρίσκονται σε συνεχή επικοινωνία.

Τον Απρίλιο του 2009, εισήχθη ένα τρίτο και ανώτερο επίπεδο με τη μορφή Εθνικού ΚΠΠ, το οποίο στελεχώνεται και λειτουργεί σε συνεργασία με την (Εθνική) Μετεωρολογική Υπηρεσία του Ηνωμένου Βασιλείου (WMO, 2011).

Σήμερα, αναγνωρίζεται πλέον ότι οι διαδικασίες ενός ΚΠΠ είναι εξαιρετικά σημαντικές για τη διαχείριση του κινδύνου και των επιπτώσεων των πλημμυρών. Κατά συνέπεια, ένα ΚΠΠ απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό πλήρους απασχόλησης με σαφώς καθορισμένα καθήκοντα και δεν μπορεί να αποτελεί μια προσωρινή λειτουργία έκτακτης ανάγκης σε έναν οργανισμό που εκπληρώνει άλλους πρωταρχικούς ρόλους, όπως για παράδειγμα σε ένα υπουργείο δημοσίων έργων ή σε ένα δήμο.

Η απόφαση ίδρυσης εθνικών και περιφερειακών ΚΠΠ και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται και υποστηρίζονται από τις εθνικές (υδρολογικές ή/και) μετεωρολογικές υπηρεσίες περιορίζονται μεταξύ άλλων και από τις υπάρχουσες δομές υπηρεσιών και την ιστορική εξέλιξη των σχετικών αρμοδιοτήτων. Δεν υπάρχει μια βέλτιστη μορφή που πρέπει να επιδιώκεται, αλλά σε ένα ΚΠΠ πρέπει να απασχολείται τουλάχιστον το παρακάτω προσωπικό:

- ▶ Ειδικοί στα ΜΠΠ με άριστες γνώσεις υδρολογίας και υδραυλικής.
- ▶ Μετεωρολόγοι, ειδικοί στα μετεωρολογικά μοντέλα. Σε ΣΕΠΠ που διαθέτουν ξεχωριστές μετεωρολογικές υπηρεσίες και υπηρεσίες διαχείρισης υδάτων, οι μετεωρολόγοι πρέπει να έχουν τις απαραίτητες γνώσεις υδρολογίας και υδραυλικής.
- ▶ Ειδικοί στις τεχνολογίες πληροφοριών και τηλεπικοινωνιών.
- ▶ Ειδικοί στην επικοινωνία με τα ΜΜΕ, το κοινό και την κυβέρνηση.
- ▶ Προσωπικό διοίκησης και διαχείρισης του ΚΠΠ.

6.5 Λειτουργία του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους

6.5.1 Εισαγωγή

Η παρουσίαση του εξοπλισμού στο κεφάλαιο 6.3 πραγματοποιείται με την παραδοχή ότι η αρμόδια

υπηρεσία του ΚΠΠ αποκτά/αγοράζει τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Τα τελευταία έτη παρατηρείται η χρήση απομακρυσμένων υπολογιστικών υποδομών μέσω του διαδικτύου στο υπολογιστικό νέφος. Η χρήση του υπολογιστικού νέφους σε ένα ΚΠΠ επιτρέπει κυρίως στο διαχειριστή του ΣΕΠΠ να εστιάσει στην πρακτική εφαρμογή του, χωρίς να τον απασχολούν θέματα που αφορούν τη λειτουργία και τη συντήρηση της υπολογιστικής υποδομής, όπως η ψύξη και η επαρκής ενεργειακή τροφοδοσία της. Επιπλέον, η χρήση του υπολογιστικού νέφους έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- ▶ Ο διαχειριστής του ΣΕΠΠ έχει τη δυνατότητα να διαφοροποιεί άμεσα τους υπολογιστικούς πόρους που χρησιμοποιεί στο υπολογιστικό νέφος, σύμφωνα με τις ανάγκες του ΚΠΠ.
- ▶ Ο εξοπλισμός που αφορά τις τηλεπικοινωνίες της υπολογιστικής υποδομής λειτουργεί με την ευθύνη του παρόχου των υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους. Έτσι, η διαθεσιμότητα της υπολογιστικής υποδομής είναι διασφαλισμένη.
- ▶ Παρέχεται η δυνατότητα συνεργασίας με διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους.
- ▶ Οι υποδομές των παρόχων υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους έχουν πολύ υψηλά επίπεδα φυσικής ασφάλειας.

6.5.2 Κέντρα Πρόγνωσης Πλημμυρών σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους

Σχεδιασμός ΚΠΠ σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους

Σε ένα ΚΠΠ που λειτουργεί σε υποδομές του υπολογιστικού νέφους, οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους δηλώνονται στον πάροχο υπηρεσιών του υπολογιστικού νέφους, ο οποίος τις κάνει διαθέσιμες στο ΚΠΠ. Το κόστος των υπηρεσιών αυτών αυξάνεται με το μέγεθός τους. Για το σχεδιασμό ενός ΚΠΠ και τη λειτουργία ενός ΣΕΠΠ σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα (Whaiduzzaman, 2014):

- ▶ **Βήμα 1.** Καταγράφονται οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους για τη διακίνηση, την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων με βάση τον όγκο, το ρυθμό και τα χαρακτηριστικά τους.
- ▶ **Βήμα 2.** Επιλέγονται οι τεχνολογίες και τα αντίστοιχα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων με βάση τα χαρακτηριστικά των δεδομένων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται ο χρόνος απόκρισης των εφαρμογών, οι υπολογιστικοί πόροι και ο απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης. Στην επιλογή των τεχνολογιών βάσεων δεδομένων, λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά ασφαλείας που προσφέρει η κάθε τεχνολογία και η διευκόλυνση των χρηστών στην προσπέλαση των δεδομένων.
- ▶ **Βήμα 3.** Πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του λογισμικού του ΚΠΠ ως σύνολο μικροϋπηρεσιών που αναπτύσσονται σε απομονωμένα περιβάλλοντα (containers). Η χρήση της τεχνολογίας των containers διασφαλίζει (α) την απροβλημάτιστη λειτουργία των μικροϋπηρεσιών και (β) τη διαλειτουργικότητα του λογισμικού.
- ▶ **Βήμα 4.** Σχεδιάζεται η πλατφόρμα αυτοματοποιημένης υλοποίησης των διεργασιών εξαγωγής, μετασχηματισμού και φόρτωσης δεδομένων (ETL).
- ▶ **Βήμα 5.** Επιλέγονται τα λειτουργικά συστήματα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εικονικών σταθμών εργασίας στο υπολογιστικό νέφος, όπως είναι ο επεξεργαστής, η μνήμη RAM, και ο αποθηκευτικός χώρος ROM.
- ▶ **Βήμα 6.** Σχεδιάζονται οι διαδικασίες που αφορούν στη διαλειτουργικότητα με εφεδρικές υποδομές ΚΠΠ και καταρτίζεται το Σχέδιο Ανάκαμψης από Καταστροφή (ΣΑΚ) των πληροφοριακών συστημάτων του ΚΠΠ. Ως καταστροφή εννοείται οποιαδήποτε σοβαρή δυσλειτουργία του λογισμικού

του ΚΠΠ, η οποία μπορεί να προέρχεται από (α) λάθος του χρήστη, (β) από κάποιο σφάλμα κατά την επικαιροποίηση του εγκατεστημένου λογισμικού και (γ) από κακόβουλη επίθεση. Το ΣΑΚ αφορά στην επαναφορά του ΚΠΠ σε πλήρη λειτουργική κατάσταση.

- ▶ **Βήμα 7.** Σχεδιάζονται οι εργασίες ελέγχου των επιδόσεων και της καλής λειτουργίας του ΚΠΠ.

Υποδομές αποθήκευσης δεδομένων

Για την αποθήκευση, τη φύλαξη και το διαμοιρασμό των δεδομένων ενός ΚΠΠ απαιτείται η εγκατάσταση λογισμικού, όπως π.χ. λογισμικού διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Το λογισμικό αυτό εγκαθίσταται σε τοπικές υποδομές ή/και υποδομές του υπολογιστικού νέφους, οι οποίες αποτελούνται από τους διακομιστές, το δικτυακό εξοπλισμό, όπως π.χ. τους δρομολογητές και τις κτιριακές εγκαταστάσεις, όπως π.χ. εγκαταστάσεις ψύξης των διακομιστών.

Τα δεδομένα ενός ΣΕΠΠ που αποθηκεύονται είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- ▶ Δεδομένα που προέρχονται από τον μετρητικό εξοπλισμό του ΔΠ, βλ. κεφάλαιο 3.
- ▶ Δεδομένα ex-situ, όπως είναι τα προϊόντα των ΜΠΠ, βλ. κεφάλαιο 4.
- ▶ Δεδομένα και αναλύσεις που παράγονται στο ΚΠΠ, όπως υπολογισμοί του ΜΠΠ.
- ▶ Εφεδρικά στιγμιότυπα των παραπάνω δεδομένων και του εγκατεστημένου λογισμικού στους διακομιστές του ΚΠΠ.

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτουν οι υποδομές αποθήκευσης δεδομένων είναι οι ακόλουθες:

- ▶ Να έχουν αυξημένη διαθεσιμότητα και να είναι διαθέσιμες για το 99.99% του χρόνου.
- ▶ Να έχουν δυνατότητα επέκτασης, π.χ. του χώρου αποθήκευσης δεδομένων σύμφωνα με τις ανάγκες του ΚΠΠ.
- ▶ Να έχουν μικρούς χρόνους απόκρισης για τις διαδικασίες της ανάγνωσης, της αποθήκευσης και της μεταφοράς των δεδομένων.
- ▶ Να προστατεύονται τα δεδομένα.

Πιο αναλυτικά:

Διαθεσιμότητα. Το κυριότερο προτέρημα της επιλογής των υποδομών του υπολογιστικού νέφους είναι η μεγάλη διαθεσιμότητά τους. Τα δεδομένα αποθηκεύονται ταυτόχρονα σε ένα ή περισσότερα κέντρα δεδομένων, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Με τον τρόπο αυτό τα δεδομένα είναι προστατευμένα από αστοχίες του υλισμικού, όπως π.χ. τη βλάβη σκληρού δίσκου, αλλά και από φυσικές καταστροφές που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία του ΚΠΠ. Τα κέντρα δεδομένων ανήκουν στον πάροχο του υπολογιστικού νέφους, ο οποίος διαχειρίζεται τα δεδομένα, αναλαμβάνει τις εργασίες κλινοποίησης τους μεταξύ των κέντρων δεδομένων και εγγυάται τη μεγάλη διαθεσιμότητά τους.

Δυνατότητα επέκτασης. Η διαδικασία αύξησης του χώρου αποθήκευσης δεδομένων είναι ευκολότερη στην περίπτωση που οι υποδομές αποθήκευσης δεδομένων βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος. Για την αύξηση του χώρου αποθήκευσης σε τοπικές υποδομές απαιτείται η προμήθεια και εγκατάσταση νέου υλισμικού, ενώ για την αύξηση του χώρου αποθήκευσης σε υποδομές του υπολογιστικού νέφους απαιτείται η δήλωση του απαιτούμενου χώρου αποθήκευσης στον πάροχο του υπολογιστικού νέφους, με το επιπλέον κόστος να ενσωματώνεται στο κόστος παροχής των υπηρεσιών του υπολογιστικού νέφους.

Χρόνοι απόκρισης. Οι χρόνοι απόκρισης στις εργασίες που απαιτούνται από τους χειριστές ή αυτοματοποιημένα από το λογισμικό του ΚΠΠ πρέπει να ελαχιστοποιούνται. Οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ▶ τα χαρακτηριστικά των διακομιστών,
- ▶ τις δυνατότητες του δικτυακού εξοπλισμού και της διαθέσιμης ταχύτητας του δικτύου,
- ▶ το λογισμικό, την τεχνολογία και το σχεδιασμό των βάσεων δεδομένων, και
- ▶ το είδος και το μέγεθος των απαιτούμενων εργασιών, π.χ. για την ανάγνωση ιστορικών δεδομένων από τη βάση δεδομένων ή την αποθήκευση ενός εφεδρικού στιγμιότυπου.

Ασφάλεια εξοπλισμού και προστασία δεδομένων. Στις υποδομές του υπολογιστικού νέφους ακολουθούνται αυστηρά πρότυπα για τη φυσική ασφάλεια του εξοπλισμού και την προστασία των δεδομένων. Γενικά, επιλέγονται οι βάσεις δεδομένων και τα συστήματα διαχείρισής τους DBMS (Database Management System), με βάση τα ακόλουθα:

- ▶ την ασφάλεια των δεδομένων,
- ▶ την ταχύτητα εκτέλεσης των απαιτούμενων εργασιών, και
- ▶ την ευκολία στο χειρισμό και την πρόσβαση στα δεδομένα.

Στις βάσεις δεδομένων πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ Ο έλεγχος των ταυτώσεων εγγραφών και πλεονασμάτων.
- ▶ Ο έλεγχος της συμβατότητας των δεδομένων μεταξύ τους.
- ▶ Ο έλεγχος της ορθότητας των δεδομένων με την ενσωμάτωση στη βάση δεδομένων περιοριστικών κανόνων.
- ▶ Ο περιορισμός της μη εξουσιοδοτημένης προσπέλασης των δεδομένων για την ασφάλειά τους.
- ▶ Η ανάληψη των δεδομένων με τη χρήση επαγωγικών κανόνων που ενσωματώνονται στη βάση δεδομένων.
- ▶ Η διευκόλυνση της διαδικασίας τήρησης αντιγράφων και παροχής μηχανισμών ανάκαμψης από πιθανή δυσλειτουργία.

Σχέδιο Ανάκαμψης από Καταστροφή

Για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των υποδομών ενός ΚΠΠ απαιτείται η κατάρτιση ΣΑΚ των πληροφοριακών συστημάτων του ΚΠΠ. Ο σκοπός ενός ΣΑΚ είναι η επαναφορά του ΚΠΠ στην πλήρως λειτουργική κατάσταση εντός χρονικού διαστήματος που είναι αποδεκτό για τις επιχειρησιακές απαιτήσεις του εποπτεύοντα φορέα. Σε ένα ΣΑΚ εντοπίζονται οι κίνδυνοι, τα κριτήρια που απαιτούνται για την ενεργοποίησή του, και οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν μετά την ενεργοποίησή του, όπως π.χ. είναι οι διαδικασίες μεταφοράς της λειτουργίας των πληροφοριακών συστημάτων ενός ΚΠΠ στις εφεδρικές εγκαταστάσεις του.

Με την εφαρμογή ενός ΣΑΚ αντιμετωπίζονται συνήθως οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- ▶ Σημαντική απώλεια δεδομένων.
- ▶ Δυσλειτουργία λογισμικού που είναι κρίσιμο για τη λειτουργία ενός ΚΠΠ.

- ▶ Κατάρρευση κρίσιμων υποδομών ενός ΚΠΠ ή/και της γενικότερης επικοινωνιακής υποδομής της περιοχής.
- ▶ Εισβολή στο φυσικό χώρο του ΚΠΠ.
- ▶ Κακόβουλες επιθέσεις στα πληροφοριακά συστήματα του ΚΠΠ.

6.6 Μετάδοση δεδομένων από τους μετρητές-αισθητήρες

6.6.1 Κριτήρια επιλογής της μεθόδου επικοινωνίας

Η αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ του ΔΠ και του ΚΠΠ είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία ενός ΣΕΠΠ. Χωρίς την έγκαιρη και την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων από κάθε μετρητή του ΔΠ στο ΚΠΠ (και στο ΜΠΠ) δεν είναι δυνατό να αξιολογηθεί και να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος από μια επικείμενη πλημμύρα.

Τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται η μέθοδος επικοινωνίας μεταξύ του ΚΠΠ και των μετρητών είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Η απόσταση μεταξύ των μετρητών και του ΚΠΠ.
- ▶ Η συχνότητα μέτρησης - λήψης των δεδομένων και η συχνότητα αποστολής τους στο ΚΠΠ.
- ▶ Η διαθεσιμότητα σταθερού δικτύου παροχής ενέργειας ή/και τοπικής παραγωγής ενέργειας (αυτόνομη λειτουργία).
- ▶ Ο βαθμός ασφάλειας μετάδοσης των δεδομένων, όπως π.χ. με ιδιωτικό δίκτυο ή με κοινή γραμμή δεδομένων.
- ▶ Η τοποθεσία της τηλεπικοινωνιακής υποδομής και οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.
- ▶ Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός και η ενδεχόμενη χρηματοδότηση.

Η μέθοδος επικοινωνίας σχετίζεται και με τις απαιτήσεις αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του ΔΠ και του ΚΠΠ. Η δυνατότητα αυτής της αμφίδρομης επικοινωνίας βελτιώνει την αξιοπιστία και την ευελιξία του ΣΕΠΠ, καθώς μπορούν να πραγματοποιηθούν απομακρυσμένα οι ακόλουθες διεργασίες:

- ▶ Η βαθμονόμηση των μετρητών του ΔΠ.
- ▶ Η αναζήτηση και ο εντοπισμός σφαλμάτων στο ΣΕΠΠ.
- ▶ Η διαφοροποίηση των παραμέτρων λειτουργίας των μετρητών. Ενδεικτικά, τέτοιες παράμετροι αφορούν τον ρυθμό των μετρήσεων και τον ρυθμό αποστολής των δεδομένων στο ΚΠΠ. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και τον απαιτούμενο χώρο αποθήκευσης δεδομένων.

6.6.2 Η απόσταση των μετρητών από το Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών ως παράγοντας επιλογής της μεθόδου επικοινωνίας των δεδομένων

Η μέθοδος επικοινωνίας των δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση μεταξύ των μετρητών και του ΚΠΠ. Οι περισσότεροι σταθμοί μέτρησης στην Ελλάδα είναι απομονωμένοι γεωγραφικά και βρίσκονται μακριά από σταθερά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, οπότε χρησιμοποιούνται ασύρματα

δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G/3G/4G για την αποστολή δεδομένων. Ένα τυπικό modem κινητής τηλεφωνίας καταναλώνει μέχρι και 350 mW όταν μεταδίδει δεδομένα, και αποτελεί τον κύριο καταναλωτή ενέργειας ενός σταθμού μέτρησης. Η ενεργειακή κατανάλωση ενός μετρητή σε έναν πλήρη κύκλο μέτρησης είναι τις περισσότερες φορές αρκετά μικρότερη, π.χ. 10mW. Η πρακτική που συνήθως εφαρμόζεται είναι η ακόλουθη:

- ▶ Για πολύ μικρές αποστάσεις, τα δεδομένα μεταδίδονται από τους μετρητές στο ΚΠΠ με τη χρήση καλωδίων δικτύωσης (π.χ. Unshielded Twisted Pair, UTP).
- ▶ Για μικρές αποστάσεις, τα δεδομένα μεταδίδονται από τους μετρητές στο ΚΠΠ με τη χρήση ραδιοζεύξης.
- ▶ Για μεγάλες αποστάσεις, τα δεδομένα μεταδίδονται από τους μετρητές μέσω σταθερών τηλεφωνικών γραμμών. Όταν δεν είναι εφικτή η χρήση σταθερών τηλεφωνικών γραμμών, τότε γίνεται χρήση συνδέσεων κινητής τηλεφωνίας και συγκεκριμένα της τεχνολογίας LTE/GSM και του πρωτόκολλου IoT. Όταν δεν διατίθεται δίκτυο κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούνται δορυφορικές συνδέσεις.

Επιπλέον, οι δορυφορικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται συχνά και ως εφεδρική επιλογή, διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων, ακόμα και στην περίπτωση που καταρρεύσει το τοπικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών.

6.6.3 Συχνότητα λήψης μετρήσεων και αποστολής δεδομένων

Οι περισσότεροι εγκατεστημένοι μετρητές των σταθμών στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται συνήθως για ερευνητικούς και ακαδημαϊκούς σκοπούς και η συχνότητα μετρήσεων τους εξαρτάται από τον ερευνητικό σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται. Για την επιλογή της συχνότητας λήψης μετρήσεων και αποστολής των δεδομένων λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ▶ Η κατανάλωση ενέργειας των μετρητών που επηρεάζει το κόστος λειτουργίας τους.
- ▶ Το κόστος απόκτησης των μετρητών, το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού λήψης μετρήσεων και αποστολής δεδομένων.
- ▶ Ο όγκος των διακινούμενων δεδομένων.

Όταν αυξάνεται η συχνότητα της λήψης μετρήσεων και της αποστολής δεδομένων, αυξάνεται το τηλεπικοινωνιακό κόστος και το κόστος αποθήκευσης των δεδομένων. Ένα σημαντικό κριτήριο επιλογής της συχνότητας λήψης μετρήσεων είναι η μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους. Όσο πιο μεγάλη είναι η χρονική μεταβολή του, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η συχνότητα μέτρησής του για την ορθή παρακολούθηση της χρονικής του εξέλιξης.

6.6.4 Αυτόνομα τοπικά συστήματα παραγωγής ενέργειας

Οι μετρητές μπορεί να τροφοδοτούνται από ένα τοπικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, όπως π.χ. από συνδυασμό συσσωρευτών ενέργειας και φωτοβολταϊκού πάνελ, οπότε το σύστημα αυτό λειτουργεί αυτόνομα και δεν εξαρτάται από το τοπικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Για το σχεδιασμό ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ενέργειας πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ **Βήμα 1.** Επιλέγεται η απαιτούμενη/επιθυμητή συχνότητα της λήψης μετρήσεων και της αποστολής δεδομένων.
- ▶ **Βήμα 2.** Υπολογίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος, δηλ. της συνολικής χωρητικότητας των συσσωρευτών ενέργειας και της ισχύος του φωτοβολταϊκού πάνελ με βάση (α) τις επιθυμητές ημέρες αυτονομίας (που καθορίζονται στο Βήμα 1) και (β) τη δυσμενέστερη δυνατή παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πάνελ, π.χ. για την ημέρα με πολύ χαμηλό ηλιακό ύψος και υψηλή νεφοκάλυψη.

Για εξοικονόμηση ενέργειας, η συχνότητα λήψης μετρήσεων μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά ανάλογα με την εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

6.6.5 Τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων και δίκτυα τηλεπικοινωνιών

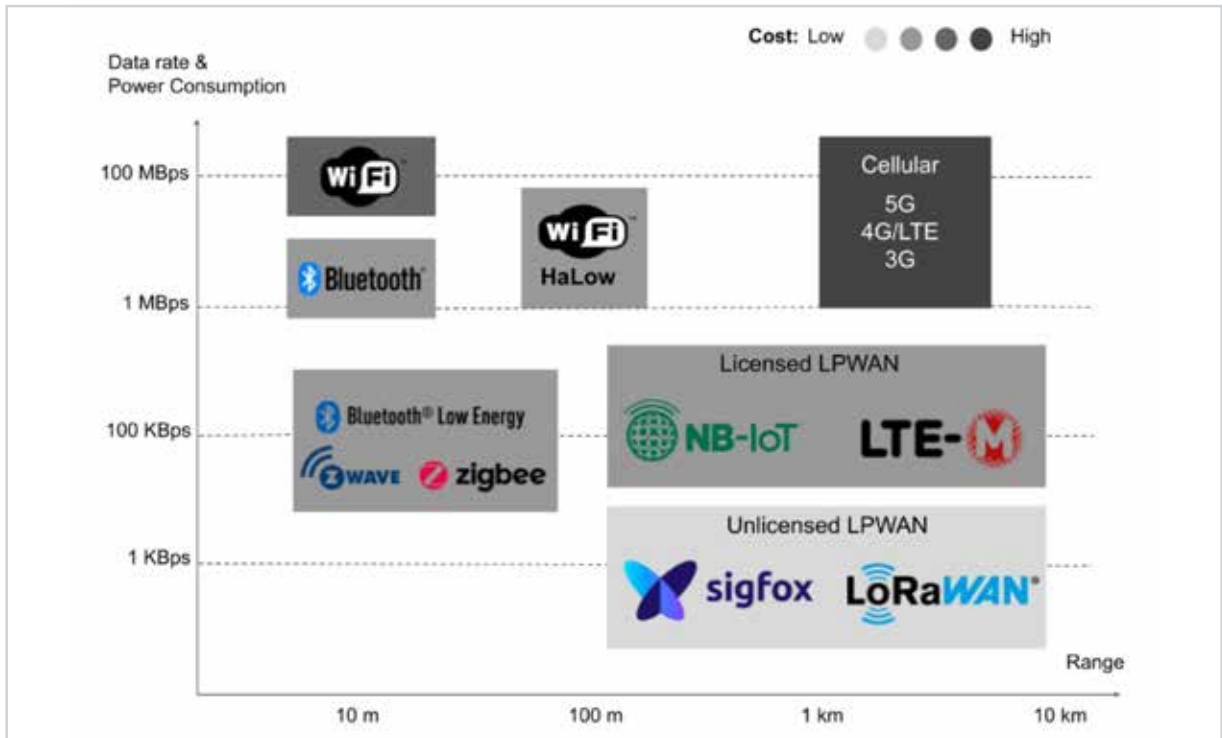
Η μετάδοση δεδομένων σε ένα ΚΠΠ από απομακρυσμένους μετρητές πραγματοποιείται μέσω του δικτύου της δημόσιας κυψελωτής τηλεφωνίας με τα ασύρματα πρωτόκολλα δικτύωσης 3G και 4G/LTE. Στο LTE υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας που είναι η ασυνεχής λήψη (DRX) και η λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (PSM). Στη PSM, που χρησιμοποιείται και από την Cosmote, οι τερματικές συσκευές τίθενται σε αναστολή λειτουργίας με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενώ στέλνουν περιστασιακά μηνύματα επικαιροποίησης της θέσης τους στο δίκτυο, για να αποφευχθεί η ανάγκη για νέα εγγραφή κατά την αφύπνιση. Επίσης, η λειτουργία Long Periodic TAU επιτρέπει στις μονάδες να παρατείνουν τη διάρκεια μεταξύ αυτών των μηνυμάτων παρακολούθησης έως και μερικές εβδομάδες, αυξάνοντας έτσι τα διαστήματα αδράνειας. Η διευρυμένη λειτουργία ασυνεχούς λήψης προσφέρει μια μακρύτερη, χαμηλής κατανάλωσης λειτουργία τηλεειδοποίησης που επιτρέπει στις συσκευές να λαμβάνουν δεδομένα από τον διακομιστή, ενώ δεν αποστέλλονται δεδομένα.

Τα τελευταία έτη έχει εμφανιστεί και εξαπλωθεί στη Ελλάδα η χρήση της τεχνολογίας NB-IoT (Narrowband - Internet of Things) για τη διασύνδεση συσκευών χαμηλής κατανάλωσης που λέγονται Things. Η τεχνολογία NB-IoT επιτρέπει τη σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από το παραδοσιακό 4G/LTE, με τη χρήση ειδικών μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας (όπως π.χ. η PSM), επεκτείνοντας τους χρονομετρητές για την επίτευξη μεγαλύτερης διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

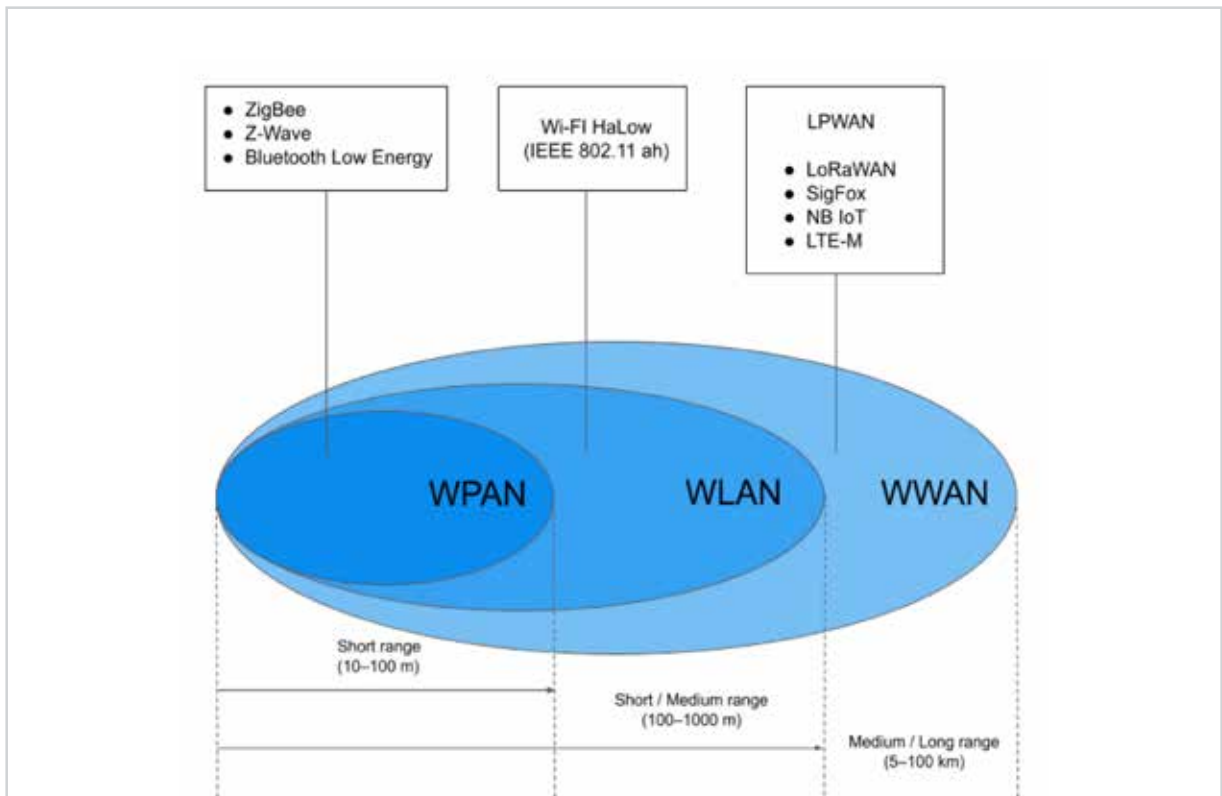
Συμπληρωματικά, με τη χρήση της δημόσιας τηλεφωνίας υπάρχει η δυνατότητα χρήσης αυτοοργανωμένων δικτύων LPWAN, όπως π.χ. με τη χρήση τεχνολογίας LoRa/LoRaWAN, ιδιαίτερα όταν υπάρχει στην περιοχή συστάδα σταθμών/τεχνολογία LoRa, χρησιμοποιώντας μια «κλειστή» τεχνική διασποράς φάσματος που απλώνει ένα σήμα στενής ζώνης σε ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης καναλιού. Το σήμα που προκύπτει έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου επιτρέποντας υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές. Εξαιτίας της τεχνικής διαμόρφωσης και της ενσωματωμένης δυνατότητας διόρθωσης σφαλμάτων, το σήμα LoRa μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με ισχύ σήματος αρκετά μικρότερη από το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλες αποστάσεις επικοινωνίας. Το LoRaWAN είναι ένα δίκτυο (και πρωτόκολλο) τοπολογίας αστέρα που χρησιμοποιεί την τεχνολογία μετάδοσης LoRa για να παρέχει χαμηλής ισχύος WAN δίκτυα με χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για την υποστήριξη κινητής αμφίδρομης επικοινωνίας χαμηλού κόστους με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνονται από 0.3 Kbps έως 50 Kbps.

Στις Εικόνες 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται οι ασύρματες τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων, το εύρος ζώνης, η εμβέλεια και η κατανάλωση ενέργειας και οι τύποι και το εύρος των ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δι-

αθέσιμων τεχνολογιών μετάδοσης δεδομένων και στον Πίνακα 6.2 οι απαιτήσεις ισχύος ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας που βρίσκεται ένας μετρητής, δηλ. σε ύπνωση, λήψη μέτρησης ή μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 6.7: Ασύρματες τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων, το εύρος ζώνης, η εμβέλεια και η κατανάλωση ενέργειάς τους (Πηγή: PROMWAD, 2022)



Εικόνα 6.8: Τύποι και εύρος των ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (Πηγή: PROMWAD, 2022)

Πίνακας 6.1

Κύρια χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνολογιών μετάδοσης δεδομένων (Πηγές: PROMWAD, 2022 • Arbia et al., 2017 • Pearman & Ravisankar, 2021 • Rehman et al., 2016)				
Τεχνολογία	Εύρος συχνότητας (GHz)	Εμβέλεια (Km)	Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (Mbps)	Απαιτήση ισχύος (mW)
Wi-Fi	2.4-5.0	0.01-0.10	54	Υψηλή (~1000)
Wi-Fi Halow	0.863-0.868, 0.902-0.928	1.0	<600	Χαμηλή (<100)
Bluetooth	2.4	10.0	0.72	Μέτρια (~100)
Bluetooth Low Energy	2.4-2.4835	<100.0	<2	Χαμηλή (~10)
Z-Wave	0.868-0.908	<0.03	<0.1	Χαμηλή (<1)
ZigBee	0.868-0.915-2.4	0.07	<0.250	Χαμηλή (<1)
NB-IoT	0.7-1.8 (Κινητής τηλεφωνίας)	1-10	0.2	Χαμηλή (~50)
SigFox	0.868	<50	<0.0001	Μέτρια (~100)
LTE-M	0.8-2 (Κινητής τηλεφωνίας)	1-10	4	Μέτρια (~200)
LoRa	0.863-0.870	5-20	0.05	Χαμηλή (<100)
GSM/GPRS	0.850-0.900, 1.8-1.9 (Κινητής τηλεφωνίας)	2-35	0.168	Υψηλή (~2000)
Cellular (5G, 4G/LTE, 3G)	0.850-0.900, 1.8-1.9 (Κινητής τηλεφωνίας)	2-35	0.4-20	Υψηλή (>5000)
Wi-Fi	2.4-5.0	0.01-0.10	54	Υψηλή (~1000)

Πίνακας 6.2

Απαιτήσεις ισχύος (mW) ανάλογα με τη λειτουργικότητα και την τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων				
Κατάσταση	Wi-Fi	ZigBee	Bluetooth LE	LoRA
Νάρκη /Υπνωση	0.01	0.08	0.004	0.03
Λήψη	90	84	28.5	55
Εκπομπή	350	72	26.5	80
Μέση ισχύς με 10 μηνύματα/ημέρα	0.5	0.414	0.05	0.06

Από τις Εικόνες 6.7 και 6.8 και τους Πίνακες 6.1 και 6.2 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Η κατανάλωση ενέργειας στην κατάσταση ύπνωσης είναι ελάχιστη και στην κατάσταση μετάδοσης δεδομένων μεγιστοποιείται.
- ▶ Η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση εναλλασσόμενου κύκλου λειτουργίας, ο οποίος αποτελείται από ένα συγκριτικά μεγάλο διάστημα ύπνωσης που ακολουθείται από ένα σύντομο διάστημα μέτρησης, μετάδοσης ή/και λήψης δεδομένων.

- ▶ Σε πρωτόκολλα, όπως είναι το LoRa/LoRaWAN (class B) και το BLE (Bluetooth Low Energy), μειώνεται ο κύκλος εργασιών, π.χ. στο 1%, περιορίζοντας την επικοινωνία στις 87.6 ώρες/έτος με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές της τεχνολογίας LoRa σε ΣΕΠΠ, όπως των Leon et al., 2018, των Ragnoli et al., 2020 και Grimsley et al., 2022. Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται μια αυτόνομη ενεργειακά πύλη κινητής τηλεφωνίας και ένας ανέπαφος αισθητήρας μέτρησης στάθμης με ενσωματωμένο καταγραφέα/μεταδότη δεδομένων (USGS, 2022). Οι αισθητήρες LoRa μεταδίδουν δεδομένα από διάφορους μετρητές στην πύλη κινητής τηλεφωνίας και η αποτελεσματική απόσταση λειτουργίας αισθητήρα-πύλης είναι μέχρι 20 km.



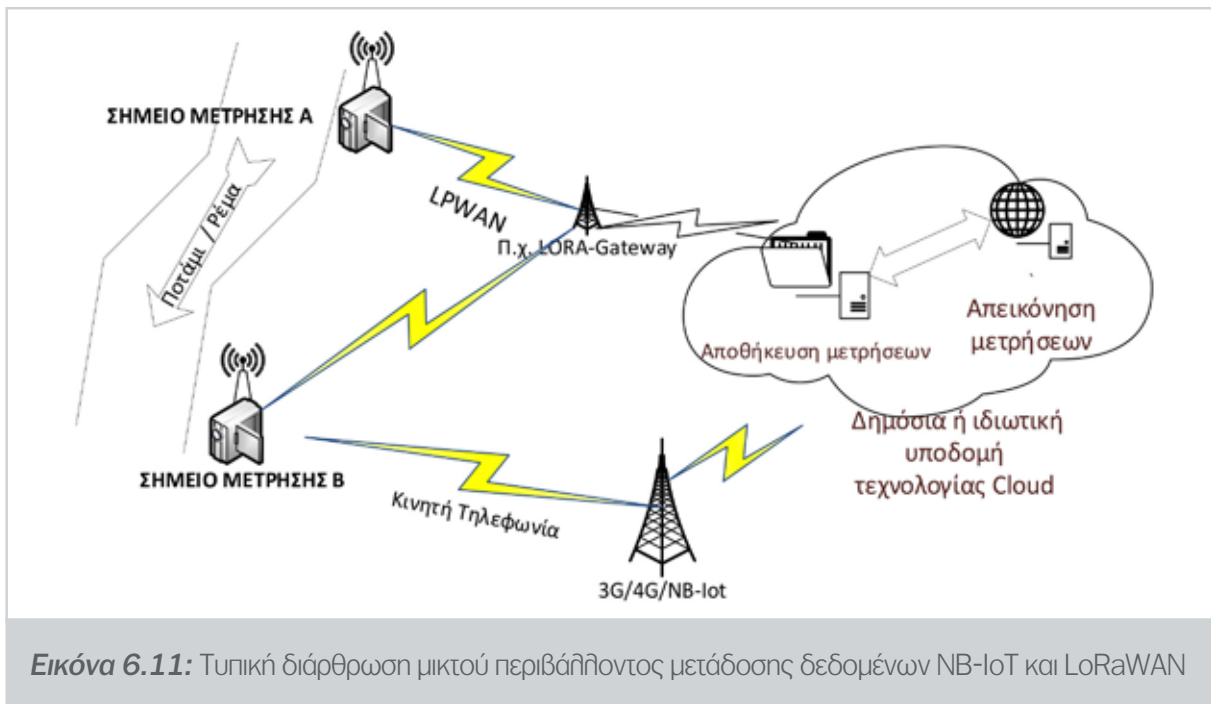
Εικόνα 6.9: Αυτόνομη (ενεργειακά) πύλη κινητής τηλεφωνίας (αριστερά) και ανέπαφος αισθητήρας μέτρησης στάθμης με ενσωματωμένο καταγραφέα/μεταδότη δεδομένων (δεξιά) (Πηγή: USGS, 2022)

Στην Εικόνα 6.10, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός ΣΕΠΠ, το οποίο αποτελείται από έναν κόμβο LoRa συνδεδεμένο με πολλούς μετρητές - αισθητήρες, μια πύλη LoRa, ένα διακομιστή δικτύου LoRAWAN και μια βάση δεδομένων. Η πύλη LoRa χρησιμοποιείται για να γεφυρώσει το ασύρματο δίκτυο LoRa σε δίκτυο IP μέσω Wi-Fi και Ethernet (Salihi et al., 2020). Το σύστημα χρησιμοποιεί το TTN (The Things Network) ως διακομιστή του δικτύου LoRaWAN, το οποίο είναι μια υποδομή ανοιχτού κώδικα που παρέχει ανοιχτά εργαλεία και δίκτυα για τη δημιουργία εφαρμογών IoT. Στη συνέχεια, τα δεδομένα από τους αισθητήρες αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης HTTP με το TTN.



Εικόνα 6.10: Αρχιτεκτονική δικτύου με τυπική διάρθρωση μικτού περιβάλλοντος μετάδοσης δεδομένων NB-IoT και LoRaWAN

Στην Εικόνα 6.11 φαίνεται μια τυπική διάρθρωση μικτού περιβάλλοντος μετάδοσης δεδομένων NB-IoT και LoRaWAN.



6.6.6 Μετάδοση δεδομένων με την τεχνική του πληθοπορισμού

Κατά τα τελευταία έτη τονίζεται η ανάγκη συμμετοχής των τοπικών κοινοτήτων στο σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ και στη συλλογή δεδομένων από τα ΔΠ (Cools et al., 2016). Η συμμετοχή των πολιτών στη συλλογή δεδομένων από ΔΠ και γενικότερα στις σχετικές επιστημονικές έρευνες, η οποία εφαρμόζεται όλο και πιο συχνά, αναφέρεται ως επιστήμη του πολίτη ή πληθοπορισμός (crowdsourcing). Η επιστήμη του πολίτη είναι η συμμετοχή του στις επιστημονικές διαδικασίες, όπου ο βαθμός εμπλοκής του μπορεί να κυμαίνεται από μεμονωμένες εργασίες, όπως τη συλλογή δεδομένων του ΔΠ, μέχρι την πλήρη εμπλοκή του στο σχεδιασμό της έρευνας (Bonney et al., 2009). Ο πληθοπορισμός είναι η ανάθεση εργασιών σε ένα μεγάλο πλήθος ατόμων που συνήθως δεν διατίθενται από έναν μόνο οργανισμό (Howe, 2006).

Η τεχνική του πληθοπορισμού εφαρμόζεται και στα ΣΕΠΠ. Οι πολίτες αναφέρουν πληροφορίες για την εμφάνιση πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας έτσι τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα δεδομένων και πληροφοριών για την αντιμετώπιση και τη διαχείριση πλημμυρών (See, 2019). Όταν η συλλογή, η επεξεργασία και η μετάδοση των πληροφοριών-δεδομένων πραγματοποιείται με ψηφιακά εργαλεία, τότε καλείται Εθελοντική Γεωγραφική Πληροφόρηση (Volunteered Geographic Information, VGI) (Vavassori et al., 2022).

Οι πολίτες μπορεί να συνεισφέρουν σε όλες τις φάσεις εξέλιξης μιας πλημμύρας (βλ. κεφάλαιο 1). Αναλυτικά (Mezzana et al., 2017):

- ▶ Πριν την πλημμύρα, στις φάσεις της πρόληψης και της προετοιμασίας, όπως π.χ. στο σχεδιασμό του ΣΕΠΠ, στη δημιουργία/επικαιροποίηση των χαρτών πλημμύρας, στην παρακολούθηση των πλημμυρών, και στην εκπαίδευση.
- ▶ Κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, στην παραγωγή των γεωγραφικών πληροφοριών.
- ▶ Μετά την πλημμύρα, με την πληθοποριστική σύνταξη χαρτών για την αντιμετώπιση της πλημμύρας.

Αναφορικά με τη συλλογή και τη μετάδοση δεδομένων, οι πολίτες μπορεί να συμμετέχουν στη συλλογή των δεδομένων του ΔΠ, αλλιώς και να αποτελούν και οι ίδιοι ένα δίκτυο παρακολούθησης. Ενδεικτικά, αναφέρεται το Παρατηρητήριο Πλημμυρών του Πολίτη (Flood Citizen Observatory, FCO) (Degrossi et al., 2014) που είναι μια τεχνική πληθοπορισμού για τη συλλογή πληροφοριών από εθελοντές και έχει χρησιμοποιηθεί στο ερευνητικό έργο AGORA (Mezzana et al., 2017). Ο κύριος στόχος του FCO είναι να συλλέγει χρήσιμες εθελοντικές πληροφορίες για τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας ειδικά στις περιοχές κατάκλισης και για τη στάθμη της επιφάνειας ροής στα υδατορέματα, προκειμένου να αξιοποιούνται αυτές οι πληροφορίες στη λήψη αποφάσεων. Το FCO βασίζεται στην πλατφόρμα πληθοπορισμού Ushahidi (2022), η οποία χρησιμοποιείται παγκοσμίως από ακτιβιστές, υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και πολίτες για τη χαρτογράφηση ακραίων γεγονότων.

Στο FCO οι πολίτες-εθελοντές θεωρούνται ως «ανθρώπινοι αισθητήρες» που παρατηρούν σημαντικές πτυχές του κινδύνου πλημμύρας σε τοπικό επίπεδο. Προκειμένου να διευκολυνθεί η παροχή πληροφοριών για τον κίνδυνο πλημμύρας στο FCO, η διαδικασία τυποποιείται. Οι μηχανισμοί ερμηνείας αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές κατηγορίες και οι ετικέτες για κάθε μηχανισμό αντιπροσωπεύονται από υποκατηγορίες. Έτσι, οι εθελοντές μπορούν να εντοπίσουν πιο εύκολα την κατηγορία που αντιπροσωπεύει καλύτερα το παρατηρούμενο σενάριο. Για να στείλουν μια αναφορά, οι εθελοντές μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια εφαρμογή για κινητά ή/και έναν ιστότοπο (Degrossi et al., 2014).

Κατά τη διάρκεια πλημμυρών στο Queensland το 2011, η Αυστραλιανή Ραδιοφωνική Εταιρεία οργάνωσε ένα FCO για να χαρτογραφήσει τις πλημμυρισμένες περιοχές (McDougall, 2011). Αυτό επέτρεψε σε άτομα να στέλνουν πληροφορίες για την πλημμύρα με email, μηνύματα κειμένου, μέσω του κοινωνικού δικτύου Twitter ή στην πλατφόρμα που είναι διαθέσιμη στο Διαδίκτυο.

6.7 Βιβλιογραφία

1. Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., Martinez-Peir, M. & De la Hoz-Franco, E. (2018). Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods—A Review. *Sensors*, 18(7):2255. <https://doi.org/10.3390/s18072255>
2. Arbia, D., Alam, M., Moullec, Y., & Hamida, E. (2017). Communication challenges in on-body and body-to-body wearable wireless networks—a connectivity perspective. *Technologies*, 5(3), 43. <https://doi.org/10.3390/technologies5030043>
3. Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V. & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
4. Cools, J., Innocenti, D., & O'Brien, S. (2016). Lessons from flood early warning systems. *Environmental Science & Policy*, 58, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.006>
5. Degrossi, L. C., De Albuquerque, J., Fava, M. C., & Menciondo, E. M. (2014). Flood Citizen Observatory: a crowdsourcing-based approach for flood risk management in Brazil. *Proceedings of the International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, SEKE-2014*, pp. 570-575.
6. Grimsley, R., Marineau, M., & Iannucci, B. (2022). Experiences in LP-IoT: EnviSense Deployment of Remotely Reprogrammable Environmental Sensors. *Proceedings of the 1st ACM Workshop on No Power and Low Power Internet-of-Things (LP-IoT'21)*. <https://doi.org/10.1145/3477085.3478988>
7. Howe, J. (2006). The rise of crowdsourcing. *Wired Mag.* 14, 1-4.

8. Leon, E., Alberoni, C., Wister, M., & Hernandez-Nolasco, J. (2018). Flood early warning system by twitter using Lora. UCAMl 2018. <https://doi.org/10.3390/proceedings2191213>
9. Mcdougall, K. (2011). Using volunteered information to map the Queensland floods. Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Biennial Conference 2011, Wellington, New Zealand.
10. Mezzana, D., & Quinti, G. (2017). Crisis mapping and crowdsourcing in flood management. 10.13140/RG.2.2.35313.07527
11. NOAA (2010). National Oceanic and Atmospheric Administration. Flash Flood Early Warning System Reference Guide. https://www.met.ed.ucar.edu/training_module.php?id=958
12. NWS (2022). National Weather Service. <https://www.weather.gov/nerfc/ffg>
13. Pearman, T., & Ravisankar, A. (2021). A Comparison of the Energy Consumption Properties of Wi-Fi Backscatter and Bluetooth Devices as it Relates to Sensor and Asset Tracking Solutions. SCTE, NCTA, Cable Labs, 2021 Fall Technical Forum. <https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2021/2021-a-comparison-of-the-energy-consumption-properties>
14. PROMWAD (2022). <https://promwad.com/news/low-power-wireless-technologies>
15. Ragnoli, M., Barile, G., Leoni, A., Ferri, G., & Stornelli, V. (1970). An autonomous low-power LoRa-based flood-monitoring system: Semantic scholar. Journal of Low Power Electronics and Applications. <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Autonomous-Low-Power-LoRa-Based-Flood-Monitoring-Ragnoli-Barile/8ac732898f56500954516b73c599c3c9922e5e69>
16. Rehman, A. U., Rehman, S. U., Khan, I., Moiz, M., & Hasan, S. (2016). Security and Privacy Issues in IoT. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), 8(3), 147-157. <https://doi.org/10.17762/ijcnis.v8i3.2074>
17. Salih T. A., & Noori, M. S. (2020). Using LoRa Technology to Monitor and Control Sensors in the Greenhouse. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 928
18. See, L. (2019). A review of citizen science and crowdsourcing in applications of pluvial flooding. Frontiers in Earth Science, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00044>
19. USGS (2022). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/california-water-science-center/science/monitoring-drought-conditions-upper-feather-river>
20. Ushahidi (2022). <https://www.ushahidi.com/>
21. Vavassori, A., Carrion, D., Zaragoza, B., & Migliaccio, F. (2022). VGI and Satellite Imagery Integration for Crisis Mapping of Flood Events. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2022, 11, 611. <https://doi.org/10.3390/ijgi11120611>
22. Whaiduzzaman, M., Haque, M. N., Chowdhury, R. K., & Gani, A. (2014). A study on strategic provisioning of Cloud Computing Services. The Scientific World Journal, 2014, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2014/894362>
23. WMO (2011). World Meteorological Organization. Manual on Flood Forecasting and Warning, WMO-No. 1072. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4090
24. EMY (2022a). Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. <http://www.emy.gr/emyl/warning/meteoalarm>
25. EMY (2022b). Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. http://www.emy.gr/emyl/observation/eikones_radar?ora=None

Μετάδοση και Επικοινωνία Προειδοποιήσεων - Ετοιμότητα Απόκρισης

Α. Ι. Στάμου

7.1 Εισαγωγή

Η αποτελεσματική μετάδοση και επικοινωνία των προειδοποιήσεων του ΣΕΠΠ, καθώς και η ετοιμότητα απόκρισης του κοινού είναι ζωτικής σημασίας. Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Βήμα 1.** Δόμηση του μηνύματος προειδοποίησης αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του Μοντέλου Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΜΠΠ) και του Δικτύου Παρακολούθησης (ΔΠ).
- Βήμα 2.** Μετάδοση του μηνύματος προειδοποίησης από το Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ) προς τους αποδέκτες μέσω κατάλληλων καναλιών επικοινωνίας.
- Βήμα 3.** Λήψη και κατανόηση του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους.
- Βήμα 4.** Αποδοχή του μηνύματος προειδοποίησης από τους ενδιαφερόμενους και πραγματοποίηση των ορθών ενεργειών με βάση την ετοιμότητα που διαθέτουν και το σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες.

Η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό εργασιών σε διεπιστημονικό επίπεδο για τη συστηματική κατανόηση όλων των πτυχών που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότητα των προειδοποιήσεων. Γενικά, η επιτάχυνση της τεχνολογικής προόδου απαιτεί συνεχή έρευνα για την αύξηση της αποτελεσματικότητας των νέων μορφών και καναλιών επικοινωνίας και τη βελτίωση της κατανόησης και της πρακτικής δημιουργίας αποτελεσματικών προειδοποιήσεων για πλημμυρικά φαινόμενα.

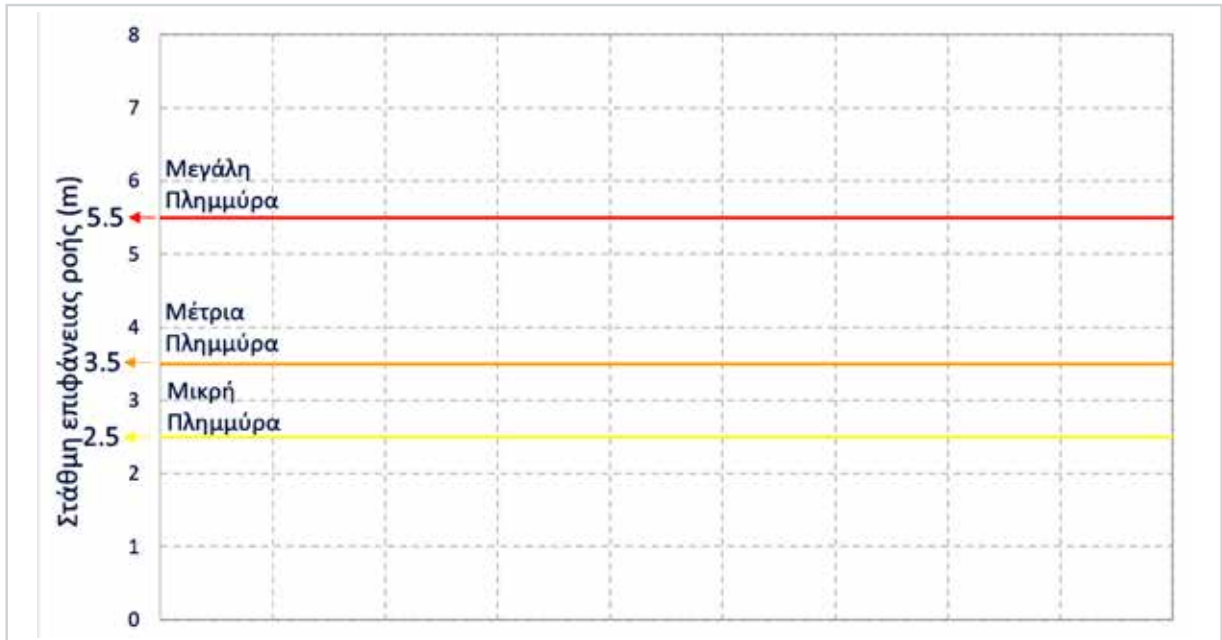
Στη διαδικασία της επικοινωνίας των προειδοποιήσεων, δεν πρέπει να υποεκτιμάται η σημασία της ατομικής συμπεριφοράς (Bean et al., 2015) και της ενημέρωσης – εκπαίδευσης. Για να προχωρήσει ο ενδιαφερόμενος στις ορθές ενέργειες (βήμα 4), θα πρέπει να πιστέψει στην αξιοπιστία του μηνύματος, να το προσωποποιήσει, δηλ. να εντοπίσει τους λόγους που τον αφορά, και να επιβεβαιώσει ότι το μήνυμα είναι αληθινό. Επίσης, για να το κατανοήσει και να γνωρίζει τι πρέπει να κάνει, θα πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη ενημέρωση και εκπαίδευση.

7.2 Δόμηση μηνυμάτων προειδοποίησης

7.2.1 Χαρακτηριστικές στάθμες επιφάνειας ροής υδατορέματος και κατηγορίες πλημμύρας

Στα περισσότερα ΣΕΠΠ η έκδοση μηνυμάτων προειδοποίησης βασίζεται κυρίως στην παρακολούθηση της στάθμης της επιφάνειας ροής ενός υδατορέματος σε μια θέση του ΔΠ, στην οποία πραγματοποιείται η πρόγνωση στάθμης με το ΜΠΠ (βλ. κεφάλαιο 4). Στην Εικόνα 7.1 φαίνονται τρεις τιμές στάθμης της επιφάνειας ροής στη θέση παρακολούθησης/πρόγνωσης, οι οποίες έχουν προσδιοριστεί με παρατηρήσεις συμβάντων πλημμυρών, αλλά και με υπολογισμούς του ΜΠΠ. Οι στάθμες αυτές σημειώνονται με διαφορετικά χρώματα που είναι κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο, σε αντιστοιχία με το χαρακτηρισμό

της πλημμύρας ως μικρή (minor), μέτρια (moderate) ή μεγάλη (major). Ο χαρακτηρισμός αυτός πραγματοποιείται με βάση τις επιπτώσεις της πλημμύρας, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 7.1. Η πρακτική αυτή εφαρμόζεται στο ΣΕΠΠ της Αυστραλίας που λειτουργεί το Γραφείο Μετεωρολογίας της, δηλ. η αντίστοιχη ελληνική ΕΜΥ (BOM, 2022).



Εικόνα 7.1: Χαρακτηριστικές στάθμες επιφάνειας ροής υδατορέματος

Πίνακας 7.1

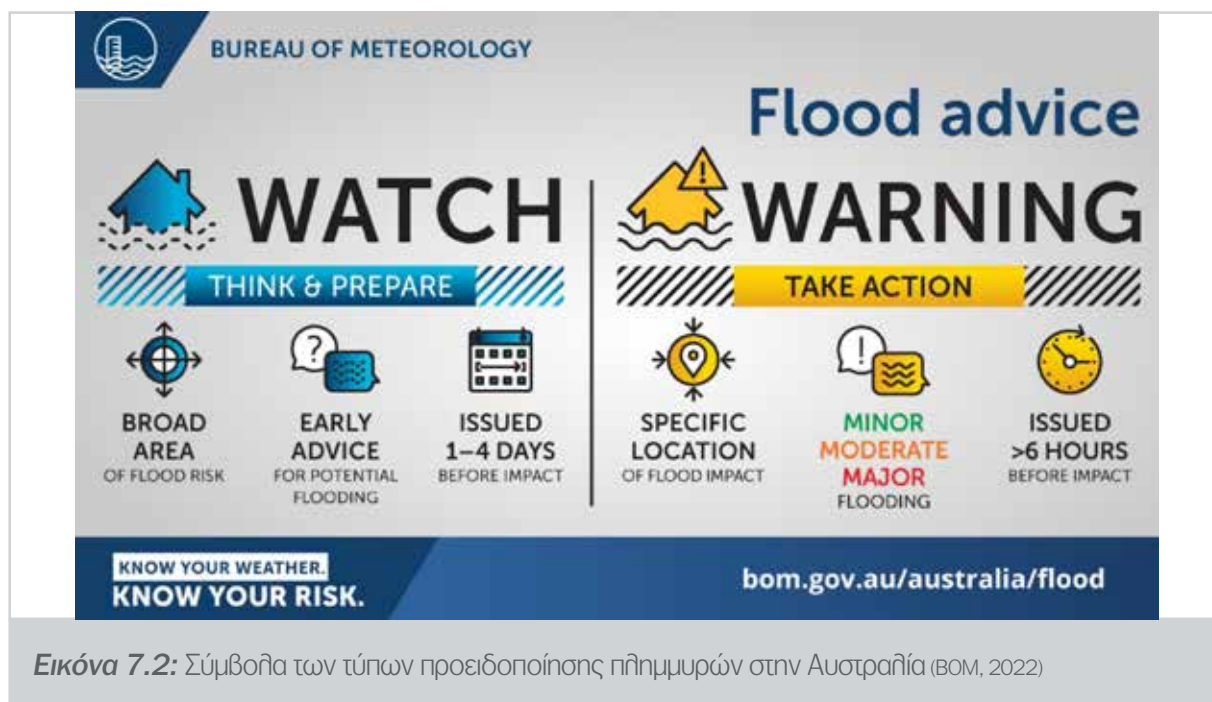
Κατηγορίες πλημμύρας, επιπτώσεις τους και αντίστοιχοι τύποι μηνυμάτων προειδοποίησης (BOM, 2022)		
Χαρακτηρισμός πλημμύρας	Επιπτώσεις της πλημμύρας	Τύπος μηνύματος
Μικρή (Minor)	Προκαλεί ταλαιπωρία. Χαμηλές περιοχές κοντά σε ρέματα πλημμυρίζουν. Μικροί δρόμοι και χαμηλές γέφυρες μπορεί να πλημμυρίσουν. Σε αστικές περιοχές, κάποιες αυλές, υπόγεια ή χαμηλά κτίρια (κάτω από το επίπεδο του ισογείου), και μονοπάτια ποδηλάτων και πεζών μπορεί να επηρεαστούν. Σε αγροτικές περιοχές μπορεί να χρειαστεί μετακίνηση ζώων και εξοπλισμού.	Ειδοποίηση (Alert)
Μέτρια (Moderate)	Επιπλέον των παραπάνω, η περιοχή κατάκλισης είναι πιο σημαντική. Ενδέχεται να επηρεαστούν οι κύριες οδοί κυκλοφορίας. Ορισμένα κτίρια ενδέχεται να επηρεαστούν πάνω από το επίπεδο του ισογείου. Ενδέχεται να απαιτηθεί εκκένωση των περιοχών που έχουν πληγεί από τις πλημμύρες. Σε αγροτικές περιοχές απαιτείται μετακίνηση ζώων και εξοπλισμού.	Επιφυλακή (Watch)
Μεγάλη (Major)	Επιπλέον των παραπάνω, εκτεταμένες αγροτικές περιοχές ή/και αστικές περιοχές πλημμυρίζουν. Πολλά κτίρια μπορεί να επηρεαστούν πάνω από το επίπεδο του ισογείου. Τμήματα πόλεων ενδέχεται να απομονωθούν και κύρια δίκτυα κυκλοφορίας να κλείσουν. Ενδέχεται να απαιτηθεί εκκένωση των περιοχών που έχουν πληγεί από την πλημμύρα. Υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και άλλες σημαντικές υποδομές ενδέχεται να επηρεαστούν από την πλημμύρα.	Προειδοποίηση (Warning)

Η έκδοση των μηνυμάτων προειδοποίησης μπορεί να βασιστεί και σε άλλα χαρακτηριστικά της πλημμύρας που υπολογίζονται με ένα ΜΠΠ, όπως π.χ. την έκταση των περιοχών κατάκλισης.

7.2.2 Τύποι μηνυμάτων προειδοποίησης

Οι χαρακτηριστικές στάθμες του υδατορέματος αντιστοιχούν συνήθως στους ακόλουθους βασικούς τύπους μηνυμάτων προειδοποίησης που φαίνονται στον Πίνακα 7.2 και τα σύμβολά τους φαίνονται στην Εικόνα 7.2:

- ▶ **Ειδοποίηση (alert).** Σε ορισμένες περιοχές, παράγονται αυτόματα ειδοποιήσεις σε υδατορέματα, όταν η στάθμη της επιφάνειας ροής υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο. Χρησιμοποιούνται ως πρόσθετος μηχανισμός προειδοποίησης.
- ▶ **Επιφυλακή (watch).** Εκδίδεται μήνυμα επιφυλακής, όταν οι προγνώσεις βροχοπτώσεων υποδηλώνουν ότι είναι πιθανό να συμβούν τοπικές και ποτάμιες πλημμύρες. Ο σκοπός του είναι συμβουλευτικός για μια εξελισσόμενη κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύρα. Δεν αποτελεί προειδοποίηση για επικείμενη πλημμύρα.
- ▶ **Προειδοποίηση (warning).** Εκδίδεται μήνυμα προειδοποίησης, όταν είναι περισσότερο σίγουρο ότι αναμένεται πλημμύρα σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι προειδοποιήσεις πλημμύρας είναι πιο στοχευμένες και εκδίδονται για συγκεκριμένες λεκάνες απορροής και τοποθεσίες εντός αυτών. Σε κάθε μήνυμα προειδοποίησης πραγματοποιείται πρόγνωση της σοβαρότητας της πλημμύρας.



Εικόνα 7.2: Σύμβολα των τύπων προειδοποίησης πλημμυρών στην Αυστραλία (BOM, 2022)

Με βάση την Εικόνα 7.2 και τον Πίνακα 7.2, τα μηνύματα προειδοποίησης αντιστοιχούν στις ακόλουθες στάθμες:

- ▶ Ειδοποίηση, όταν η στάθμη στη θέση παρακολούθησης φτάσει τα 2.5 m.
- ▶ Επιφυλακή, όταν η στάθμη στη θέση παρακολούθησης φτάσει τα 3.5 m.
- ▶ Προειδοποίηση, όταν η στάθμη στη θέση παρακολούθησης φτάσει τα 5.5 m.

Στα περισσότερα ΣΕΠΠ, οι τύποι των μηνυμάτων προειδοποίησης είναι τρεις και παρουσιάζουν συνήθως παρόμοια (αλλά όχι απαραίτητα τα ίδια) χαρακτηριστικά, δεν χρησιμοποιούν απαραίτητα τις ίδιες




ονομασίες, και πρακτικά ήνεε στον κάθε άνθρωπο/πολίτη/πληθυσμό τι πρέπει να κάνει ακολουθώντας τη λογική της προετοιμασίας ενός αθλητή δρόμων με τις ακόλουθες τρεις φάσεις:

- ▶ **Λάβετε θέση (outlook-ready).** Εκδίδεται για να υποδείξει ότι μπορεί να αναπτυχθεί ένα επικίνδυνο συμβάν πλημμύρας και προορίζεται να παρέχει πληροφορίες σε όσους χρειάζονται σημαντικό χρόνο, όπως π.χ. μερικές ημέρες, για να προετοιμαστούν για την επικείμενη πλημμύρα. Γενικά, εκδίδεται ως κείμενο αφήγησης σε απλή γλώσσα.
- ▶ **Έτοιμοι (watch-set).** Εκδίδεται όταν η προσδοκία ενός συμβάντος πλημμύρας έχει αυξηθεί, αλλήλ η εμφάνισή του, η τοποθεσία ή/και ο χρόνος του είναι ακόμα αβέβαιες. Προορίζεται να παρέχει αρκετό χρόνο προετοιμασίας, όπως π.χ. μερικές ώρες, ώστε όσοι πρέπει να θέσουν σε εφαρμογή τα σχέδια μετριασμού του να μπορούν να το κάνουν.
- ▶ **Πάμε (warning-go).** Εκδίδεται όταν επίκειται μια πλημμύρα, έχει πολύ μεγάλη πιθανότητα να συμβεί ή συμβαίνει, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το χρονικό πλαίσιο.

Κατά τη διάρκεια των παραπάνω φάσεων εκδίδονται **ανακοινώσεις (statements)** για την ακύρωση, τη λήξη, την παράταση ή τη συνέχιση μιας προειδοποίησης.

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τριών τύπων μηνυμάτων που εφαρμόζονται στο Ηνωμένο Βασίλειο (METOFFICE, 2022).

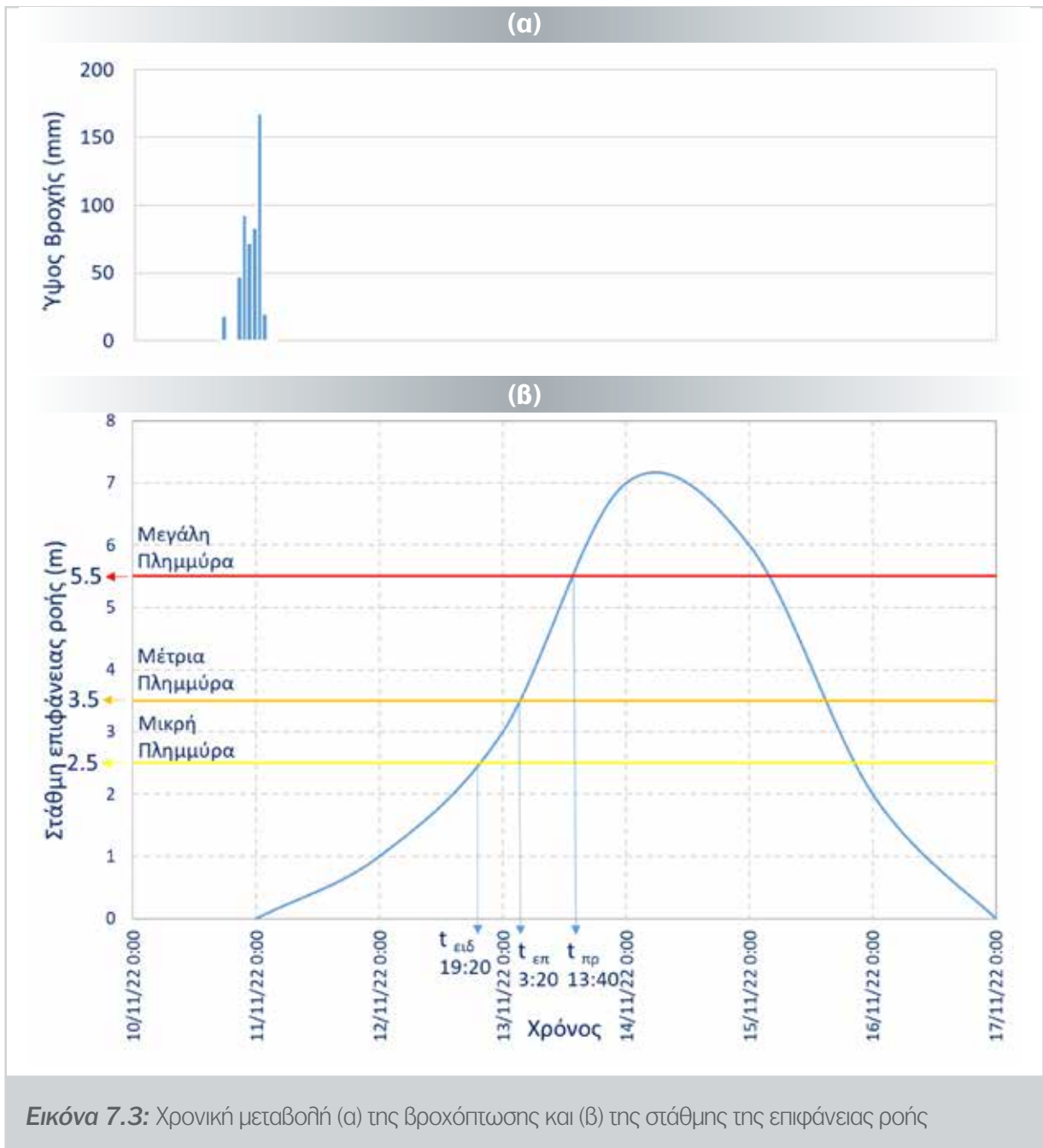
Πίνακας 7.2

Χαρακτηριστικά των τριών τύπων μηνυμάτων (METOFFICE, 2022)			
Σύμβολο και τύπος μηνύματος	Πότε εκδίδεται το μήνυμα;	Τι σημαίνει το μήνυμα;	Τι πρέπει να κάνουμε;
<p>Ειδοποίηση (Alert)</p> 	<p>Δύο ώρες μέχρι δύο ημέρες πριν από την πλημμύρα.</p>	<p>Η πλημμύρα είναι πιθανή και πρέπει να προετοιμαστείς.</p>	<p>Να είσαι έτοιμος να δράσεις σύμφωνα με το σχέδιο αντιμετώπισης πλημμύρας. Ετοίμασε ένα κιτ με είδη πρώτης ανάγκης. Απόφυγε το περπάτημα, το ποδήλατο ή την οδήγηση στις πλημμυρισμένες περιοχές. Έλεγε τακτικά τις προειδοποιήσεις, γιατί αυτή η ειδοποίηση για πλημμύρα μπορεί να αναβαθμιστεί σε επιφυλακή.</p>
<p>Επιφυλακή (Warning)</p> 	<p>Μισή ώρα έως μία ημέρα πριν από την πλημμύρα.</p>	<p>Αναμένεται πλημμύρα και πρέπει να κάνεις άμεσες ενέργειες.</p>	<p>Προστάτεψε τον εαυτό σου και την οικογένειά σου. Μετάφερε την οικογένεια, τα κατοικίδια και τα τιμαλφή σε ασφαλές μέρος. Κλείσε τις παροχές αερίου, ηλεκτρισμού και νερού, εάν είναι ασφαλές να το κάνεις αυτό. Τοποθέτησε τον αντιπλημμυρικό εξοπλισμό στη θέση του. Βοήθησε άλλους, αν μπορείς. Έλεγε τακτικά τις προειδοποιήσεις, γιατί αυτή η επιφυλακή για πλημμύρα μπορεί να αναβαθμιστεί σε σοβαρή προειδοποίηση.</p>
<p>Σοβαρή προειδοποίηση (Severe Warning)</p> 	<p>Όταν η πλημμύρα αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τη ζωή ή σημαντική αναστάτωση στην κοινότητα.</p>	<p>Σοβαρή πλημμύρα και κίνδυνος για τη ζωή σου.</p>	<p>Μείνε σε ασφαλές μέρος με μέσο διαφυγής. Να είσαι έτοιμος αν χρειαστεί να φύγεις από το σπίτι σου. Συνεργάσου με τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Κάλησε το 999, εάν βρίσκεσαι σε άμεσο κίνδυνο.</p>

7.2.3 Πρόγνωση μεταβολής στάθμης επιφάνειας ροής υδατορέματος

Στην Εικόνα 7.3 (α) φαίνεται η χρονική μεταβολή της βροχόπτωσης που καταγράφηκε σε μια λεκάνη απορροής. Η βροχή ξεκίνησε την ώρα 17:00 στις 10-11-2022, το ύψος της άρχισε να αυξάνει απότομα την ώρα 20:00 στις 10-11-2022 και να μειώνεται την ώρα 01:00 στις 11-11-2022.

Στην Εικόνα 7.3 (β) φαίνεται η μεταβολή της στάθμης της επιφάνειας ροής σε μια θέση παρακολούθησης/πρόγνωσης, η οποία υπολογίζεται με το ΜΠΠ με στοιχείο εισόδου τη βροχόπτωση.



Είναι ιδιαίτερα σημαντική για ένα ΣΕΠΠ η ακρίβεια της πρόγνωσης των καμπυλών της μορφής της Εικόνας 7.3 (β), η οποία προϋποθέτει την ύπαρξη βασικών υποδομών του ΣΕΠΠ. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του ΣΕΠΠ της Αυστραλίας:

- Τα δεδομένα εισόδου στο ΜΠΠ περιλαμβάνουν δεδομένα βροχόπτωσης και στάθμης επιφάνειας

ροής υδατορεμάτων σε πραγματικό χρόνο από ένα εκτεταμένο ΔΠ, πληροφορίες πρόγνωσης καιρού και δεδομένα από το εθνικό δίκτυο ραντάρ.

- ▶ Τα δεδομένα βροχοπτώσεων και στάθμης υδατορεμάτων προέρχονται από ένα δίκτυο σταθμών μέτρησης που ανήκουν και λειτουργούν από το Γραφείο Μετεωρολογίας και από την Πολιτεία και άλλους τοπικούς και περιφερειακούς φορείς.
- ▶ Το Γραφείο Μετεωρολογίας έχει στην κατοχή του και λειτουργεί ένα τμήμα του δικτύου της στάθμης των υδατορεμάτων που χρησιμοποιείται για την προειδοποίηση πλημμυρών. Ωστόσο, η πλειονότητα των δεδομένων της στάθμης υδατορεμάτων, αλλά και των φραγμάτων, προέρχεται από ΔΠ που ανήκουν και λειτουργούν από συνεργαζόμενους φορείς, οι οποίοι παρέχουν επίσης σημαντικό μέρος των δεδομένων βροχόπτωσης.
- ▶ Το Γραφείο Μετεωρολογίας διατηρεί μια εξελιγμένη υποδομή επικοινωνιών και υπολογιστών με δυνατότητα λειτουργίας 24/7 (24 ώρες / 7 ημέρες).
- ▶ Το Γραφείο Μετεωρολογίας βελτιώνει συνεχώς τις δυνατότητές του με την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων και βελτιωμένων ΜΠΠ και on-line λειτουργικών συστημάτων πληροφορικής και επικοινωνιών.
- ▶ Το Γραφείο Μετεωρολογίας έχει τη ευθύνη για τα πρότυπα των δεδομένων του δικού του ΔΠ που περιλαμβάνει τα έξοδα αντικατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας του.

7.2.4 Χρόνοι έκδοσης μηνυμάτων

Με βάση την Εικόνα 7.2 και 7.3 (β) και τον Πίνακα 7.2 παρατηρείται ότι οι χαρακτηριστικές στάθμες της επιφάνειας νερού στη θέση παρακολούθησης θα συμβούν ως εξής:

- ▶ Η στάθμη των 2.5 m, την ώρα 19:20 στις 12-11-2022.
- ▶ Η στάθμη των 3.5 m, την ώρα 03:20 στις 13-11-2022.
- ▶ Η στάθμη των 5.5 m, την ώρα 13:40 στις 13-11-2022.

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να πραγματοποιηθεί η έκδοση μηνυμάτων προειδοποίησης ως εξής:

- ▶ Ειδοποίηση, την ώρα 17:00 στις 11-11-2022.
- ▶ Επιφυλακή, την ώρα 07:00 στις 12-11-2022.
- ▶ Προειδοποίηση, την ώρα 15:00 στις 12-11-2022.

7.2.5 Διαθέσιμος χρόνος και ακρίβεια προειδοποίησης

Ο διαθέσιμος χρόνος για προειδοποίηση εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο μια λεκάνη απορροής και ειδικότερα τα υδατορέματα που βρίσκονται σε αυτή αποκρίνονται στις βροχοπτώσεις. Ένας μικρό ρέμα μπορεί να αποκριθεί μέσα σε λίγα λεπτά προκαλώντας ξαφνική πλημμύρα, ενώ σε ένα μεγάλο ποταμό μπορεί να προκληθεί πλημμύρα στις κατάντη περιοχές (βλ. κεφάλαιο 1) μετά από πολλές ώρες ή και ημέρες.

Μπορεί να εκδοθεί προειδοποίηση με βάση τις προγνώσεις των Μοντέλων Πρόγνωσης Πλημμύρας

(ΜΠΠ), στις τέσσερις φάσεις εξέλιξης της πλημμύρας (βλ. υποκεφάλαιο 1.1.2). Οι προγνώσεις αυτές βασίζονται αρχικά στην εκτίμηση ή και τη μέτρηση της βροχόπτωσης. Η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της βροχόπτωσης με δορυφόρους (βλ. υποκεφάλαιο 3.4) μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ($\pm 500\%$), ιδίως σε μικρές λεκάνες απορροής με εμβαδό μικρότερο από 100 km^2 . Τα ραντάρ πραγματοποιούν ακριβέστερες εκτιμήσεις της βροχόπτωσης που μπορεί όμως να είναι αξιόπιστες σε μικρή ανάλυση της τάξης των 1-2 km (βλ. υποκεφάλαιο 3.3). Οι βροχογράφοι καταγράφουν με ακρίβεια τη βροχόπτωση, αλλά μπορεί να μην είναι επαρκείς σε λεκάνες απορροής με υψηλή χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης (βλ. υποκεφάλαιο 3.2). Επιπλέον, ακόμα και αν οι μετρήσεις των βροχογράφων είναι ακριβείς, υπάρχει εγγενής αβεβαιότητα στην εκτίμηση της απορροής με το ΜΠΠ, όταν δεν εξασφαλίζεται η ικανοποιητική εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους, αλλά και λόγω αβεβαιότητας του ίδιου του υδρολογικού μοντέλου. Η μέτρηση της στάθμης της επιφάνειας της ροής είναι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορεί να εκδοθεί προειδοποίηση:

- ▶ με πολύ υψηλή ακρίβεια στις φάσεις 3 και 4, μετρώντας τη στάθμη της επιφάνειας ροής και επιβεβαιώνοντας την πρόγνωση του ΜΠΠ,
- ▶ με καλή ακρίβεια μετρώντας τη βροχόπτωση στη φάση 2 και επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις των ραντάρ και των δορυφόρων,
- ▶ με σχετικά καλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις των ραντάρ και των δορυφόρων, και
- ▶ με μικρή ακρίβεια αξιοποιώντας τις προγνώσεις των ΜΠΠ (βλ. κεφάλαιο 4).

Γενικά, όσο πιο νωρίς (πριν από την πλημμύρα) εκδοθεί η προειδοποίηση, τόσο μικρότερη ακρίβεια έχει αυτή, και όσο πιο αργά, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχει. Αλλά, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις, όπως π.χ. για ξαφνικές πλημμύρες για τις οποίες ο χρόνος προειδοποίησης είναι αναπόφευκτα μικρός, η πολύ ακριβής προειδοποίηση να μην έχει καμιά αξία. Έτσι, πρακτικά πρέπει να γίνει αντιστάθμιση των παραγόντων «υψηλή ακρίβεια πρόγνωσης /προειδοποίησης» και «έγκαιρος χρόνος προειδοποίησης». Η αντιστάθμιση αυτή για ξαφνικές πλημμύρες εκφράζεται ποσοτικά στην Εικόνα 7.4 (Wright, 2001).

	<= 4 ημέρες	12-24 ώρες	2-6 ώρες	<1 ώρα	Εκκίνηση καταιγίδας	0-6 ώρες	10-30 min
Μεγάλος	Μετεωρολογική Πρόγνωση	Πρόγνωση	Πρόγνωση Σημαντικού Καιρού	Μέτρηση βροχόπτωσης με ραντάρ	Μέτρηση βροχόπτωσης και στάθμης επιφάνειας	Υπολογισμοί ΜΠΠ	Μέτρηση στάθμης επιφάνειας
Μικρός							
	10	20	25	40	50	60	90
Ακρίβεια προειδοποίησης (%)							

Εικόνα 7.4: Σχέση ακρίβειας προειδοποίησης - διαθέσιμου χρόνου αντίδρασης για ξαφνικές πλημμύρες

7.2.6 Σύνταξη κειμένου μηνυμάτων προειδοποίησης

Η σύνταξη των κειμένων των μηνυμάτων προειδοποίησης δεν μπορεί να πραγματοποιείται από το προσωπικό του ΚΠΠ (βλ. κεφάλαιο 6) και γενικότερα από τους φορείς διαχείρισης έκτακτης ανάγκης, οι οποίοι είναι συνήθως υπεύθυνοι για την προειδοποίηση για επικείμενη πλημμύρα, αλλά απαιτεί δεξιότητες επικοινωνίας που διαθέτουν εξειδικευμένοι επιστήμονες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές πηγές με οδηγίες και παραδείγματα από πετυχημένες εφαρμογές σχεδιασμού μηνυμάτων, βλ. AIDR (2009) και NOAA (2010).

Τα κείμενα των μηνυμάτων προειδοποίησης συντάσσονται έτσι ώστε να απαντούν στις ερωτήσεις «τι;», «πού;», «πότε;», «γιατί;» και «πώς να αντιδράσω;», να ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά εκείνων που κινδυνεύουν και να είναι σε γλώσσα οικεία σε όσους αναμένεται να πραγματοποιήσουν τις κατάλληλες ενέργειες. Αναλυτικότερα, τα μηνύματα προειδοποίησης πρέπει:

- ▶ να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες και συμβουλές,
- ▶ να πείθουν όσους κινδυνεύουν για να ανταποκριθούν στο διαθέσιμο χρόνο, και
- ▶ να παρουσιάζουν τη σημασία της πλημμύρας που προηγνώσκεται περιγράφοντας συνοπτικά τις πιθανές συνέπειές της, και
- ▶ να υποδεικνύουν τις κατάλληλες ενέργειες που πρέπει να κάνουν όσοι κινδυνεύουν.

Τα μηνύματα προειδοποίησης πρέπει να περιέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της πλημμύρας που υπολογίζονται από τα ΜΠΠ (βλ. κεφάλαιο 4), όπως οι ακόλουθες:

- ▶ πότε θα ξεκινήσει η πλημμύρα, όπως π.χ. κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας,
- ▶ πότε θα παρατηρηθούν συγκεκριμένα βάθη ροής των νερών της πλημμύρας,
- ▶ πότε θα σταματήσει η πλημμύρα,
- ▶ πού θα πάνε τα νερά της πλημμύρας, δηλ. ποιες είναι οι περιοχές κατάκλισης, και
- ▶ πόσο μεγάλα θα είναι τα βάθη και οι ταχύτητες ροής των νερών της πλημμύρας.

Γενικά, τα μηνύματα προειδοποίησης πρέπει να διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά (NOAA, 2010):

- ▶ να πείθουν τους ανθρώπους να δράσουν παρουσιάζοντας πληροφορίες ή δεδομένα, αλλά και να προκαλούν συναισθήματα που τους παρακινούν,
- ▶ να είναι κατανοητά,
- ▶ να έχουν θετικό τόνο, δηλ. να παρακινούν τους ανθρώπους να κάνουν μια ενέργεια και όχι να μην την κάνουν,
- ▶ να παρακινούν σε δράση και όχι σε αδράνεια,
- ▶ να εκφράζουν κοινωνικότητα και όχι ατομικότητα (απομόνωση),
- ▶ να είναι «ζωντανά» προκαλώντας συναισθήματα που συνδέονται με την κατάσταση που βρίσκονται οι άνθρωποι,
- ▶ να μην προκαλούν καμιά σύγχυση,
- ▶ να παρουσιάζουν τη σημασία της πλημμύρας περιγράφοντας συνοπτικά τις πιθανές συνέπειές της, και

- ▶ να υποδεικνύουν τις κατάλληλες ενέργειες που πρέπει να κάνουν όσοι κινδυνεύουν.

Δυο παραδείγματα κειμένων μηνύματος για μικρή και μεγάλη πλημμύρα που μπορεί να συντάσσονται από την ΕΜΥ φαίνονται στους Πίνακες 7.3 και 7.4, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.3

Παράδειγμα κειμένου μηνύματος για μικρή πλημμύρα
<p>Ειδοποίηση για μικρή πλημμύρα στην [τοποθεσία] και στις γειτονικές περιοχές</p> <p>Η ΕΜΥ έχει προγνώσει ότι οι πλημμύρες θα φτάσουν/ξεπεράσουν [διαγράφεται ένα] τα μέτρα στη θέση μέτρησης, στις [ημερομηνία] και ώρα Αυτό θα προκαλέσει μικρές πλημμύρες κατά μήκος του ποταμού</p> <p>Σε αυτό το ύψος νερού, περιοχές με χαμηλό υψόμετρο κοντά στον ποταμό θα πλημμυρίσουν από περίπου το μέχρι το και κατά μήκος των ρεμάτων.....</p> <p>Οι πιθανές συνέπειες της πλημμύρας είναι οι ακόλουθες:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις κοντά στο ποταμό θα πλημμυρίσουν. Οι αγρότες πρέπει να λάβουν τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία των αντλιών και του άηλου εξοπλισμού και να μετακινήσουν τα ζώα. • Οι επιφάνειες των δρόμων μπορεί να υποστούν ζημιά και οι άνθρωποι πρέπει να αποφεύγουν να οδηγούν στις πλημμυρισμένες περιοχές. Το να μπαίνεις στα νερά της πλημμύρας είναι η πιο συνηθισμένη αιτία θανάτου κατά τη διάρκεια πλημμυρών. • Τα νερά μπορεί να πλημμυρίσουν τις αυλές και τις υπόγειες περιοχές στις κοινότητεςκαι στο Οι κάτοικοι πρέπει να ασφαλίζουν τα αντικείμενα σε γκαράζ και σε εξωτερικούς χώρους για να μην τα παρασύρουν τα νερά της πλημμύρας. <p>Εδώ μπορούν να περιγραφονται συνοπτικά οι γνωστές τρέχουσες επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένου του κλεισίματος δρόμων. Πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να μην αναφέρονται επιπτώσεις της πλημμύρας που έχουν ήδη συμβεί.</p>

Πίνακας 7.4

Παράδειγμα κειμένου μηνύματος για μεγάλη πλημμύρα
<p>Προειδοποίηση για μεγάλες πλημμύρες στην [τοποθεσία] και σε κοντινές περιοχές.</p> <p>Η ΕΜΥ έχει προγνώσει ότι οι πλημμύρες θα φτάσουν/ξεπεράσουν [διαγράφεται ένα] τα μέτρα στη θέση μέτρησης, στις [ημερομηνία] και ώρα Αυτό θα προκαλέσει μεγάλες πλημμύρες.</p> <p>Σε αυτό το ύψος νερού, μεγάλες εκτάσεις της κοιλάδας του ποταμού θα πλημμυρίσουν από τα άνω του μέχρι το Πολλοί δρόμοι θα κλείσουν, μεγάλες εκτάσεις καλλιεργήσιμων εκτάσεων θα κατακλιστούν από την πλημμύρα και περιοχές με χαμηλό υψόμετρο του θα πλημμυρίσουν, καθώς τα νερά της πλημμύρας θα εισέρχονται στο [κοινότητα 1], [κοινότητα 2] και το[κοινότητα 3].</p> <p>Είναι πιθανό, αυτή η πλημμύρα να είναι η πιο σοβαρή που σημειώθηκε στην περιοχή από τον [μήνας] του [έτος], όταν τα νερά της πλημμύρας στη θέση μέτρησης φτάσανε τα μέτρα, που σήμερα είναι μέτρα.</p>

Είναι κρίσιμο να κατανοήσουμε τον πιθανό κίνδυνο αυτής της πλημμύρας. Σπίτια και δρόμοι σε χαμηλά σημεία του κέντρου της περιοχής [κοινότητα 1] (η πλημμύρα πάνω από το έδαφος ξεκινά σταμέτρα), στο[κοινότητα 2] (η πλημμύρα πάνω από το δάπεδο ξεκινά σταμέτρα) και στο [κοινότητα 3] (η πλημμύρα πάνω από το δάπεδο ξεκινά στα μέτρα) θα πλημμυρίσουν, και τα νερά θα μπουκώσουν σε σπίτια και καταστήματα.

Οι άνθρωποι στο[κοινότητα 1], στο[κοινότητα 2] και στο[κοινότητα 3] [διαγράφονται κατά περίπτωση] καλούνται να προετοιμαστούν το συντομότερο δυνατό για την εκκένωση. Θα πρέπει:

- να απομακρύνουν από το έδαφος όσο το δυνατόν περισσότερα οικιακά και επαγγελματικά αντικείμενα και να τα τοποθετήσουν σε κρεβάτια, παγκάκια και τραπέζια, και
- να συγκεντρώσουν τιμαλφή και προσωπικά αντικείμενα, όπως οικογενειακά αναμνηστικά, άλμπουμ φωτογραφιών, κειμήλια και σημαντικά χαρτιά. Αυτά πρέπει να τα πάρουν στο αυτοκίνητό τους μαζί με ανταλλακτικά ρούχα και βασικά φάρμακα ή να τα τοποθετήσουν σε βαλίτσα, εάν αυτά χρειάζονται μεταφορά.

Συμβουλές για την εκκένωση θα ακολουθήσουν στο επόμενο δελτίο στα επόμενα 15 λεπτά.

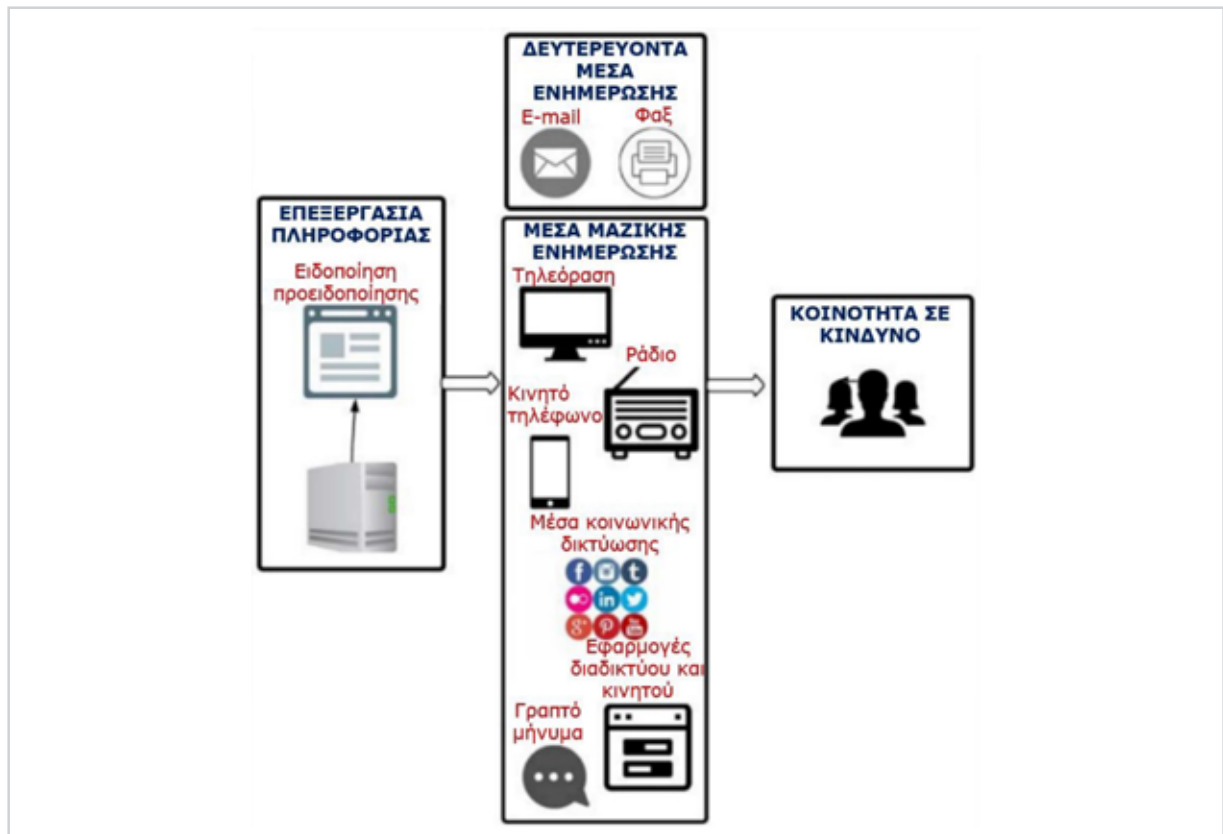
Στο NOAA (2010) περιλαμβάνονται παραδείγματα μηνυμάτων ειδοποίησης, επιφυλακής, προειδοποίησης και ανακοίνωσης (βλ. 7.2.2) για ξαφνικές πλημμύρες που έχουν διαπιστωθεί ότι είναι αποτελεσματικά στις ΗΠΑ. Αυτά μπορεί να αξιοποιηθούν από τις αρμόδιες υπηρεσίες, όπως π.χ. την EMY. Στα υποδείγματα αυτά περιέχονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της προειδοποίησης:

- ▶ Σύνδεση της προειδοποίησης με την αποστολή της EMY.
- ▶ Κριτήρια έκδοσης της προειδοποίησης.
- ▶ Χρόνος έκδοσης της προειδοποίησης.
- ▶ Χρόνος ισχύος της προειδοποίησης.
- ▶ Χρόνος λήξης της προειδοποίησης.
- ▶ Περιεχόμενο της προειδοποίησης.

7.3 Μετάδοση μηνυμάτων προειδοποίησης

Η μετάδοση των μηνυμάτων προειδοποίησης πρέπει να γίνεται με τον κατάλληλο τρόπο. Ο όρος «τρόπος» αναφέρεται στη «διαδρομή» της επικοινωνίας που περιλαμβάνει:

- ▶ τη μορφή του μηνύματος προειδοποίησης, όπως π.χ. γραπτή, γραφική ή ηχητική, και τα μέσα ενημέρωσης που χρησιμοποιούνται. Αυτά φαίνονται στην Εικόνα 7.5 και μπορεί να περιλαμβάνουν μέχρι και αγγελιοφόρους για ορισμένες απομακρυσμένες τοποθεσίες,
- ▶ το συντονισμό, και
- ▶ την ανταλλαγή πληροφοριών.



Εικόνα 7.5: Μέσα μετάδοσης μηνυμάτων προειδοποίησης για πλημμύρες (Πηγή: Acosta-Coll et al., 2018)

Τα μηνύματα προειδοποίησης που μεταδίδονται στα μέλη της κοινότητας μπορούν να ταξινομηθούν ως «γενικά» ή «ειδικά», ανάλογα με τους παραλήπτες τους.

- ▶ **Γενικά μηνύματα.** Αφορούν ολόκληρες κοινότητες ή περιοχές, και μεταδίδονται με το ραδιόφωνο, την τηλεόραση, τα δελητία ειδήσεων, το διαδίκτυο (ιστοσελίδες), τους πίνακες ανακοίνωσης, και τις (τοπικές) εφημερίδες.
- ▶ **Ειδικά μηνύματα.** Αφορούν άτομα ή ομάδες κοινοτήτων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή που διατρέχουν διαφορετικούς κινδύνους, και μεταδίδονται με τηλέφωνο, fax, email, σειρήνες, και με χτύπημα στις πόρτες.

Επίσης, πρέπει να προσδιορίζονται η αλυσίδα διάδοσης και οι ευθύνες των ενδιαφερόμενων μερών στο εθνικό σχέδιο αντιμετώπισης των κινδύνων πλημμύρας (WMO, 2010). Επιπλέον, πρέπει να χρησιμοποιούνται πολλαπλοί δίαυλοι επικοινωνίας για να εξασφαλίζεται η ελάχιστη καθυστέρηση στην παράδοση του μηνύματος στους τελικούς χρήστες και η μετάδοση πρέπει να γίνεται από πολλαπλές αξιόπιστες πηγές (UNISDR, 2010).

7.4 Λήψη, κατανόηση και αποδοχή των μηνυμάτων προειδοποίησης για την πραγματοποίηση των ορθών αντιδράσεων

7.4.1 Γενικά

Τα μηνύματα προειδοποίησης είναι αποτελεσματικά όταν ενημερώνουν τα άτομα που διατρέχουν κίνδυνο από πλημμύρα να λαμβάνουν και να ερμηνεύουν σωστά τα μηνύματα προειδοποίησης (Plate,

2007), ώστε να παρακινούνται να πραγματοποιήσουν τις απαιτούμενες ενέργειες και να λάβουν τα απαιτούμενα μέτρα (Morss et al., 2016· WMO, 2015).

Για να προσεγγίσουν τα μηνύματα προειδοποίησης το κοινό-στόχο στο επιθυμητό εύρος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μετάδοσή τους τα παραδοσιακά μέσα, όπως π.χ. το ραδιόφωνο και η τηλεόραση, αλλά και τα ψηφιακά κανάλια επικοινωνίας, όπως π.χ. οι ιστοσελίδες και τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης (Feldman et al., 2016· Lam et al., 2017· Liu et al., 2017).

7.4.2 Λόγοι αστοχίας μηνυμάτων

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι προειδοποιήσεις για πλημμύρες συχνά αποτυγχάνουν να ληφθούν, να κατανοηθούν ή να προκαλέσουν τις απαιτούμενες αντιδράσεις από τους ενδιαφερόμενους (O'Sullivan et al., 2012· Rollason et al., 2018· Sukhwani et al., 2019· Zhu et al., 2010). Πολλοί θάνατοι έχουν καταγραφεί σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς άτομα προσπαθούσαν να οδηγήσουν ή να περπατήσουν στα υδατορέματα χωρίς να γνωρίζουν ή να εκτιμούν σωστά τον κίνδυνο (Cools et al., 2016).

Σύμφωνα με τον WMO (2011), οι λόγοι αποτυχίας των μηνυμάτων προειδοποίησης ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες (1) όταν το μήνυμα δεν γίνεται κατανοητό, και (2) όταν το μήνυμα είναι κατανοητό, αλλά έχει περιορισμένη αξία.

Το μήνυμα μπορεί να μην είναι κατανοητό όταν οι ενδιαφερόμενοι:

- ▶ έχουν διαφορετικές προτεραιότητες και επίπεδα κατανόησης των μηνυμάτων προειδοποίησης ή δεν γνωρίζουν τη γλώσσα σύνταξής τους,
- ▶ δεν λαμβάνουν τις προειδοποιήσεις, ακόμη και όταν το σύστημα φαίνεται να λειτουργεί άψογα, και
- ▶ λαμβάνουν προειδοποιήσεις από άτυπα δίκτυα προσωπικής προειδοποίησης που μπορεί να ενισχύσουν, αλλά μπορεί επίσης να υπονομεύσουν τις επίσημες προειδοποιήσεις.

Όταν το μήνυμα προειδοποίησης είναι κατανοητό, μπορεί να έχει περιορισμένη αξία, γιατί οι ενδιαφερόμενοι:

- ▶ δεν αποφεύγουν τον κίνδυνο πλημμύρας και τον αγνοούν ή τον αντιμετωπίζουν ως πρόκληση,
- ▶ κρίνουν ότι έχουν άλλες προτεραιότητες που τους παρεμποδίζουν να ανταποκριθούν άμεσα,
- ▶ είναι απρόθυμοι να εγκαταλείψουν την περιουσία, τα υπάρχοντά τους και τα ζώα τους, από φόβο ληηλασιών και βανδαλισμών,
- ▶ αναζητώντας επιβεβαίωση του συμβάντος πλημμύρας πριν ενεργήσουν, επηρεάζονται από άλλους εξωγενείς παράγοντες, όπως τις ενέργειες των γειτόνων τους ή τον τρέχοντα καιρό, που έρχονται σε αντίθεση με την επίσημη προειδοποίηση,
- ▶ απεχθάνονται «να υπακούουν την εξουσία» και δεν διατίθενται να ακολουθήσουν εντολές, αγνοούν τις επίσημες προειδοποιήσεις και παίρνουν τις δικές τους αποφάσεις με βάση τις πληροφορίες που έχουν μπροστά τους,
- ▶ δεν μπορούν να ανταποκριθούν, π.χ. γιατί δεν έχουν τη σωματική ή πνευματική ικανότητα, ή
- ▶ δεν ανησυχούν για τις πλημμύρες μέχρι να υποστούν πραγματικά μια απώλεια.

Οι κοινές αιτίες των περιπτώσεων που οι αντιδράσεις του κοινού στις προειδοποιήσεις για πλημμύρες είναι ανεπαρκείς (Hagemeyer-Klose & Wagner, 2009· Morss et al., 2016· Shreve et al., 2016) είναι:

- ▶ η χαμηλή αντίληψη κινδύνου από το άτομο, και
- ▶ η έλλειψη ικανότητας από το άτομο.

Κοντολογίς, οι άνθρωποι υποτιμούν τον κίνδυνο που ενέχουν οι πλημμύρες και/ή θεωρούν ότι δεν είναι εξοπλισμένοι ή αρκετά ικανοί για να αντιμετωπίσουν αυτόν τον κίνδυνο. Για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω αιτίες, θα πρέπει τα μηνύματα προειδοποίησης να συντάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε:

- ▶ να ενισχύουν την ατομική αντίληψη του κινδύνου πλημμύρας αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα οι αποδέκτες να ακολουθήσουν τις προτεινόμενες ενέργειες για να προστατευτούν (Keller et al., 2006· Potter et al., 2018), και
- ▶ να περιέχουν όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για την ανάληψη επαρκών μέτρων (Khalid & Shafiai, 2015· Lindell et al., 2017· Rollason et al., 2018).

7.4.3 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των ατόμων που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους σε περίπτωση πλημμύρας

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, δεν είναι αρκετό να γίνονται έγκαιρα οι προειδοποιήσεις, αλλά πρέπει αυτές να είναι συμβατές με την αντίληψη της τοπικής κοινότητας για τις πλημμύρες και με τους παράγοντες που επηρεάζουν τις αντιδράσεις των μελών της που λαμβάνουν την προειδοποίηση.

Η απόκριση ενός ατόμου σε μια προειδοποίηση για πλημμύρα διαμορφώνεται από προσωπικά χαρακτηριστικά του, όπως π.χ. είναι η ηλικία του, η γνώση του κινδύνου, η εμπιστοσύνη στις αρχές, αλλά και περιστασιακούς παράγοντες, όπως π.χ. είναι η προσωπική εμπειρία για τις πλημμύρες, η τοποθεσία που είναι εγκατεστημένο, τα οποία επηρεάζουν την αντίληψη του προσωπικού κινδύνου (Kellens et al., 2013· Lechowska, 2018· Wachinger et al., 2013).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της τοπικής κοινωνίας προσδιορίζονται συνήθως μέσω έρευνας με τη χρήση ερωτηματολογίων. Τα ερωτηματολόγια αυτά πρέπει να συνδυάζονται με άλλες δράσεις, όπως εκπαιδευτικά προγράμματα σε τοπικό επίπεδο, π.χ. σε σχολεία, δημοσιεύσεις και βίντεο, μηνύματα στο ραδιόφωνο και την τηλεόραση, π.χ. σχετικά με τις ενέργειες που πρέπει να λάβει κάποιος σε περίπτωση προειδοποίησης για πλημμύρες, για τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας των προειδοποιήσεων και των δράσεων ετοιμότητας (Καραμούστου & Στάμου, 2019).

Στην Ελλάδα η πρώτη σχετική εργασία για τις αντιλήψεις του τοπικού πληθυσμού σε περίπτωση πλημμυρών πραγματοποιήθηκε σε προκαταρκτικό επίπεδο τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2018 στη Μάνδρα με χρήση ερωτηματολογίου, το οποίο συμπληρωνόταν με συνέντευξη (Καραμούστου και Στάμου, 2019). Το ερωτηματολόγιο διαμορφώθηκε με βάση τη διεθνή εμπειρία, ώστε να είναι κατανοητό και ενδιαφέρον και να πείθει τους ερωτώμενους να το συμπληρώσουν. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με τα ακόλουθα τέσσερα βήματα:

- ▶ **Βήμα 1. Δοκιμαστική χρήση και οριστικοποίηση του ερωτηματολογίου.** Χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά το ερωτηματολόγιο σε 10 άτομα διαφορετικών ηλικιών για να εξεταστεί εάν αυτό είναι κατάλληλο για τους ερευνητικούς σκοπούς, οι ερωτήσεις είναι κατανοητές και ο χρόνος συνέντευξης είναι αποδεκτός (Antronico et al., 2017). Με βάση τις παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στο ερωτηματολόγιο. Το ερωτηματολόγιο που τελικά διαμορφώθηκε είχε 29 ερωτήσεις, κυρίως κλειστού τύπου, πίνακα ή κλίμακας Likert του τύπου ναι/όχι/δεν γνωρίζω, κλίμακα πέντε επιλογών και πολλαπλών επιλογών, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σε έξι ενότητες.

- ▶ **Βήμα 2. Δειγματοληψία.** Εφαρμόστηκε η ευρέως χρησιμοποιούμενη και απλή μέθοδος της τυχαίας δειγματοληψίας για να επιλεγεί το δείγμα των ερωτώμενων. Παρόλο που όλες οι περιοχές επιλέχθηκαν ως τμήματα της πόλης που επηρεάστηκαν από την πλημμύρα του 2017 και κινδυνεύουν να πλημμυρίσουν ξανά, τα ερωτηματολόγια διανεμήθηκαν και σε άτομα που δεν είχαν πληγεί άμεσα από την πλημμύρα.
- ▶ **Βήμα 3. Διανομή και συνεντεύξεις.** Πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις που διήρκεσαν 20 λεπτά κατά μέσο όρο η καθεμιά. Πριν τη συνέντευξη, κάθε συμμετέχων έλαβε ένα έντυπο, το οποίο εξηγούσε τους επιστημονικούς σκοπούς του ερωτηματολογίου και διαβεβαίωνε ότι κανένας από τους ερωτηθέντες δεν θα μπορούσε να αναγνωρισθεί με τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων. Οι περισσότεροι από τους ερωτηθέντες, αν και στην αρχή εκδήλωσαν κάποια δυσπιστία για τον ερευνητή, ήταν περισσότερο πρόθυμοι στη συνέχεια και συνεργάστηκαν στη συμπλήρωση του ερωτηματολογίου. Μερικοί ήταν πρόθυμοι από την αρχή.
- ▶ **Βήμα 4. Συλλογή και επεξεργασία ερωτηματολογίων.** Δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με τις ερωτήσεις και απαντήσεις, τα οποία υπέστησαν επεξεργασία στην πλατφόρμα SPSS (2022) για τη στατιστική τους ανάλυση.

Διανεμήθηκαν 200 ερωτηματολόγια, 82 από τα οποία (ποσοστό=41%) συμπληρώθηκαν. Οι αριθμοί αυτοί θεωρούνται ως ικανοποιητικοί για τους σκοπούς αυτής μιας προκαταρκτικής εργασίας. Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας συνοψίζονται στο υποκεφάλαιο 8.7. Περισσότερα στοιχεία μπορεί να βρεθούν στις εργασίες των Καραμούστου & Στάμου (2019) και Καραμούστου (2018).

7.4.4 Ενίσχυση της εμπιστοσύνης του κοινού στις προειδοποιήσεις

Το μήνυμα προειδοποίησης από μόνο του δεν εξασφαλίζει την άμεση ανταπόκριση των ατόμων που το λαμβάνουν, τα οποία θα αξιολογήσουν πρώτα τη δική τους προσωπική αίσθηση κινδύνου και θα αναζητήσουν μια δευτερεύουσα πηγή επιβεβαίωσης. Οι πρόσθετες πληροφορίες που απαιτούνται πριν αναλάβουν δράση εξαρτώνται από το περιεχόμενο και τη σαφήνεια του αρχικού μηνύματος προειδοποίησης και την αξιοπιστία του φορέα που την εκδίδει.

Καταρχήν, είναι απαραίτητο τα άτομα αυτά να σεβαστούν το μήνυμα για να αντιδράσουν άμεσα και αποτελεσματικά. Για αυτό θα πρέπει να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη τους στις προειδοποιήσεις με τα ακόλουθα μέτρα (WMO, 2010):

- ▶ τα μηνύματα προειδοποίησης να ενημερώνονται συχνά πριν από ένα συγκεκριμένο συμβάν πλημμύρας·
- ▶ τα μηνύματα προειδοποίησης να εκδίδονται από φορείς ή προσωπικότητες στους οποίους υπάρχει εμπιστοσύνη·
- ▶ να επισημαίνεται η διαφορά μεταξύ των προγνώσεων και των προειδοποιήσεων·
- ▶ να ελαχιστοποιούνται οι λανθασμένες προειδοποιήσεις των ΣΕΠΠ και να κοινοποιούνται οι βελτιώσεις της απόδοσής τους, όπως π.χ. η μείωση του αριθμού λανθασμένων προειδοποιήσεων·
- ▶ τα μηνύματα προειδοποίησης να εκδίδονται από πολλές αξιόπιστες πηγές·
- ▶ τα μηνύματα προειδοποίησης να είναι συνεπή με τα γεγονότα που θα συμβούν με την πάροδο του χρόνου· και,
- ▶ τα μηνύματα προειδοποίησης να είναι επιστημονικά τεκμηριωμένα.

7.5 Τα σφάλματα και η αβεβαιότητα των προειδοποιήσεων

Τα σφάλματα των προειδοποιήσεων μπορεί να ταξινομηθούν στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- ▶ Εκδίδεται η προειδοποίηση, αλλά ο κίνδυνος πλημμύρας δεν υλοποιείται.
- ▶ Δεν εκδίδεται προειδοποίηση, αλλά υλοποιείται ο κίνδυνος πλημμύρας και η επακόλουθη καταστροφή.

Στην πρώτη περίπτωση δεν περιλαμβάνεται η κατάσταση όπου ο κίνδυνος υλοποιείται χωρίς όμως να ακολουθήσει καταστροφή, όπως π.χ. η προειδοποίηση για πλημμύρα στην Ολλανδία τον Ιανουάριο του 1995 που οδήγησε σε μαζική εκκένωση. Δεν υπήρξε καταστροφή, επειδή τα αναχώματα άντεξαν στη ορμή της πλημμύρας. Η προειδοποίηση και η εκκένωση δικαιολογήθηκαν και εκλήφθηκαν από τον πληθυσμό ως η σωστή απόφαση, καθόσον ο κίνδυνος αστοχίας του αναχώματος ήταν μεγάλος. Ομοίως, κατά τη διάρκεια της πλημμύρας του καλοκαιριού του 1997 στο Odra της Πολωνίας, η πόλη Stubice εκκενώθηκε εξαιτίας του υψηλού κινδύνου πλημμύρας. Πραγματοποιήθηκαν έγκαιρα οι απαιτούμενες ενέργειες ενίσχυσης των αναχωμάτων και συνέβησαν θραύσεις αναχωμάτων ανάντη στη Γερμανία που εκτόνωσαν την πλημμύρα με αποτέλεσμα να μην πλημμυρίσει το Stubice.

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι υπεύθυνοι φορείς διστάζουν να εκδώσουν προειδοποιήσεις εξαιτίας του φόβου λήθους, ειδικά όταν τα ΣΕΠΠ μόλις αναπτύσσονται ή όταν υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με την εμφάνιση και τον κίνδυνο μιας επερχόμενης πλημμύρας (Nigg, 1995). Από την άλλη πλευρά, όμως, η καθυστέρηση της έκδοσης προειδοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές απώλειες. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ακόμα και σε αυτές με μεγάλη αβεβαιότητα, οι υπεύθυνοι φορείς επιλέγουν να εκδώσουν προειδοποίηση, εξαιτίας του κινδύνου μεγάλων απωλειών ζωής και περιουσίας αν αυτή δεν είχε εκδοθεί και είχε συμβεί η πλημμύρα.

Η αβεβαιότητα των προειδοποιήσεων εξαρτάται από τα ενδεχόμενα σφάλματα στη διαδικασία πρόγνωσης (με τα ΜΠΠ και τα ΔΠ) στις τέσσερις φάσεις εξέλιξης μιας πλημμύρας (βλ. υποκεφάλαιο 1.1.2). Τα σφάλματα αυτά μπορεί να είναι σημαντικά και γενικά να οδηγούν στην αύξηση της αβεβαιότητας της προειδοποίησης, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 7.2.3. Η ύπαρξη αβεβαιότητας στην προειδοποίηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη δόμηση και τη μετάδοση των μηνυμάτων προειδοποίησης.

Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- ▶ Για να περιγραφούν οι πιθανές επιπτώσεις μιας πλημμύρας, μπορεί να χρησιμοποιούνται λέξεις στο κείμενο των προειδοποιήσεων, όπως «μπορεί», «πιθανώς» και «πιθανόν». Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι παραπάνω λέξεις, αντί να μην αναφέρονται οι πιθανές επιπτώσεις, επειδή αυτοί που διατυπώνουν το μήνυμα προειδοποίησης δεν είναι απολύτως σίγουροι για το τι θα συμβεί.
- ▶ Παρά την ύπαρξη αβεβαιότητας, μια προειδοποίηση πρέπει να περιέχει ένα μήνυμα για τις ενέργειες που πρέπει να είναι έτοιμοι να κάνουν οι άνθρωποι. Αυτό είναι προτιμότερο από την παροχή συμβουλών μόνο σε μεταγενέστερη προειδοποίηση, όταν η αβεβαιότητα έχει εξαφανιστεί. Η αναμονή πριν από την παροχή οποιασδήποτε συμβουλής είναι πιθανό να ενθαρρύνει ενέργειες που είναι πολύ αργά για να είναι αποτελεσματικές.
- ▶ Μια συνέπεια της αβεβαιότητας που συνδέεται με την ανάγκη της έγκαιρης προειδοποίησης είναι ότι τα μηνύματα, σε ορισμένες περιπτώσεις αποδεικνύονται ότι ήταν ανακριβή στις πληροφορίες

που δίνουν και στις συνιστώμενες ενέργειες. Ενδέχεται να εκδίδονται «ψευδείς συναγερμοί», δηλ. προειδοποιήσεις για πλημμύρες που δεν συμβαίνουν ή που δεν φθάνουν τα βάθη ροής που υπολογίζουν τα ΜΠΠ. Οι αρμόδιες υπηρεσίες δεν πρέπει να μεγαλοποιούν τις συνέπειες των συναγερμών αυτών, παρά τα προβλήματα που ενδεχομένως δημιουργούνται. Αντίθετα, θα πρέπει να αναγνωρίζεται ότι το κόστος των άστοχων προειδοποιήσεων είναι συνήθως περιορισμένο και ότι θα αντισταθμιστεί σε μεγάλο βαθμό από τα οφέλη που θα προκύψουν όταν συμβεί πλημμύρα. Παράλληλα, η εφαρμογή της παροιμίας με «το βοσκό και το λύκο» μπορεί να αξιοποιηθεί για την ευαισθητοποίηση των πολιτών σχετικά με τις πλημμύρες και για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των προειδοποιήσεων. Σε κάθε περίπτωση, όταν συμβαίνει μια άστοχη προειδοποίηση, θα πρέπει να εξηγείται ο λόγος όσο το δυνατόν γρηγορότερα στην κοινότητα μέσω των μέσων ενημέρωσης, σε ειδικές δημόσιες συναντήσεις και συζητήσεις με συγκεκριμένες ομάδες. Έτσι, διασφαλίζεται η διατήρηση της αξιοπιστίας του ΣΕΠΠ και μεγιστοποιείται η ευκαιρία να μετατραπεί ένα αρνητικό γεγονός σε θετικό.

7.6 Ικανότητα απόκρισης

7.6.1 Γενικά

Η ικανότητα μιας κοινότητας να αντιδρά στα μηνύματα προειδοποίησης για μια πλημμύρα σύμφωνα με τις οδηγίες, άμεσα και αποτελεσματικά, αλληλά και σε μια επερχόμενη πλημμύρα, έχει τεράστια σημασία στην επιτυχία ενός ΣΕΠΠ. Για το λόγο αυτό πρέπει συνεχώς να ενισχύεται.

Η ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται κυρίως με τα ακόλουθα:

- ▶ την κατάλληλη δόμηση και μετάδοση των μηνυμάτων προειδοποίησης (βλ. 7.2 και 7.3),
- ▶ την εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του κοινού, ειδικότερα σε τοπικό επίπεδο, και
- ▶ την ύπαρξη κατάλληλου σχεδίου έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες.

7.6.2 Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του κοινού

Είναι γενικά αποδεκτό ότι είναι περισσότερο πιθανό οι άνθρωποι να ενεργούν σύμφωνα με τις προειδοποιήσεις για πλημμύρα και τις μετεωρολογικές προγνώσεις, όταν γνωρίζουν και είναι ενημερωμένοι για τις πλημμύρες και τις συνέπειές της. Η γνώση αυτή, η οποία ενισχύει την ετοιμότητα της κοινότητας να ανταποκριθεί στον κίνδυνο πλημμύρας, μπορεί να αποκτηθεί μέσω της εκπαίδευσης της κοινότητας.

Με την εκπαίδευση αυτή, οι άνθρωποι εξοικειώνονται με τον κίνδυνο της πλημμύρας, τα ΣΕΠΠ, τα κανάλια διάδοσης και το νόημα των προειδοποιήσεων και των ενεργειών που πρέπει να πραγματοποιήσουν για τη μείωση των απωλειών και των ζημιών, πολύ πριν αναπτυχθούν οι επικίνδυνες συνθήκες.

Στην Εικόνα 7.6 φαίνονται μερικές συμβουλές ασφαλείας για τις πλημμύρες (HSSE, 2023).

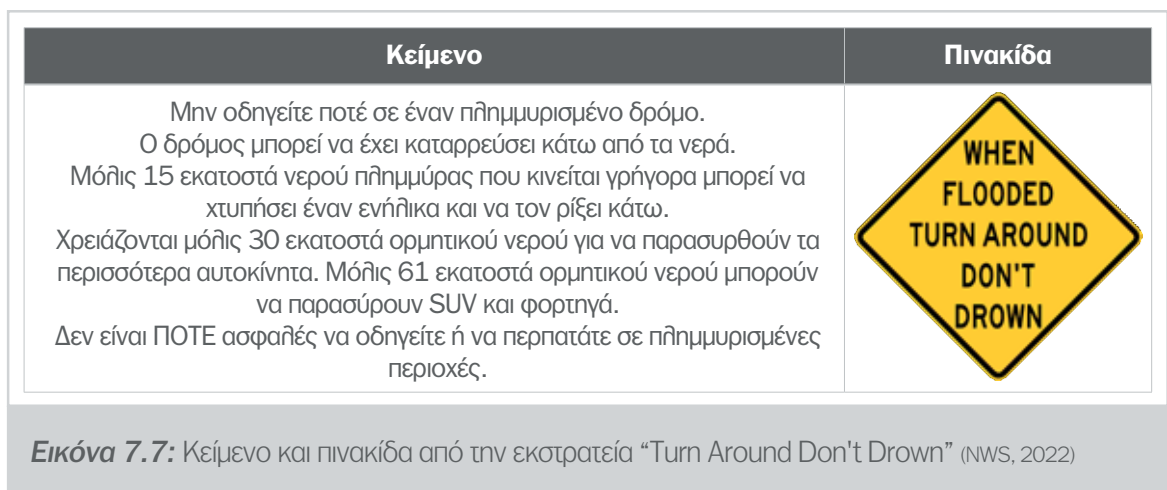


Εικόνα 7.6: Συμβουλές ασφαλείας για τις πλημμύρες (πηγή: HSSE, 2023)

Η εκπαίδευση του κοινού για τη συνειδητοποίηση των φυσικών κινδύνων πρέπει πρωτίστως να καλύπτεται στα σχολικά προγράμματα. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιούνται τα μέσα μαζικής ενημέρωσης και το διαδίκτυο, αλλά και ειδικές εκστρατείες δημοσιότητας και εκπαίδευσης για ομάδες κοινοτήτων.

Γενικά, η εκπαίδευση του κοινού μπορεί να γίνεται με τα ακόλουθα μέσα (FEMA, 2005):

- ▶ Με φυλλάδια που περιέχουν πληροφορίες για τις πλημμύρες. Αυτά μπορεί να ταχυδρομούνται στις ιδιοκτησίες που βρίσκονται σε περιοχές ευάλωτες σε πλημμύρες, να εκτίθενται σε δημόσιους χώρους, να περικλείονται σε λογαριασμούς κοινής ωφελείας ή να διανέμονται από πόρτα σε πόρτα.
- ▶ Με παρουσιάσεις που μπορεί να γίνονται από ειδικούς επιστήμονες, προσωπικό δήμων ή περιφερειών, ομάδες πολιτών ή οργανώσεις.
- ▶ Με πινακίδες που είναι αναρτημένες σε κατάλληλα σημεία της πόλης και δείχνουν το ύψος του νερού κατά τη διάρκεια προηγούμενων πλημμυρών.
- ▶ Με πακέτα πολυμέσων από τοπικούς ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς, οι οποίοι συγκεντρώνουν βασικά στοιχεία για τις πλημμύρες, πληροφορίες για μέτρα προστασίας κατά την πλημμύρα, και συνεντεύξεις τοπικών εμπειρογνομώνων.
- ▶ Με οθόνες που τοποθετούνται σε δημόσια κτίρια, οι οποίες δείχνουν χάρτες γειτονιών που πλημμύρισαν, ιστορικές πλημμύρες, και φωτογραφίες σπιτιών που έχουν υποστεί ζημιές από πλημμύρα. Αυτό μπορεί να επεκταθεί σε ένα περίπτερο για ειδικές εκδηλώσεις σε εμπορικά κέντρα, στελεχωμένο από άτομο που μπορεί να απαντήσει σε σχετικές ερωτήσεις.
- ▶ Με εκστρατείες ευαισθητοποίησης που είναι προσαρμοσμένες σε τοπικά προβλήματα πλημμυρών, όπως π.χ. η εκστρατεία “Turn Around Don't Drown” (NWS, 2022), με τον κίνδυνο οδήγησης σε πλημμυρισμένες περιοχές να είναι το κύριο μήνυμά της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.7. Μια «ημέρα καθαρισμού ρεμάτων» θα μπορούσε να δώσει έμφαση στην αναγκαιότητα καθαρών ρεμάτων. Ένας διαγωνισμός αφίσας θα μπορούσε να παρουσιάζει ενέργειες που μπορούν να κάνουν οι άνθρωποι στα σπίτια και τις αυλές τους για να τα καταστήσουν ανθεκτικότερα στις πλημμύρες.



- ▶ Με βίντεο που δημιουργούνται από την κοινότητα ή τοπικούς οργανισμούς, εξηγώντας πώς, γιατί, και πού συμβαίνουν τοπικές πλημμύρες και τι μπορεί να γίνει γι' αυτό. Τα βίντεο μπορούν να δανείζονται σε ομάδες, να προβάλλονται σε τοπικές εκπομπές καλωδιακής τηλεόρασης ή να χρησιμοποιούνται ως μέρος παρουσιάσεων από το προσωπικό της κοινότητας.
- ▶ Με κύρια άρθρα σε εφημερίδες ή ιστορίες σε τοπικά δελτία και εφημερίδες που μπορεί να τονίζουν τις τοπικές πλημμύρες και να στέλνουν μηνύματα σχετικά με το τι μπορούν να κάνουν οι άνθρωποι. Αυτά είναι συνήθως πιο αποτελεσματικά εάν εκδίδονται στην αρχή της βροχερής περιόδου.

Επιπλέον, η εκπαίδευση ειδικών ομάδων της κοινότητας, όπως των υπαλλήλων της, των εκλεγμένων πολιτικών, αλλιά και των νέων δραστήριων κατοίκων της που είναι τα παιδιά και η νεολαία, αποτελεί μια ακόμη πιο μακροπρόθεσμη προσέγγιση για τον περιορισμό/ την αποφυγή των προβλημάτων που προκαλεί μια πλημμύρα. Οι άνθρωποι που κατανοούν πλήρως τα χαρακτηριστικά της περιοχής τους και την πιθανότητα πλημμύρας και των ζημιών σε αυτή, αλληλίζουν μόνιμα τη στάση τους από απλοί παρατηρητές σε αυτούς που ξέρουν πώς να συμμετέχουν για να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα. Με την πάροδο του χρόνου, αυτή η εκπαίδευση και η αλληλαγή στάσης έχουν ως αποτέλεσμα οι κάτοικοι να είναι ικανοί και πρόθυμοι να αναλάβουν την ευθύνη για τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας. Η κοινότητα θα έχει αποκτήσει την ικανότητα να αντιμετωπίζει τον κίνδυνο πλημμύρας χωρίς να βασίζεται αποκλειστικά στην κρατική βοήθεια. Αυτό ισχύει σε πολύ μεγάλο βαθμό στις μικρότερες λεκάνες απορροής και τις τοπικές πλημμύρες που έχουν ως αποτέλεσμα καταστροφικές ζημιές.

7.6.3 Σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες

Για την αντιμετώπιση του κινδύνου πλημμύρας που διατρέχουν οι ευάλωτες κοινότητες είναι απαραίτητη η κατάρτιση ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες και αντιμετώπισης καταστροφών. Το σχέδιο αυτό πρέπει (FEMA, 2005):

- ▶ να προετοιμάζεται σε συνεργασία με τους φορείς που έχουν ευθύνες έκτακτης ανάγκης ή καλούνται να λάβουν μέτρα κατά την έκδοση προειδοποιήσεων,
- ▶ να ελέγχεται τακτικά με δοκιμές και ασκήσεις για να διαπιστωθεί η ετοιμότητα των ΣΕΠΠ και των μηχανισμών απόκρισης, και
- ▶ να βελτιώνεται συνεχώς αντιλώντας διδάγματα από την εφαρμογή του και διορθώνοντας ενδεχόμενες αδυναμίες του.

Οι προβλεπόμενες ενέργειες του σχεδίου έκτακτης ανάγκης για τις πλημμύρες πρέπει να αποτελούν μέρος του σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης που διαχειρίζεται ο υπεύθυνος φορέας. Συχνά, στα σχέδια έκτακτης ανάγκης περιέχεται ένα τμήμα ή/και ένα παράρτημα με ξεχωριστές διαδικασίες και ενέργειες για τις πλημμύρες. Σε αυτό περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Οδηγίες για το προσωπικό των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης.
- ▶ Προσδιορισμός δρόμων που πρέπει να κλείσουν πριν ξεκινήσει η πλημμύρα.
- ▶ Προσδιορισμός των διαδρομών που πρέπει να διατηρούνται χωρίς εμπόδια για την αντιμετώπιση των πλημμυρών και την πρόσβαση στα κτίρια.
- ▶ Διαδικασίες για την έξοδο των κατοίκων από τις πλημμυρισμένες ή αποκλεισμένες περιοχές.
- ▶ Προσδιορισμός των κρίσιμων υποδομών, όπως νοσοκομεία, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και παροχής ενέργειας κ.λπ. που χρήζουν προσοχής.

Επίσης, πρέπει να πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- ▶ Η κοινότητα να διεξάγει ασκήσεις πρακτικής του προγράμματος ανταπόκρισής της τουλάχιστον μια φορά το χρόνο, όταν δεν υπάρχει πλημμύρα.
- ▶ Να υπάρχει ένα συνεχές εκπαιδευτικό πρόγραμμα που διασφαλίζει ότι το τοπικό προσωπικό είναι πάντα ενήμερο για το τι πρέπει να κάνει.
- ▶ Το προσωπικό να εκπαιδεύεται για τη δοκιμή και τη συντήρηση του εξοπλισμού του ΣΕΠΠ, του ΚΠΠ κ.λπ. (βλ. κεφάλαιο 6).

7.7 Η διαδικασία προειδοποιήσεων για πλημμύρα στην Ελλάδα

Θεσμικό πλαίσιο έγκαιρης προειδοποίησης

Με βάση το πρόσφατο θεσμικό πλαίσιο (Ν.4662/2020) ως έγκαιρη προειδοποίηση νοείται «η παροχή έγκαιρης ειδοποίησης και επαρκούς πληροφόρησης, μέσω των αρμόδιων φορέων, που δίνει τη δυνατότητα δρομολόγησης συγκεκριμένων δράσεων για την αποφυγή ή τη μείωση των επιπτώσεων του κινδύνου και την προετοιμασία για αποτελεσματική αντιμετώπιση».

Στο θεσμικό πλαίσιο που περιλαμβάνει εγκυκλίους και οδηγίες, όπως π.χ. το Σχέδιο «Δάρδανος», τονίζει ότι «θεσμικά, ο επίσημος φορέας πρόγνωσης καιρικών φαινομένων, όπως έντονων βροχοπτώσεων, ισχυρών καταιγίδων κτλ., είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) (ΠΔ 161/1997, ΦΕΚ 142/Α΄/1997)».

Τονίζεται, επίσης, εντός του θεσμικού πλαισίου ότι «μετεωρολογικά προϊόντα (αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, άλλης ειδικές προγνώσεις καιρού, κλπ.) που παράγουν εκπαιδευτικά ιδρύματα και άλλα ερευνητικά κέντρα και ινστιτούτα, έχουν ερευνητικό και ενημερωτικό χαρακτήρα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεσμικά από την πολιτεία για την τεκμηρίωση κατάστασης ετοιμότητας πολιτικής προστασίας λόγω έντονων καιρικών φαινομένων, που γίνεται μόνο κατόπιν των σχετικών επίσημων προγνώσεων της ΕΜΥ».

Σύμφωνα με το πρόσφατο θεσμικό πλαίσιο, οι αρμόδιες οργανικές μονάδες των φορέων υλοποίησης έργων και δράσεων αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών λόγω πλημμυρικών φαινομένων οφείδουν να ενημερώνονται σε καθημερινή βάση για την εξέλιξη των καιρικών φαινομένων σύμφωνα με τις επίσημες προγνώσεις της ΕΜΥ, όπως αυτές παρέχονται καθημερινά από την ΕΜΥ.

Έκδοση έκτακτων δελτίων

Η ΕΜΥ εκδίδει τα καθημερινά δελτία πρόγνωσης καιρού. Επιπλέον, εκδίδει και τα ακόλουθα έκτακτα δελτία, τα οποία προσδιορίζουν χωρικά και χρονικά την εξέλιξη των καιρικών φαινομένων:

- ▶ **Έκτακτα Δελτία Επιδείνωσης Καιρού (ΕΔΕΚ).** Εκδίδονται σε περίπτωση πρόβλεψης επιδείνωσης ή μεταβολής του καιρού και έχουν ως σκοπό την ενημέρωση των αρμόδιων κρατικών φορέων και του κοινού, για τυχόν εκδήλωση ενεργειών.
- ▶ **Έκτακτα Δελτία Πρόγνωσης Επικίνδυνων Καιρικών Φαινομένων (ΕΔΠΕΚΦ).** Εκδίδονται σε περίπτωση πρόβλεψης εκδήλωσης ή αιφνίδιας εκδήλωσης ενός ή περισσότερων επικίνδυνων καιρικών φαινομένων και έχουν ως σκοπό την άμεση ενημέρωση και τη λήψη αναγκαίων μέτρων από τους αρμόδιους κρατικούς φορείς.

Τα ΕΔΕΚ και ΕΔΠΕΚΦ αποτελούν πληροφορίες με βαρύνουσα σημασία για την ετοιμότητα των φορέων. Αποστέλλονται στο Κέντρο Επιχειρήσεων της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας (ΚΕΠΠ/ΕΣΚΕ) και διαβιβάζονται με ιδιαίτερο προειδοποιητικό σήμα προς όλους τους εμπλεκόμενους φορείς, προκειμένου να τεθούν οι φορείς σε κατάσταση ετοιμότητας πολιτικής προστασίας σε εφαρμογή του άρθρ. 2 παρ.4α του Ν. 3013/2002 για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών λόγω πρόβλεψης έντονων ή επικίνδυνων καιρικών φαινομένων.

Τα επίπεδα ετοιμότητας με βάση τα ΕΔΕΚ και ΕΔΠΕΚΦ, οι συγκεκριμένες ενέργειες του κάθε επιχειρησιακά εμπλεκόμενου Φορέα σε κάθε επίπεδο, και η λήψη πρόσθετων μέτρων καθορίζονται από τον αντίστοιχο σχεδιασμό του.

Διαδικασία απόφασης έκδοσης προειδοποίησης

Μέχρι τη δημιουργία ενός ΣΕΠΠ σε εθνικό επίπεδο, εφαρμόζεται σήμερα η διαδικασία «πρόγνωσης – προειδοποίησης» που περιγράφεται στη συνέχεια. Αυτή βασίζεται (1) στις προγνώσεις μετεωρολογικών δεδομένων και (2) στις εκτιμήσεις έμπειρων ειδικών επιστημόνων.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ως μια διαρκής σύσκεψη στο Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας υπό τον Υπουργό, κατά την περίοδο επικείμενης κακοκαιρίας με ενδεχόμενη πρόκληση πλημμυρών. Στη σύσκεψη συμμετέχουν (συνήθως) οι ακόλουθοι: ο Υφυπουργός, ο Γενικός Γραμματέας Πολιτικής Προστασίας, ο Αρχηγός του Πυροσβεστικού Σώματος, ο Επιτελής του Σώματος, ο Διοικητής του Εθνικού Συντονιστικού Κέντρου Επιχειρήσεων και Διαχείρισης Κρίσεων (ΕΣΚΕΔΙΚ), ο Προϊστάμενος Κλάδου Τάξης του Αρχηγείου της Ελληνικής Αστυνομίας, ο Διευθυντής Σχεδιασμού και Αντιμέτωσης Εκτάκτων Αναγκών της Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (ΓΓΠΠ), η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) και επιστημονική ομάδα μετεωρολόγων και υδρολόγων-υδραυλικών μηχανικών.

- ▶ **Βήμα 1. Εκτίμηση της αναμενόμενης βροχόπτωσης.** Οι μετεωρολόγοι της επιστημονικής ομάδας με συντονιστή τον Διευθυντή της ΕΜΥ πραγματοποιούν εκτίμηση των αναμενόμενων υψών βροχόπτωσης με βάση τις προγνώσεις των διαθέσιμων ΜΠΚ στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Πραγματοποιείται εκτενής συζήτηση που περιλαμβάνει και την εκτίμηση της ΕΜΥ που ανακοινώνεται στο MeteoAlarm (βλ. παρακάτω).
- ▶ **Βήμα 2. Αξιολόγηση των επιπτώσεων των προγνώσεων βροχόπτωσης.** Οι υδρολόγοι-υδραυλικοί μηχανικοί με βάση τις εκτιμήσεις των μετεωρολόγων για την αναμενόμενη βροχόπτωση και την εμπειρία τους εκτιμούν το ενδεχόμενο πλημμύρας και το μέγεθος των επιπτώσεων της στις διάφορες περιοχές με εστίαση στις περιοχές με ιστορικό πλημμυρών.

Ο Υπουργός Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας λαμβάνει υπόψη του τις απόψεις του παραπάνω «έμπειρου συστήματος» και αποφασίζει σε συνεργασία με τους συμμετέχοντες τις απαιτούμενες ενέργειες με προτεραιότητα την ενεργοποίηση ή όχι του 112.

Για τη παραπάνω διαδικασία διατυπώνονται οι ακόλουθες απόψεις:

- ▶ Στο Βήμα 1 μπορεί να αξιοποιούνται και τα δεδομένα ΔΠ και οι προγνώσεις άλλων φορέων, έστω και αν αυτοί οι φορείς δεν συμμετέχουν θεσμικά στην πρόγνωση πλημμυρών. Αναφέρεται, ενδεικτικά το σύστημα METEO του ΕΑΑ (METEO, 2022).
- ▶ Το βήμα 2 βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία ειδικών επιστημόνων. Η εμπειρία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω με τη κατάρτιση τιμών Flash Flood Guidance (FFG, βλ. υποκεφάλαιο 2.5.4), έστω κατά προσέγγιση (εξαιτίας της έλλειψης ικανού αριθμού μετρήσεων) και σε μεγάλη κλίμακα, σε εθνικό επίπεδο με βάση τις υφιστάμενες μετρήσεις ΔΠ και τα λοιπά διαθέσιμα εργαλεία και πληροφορίες.

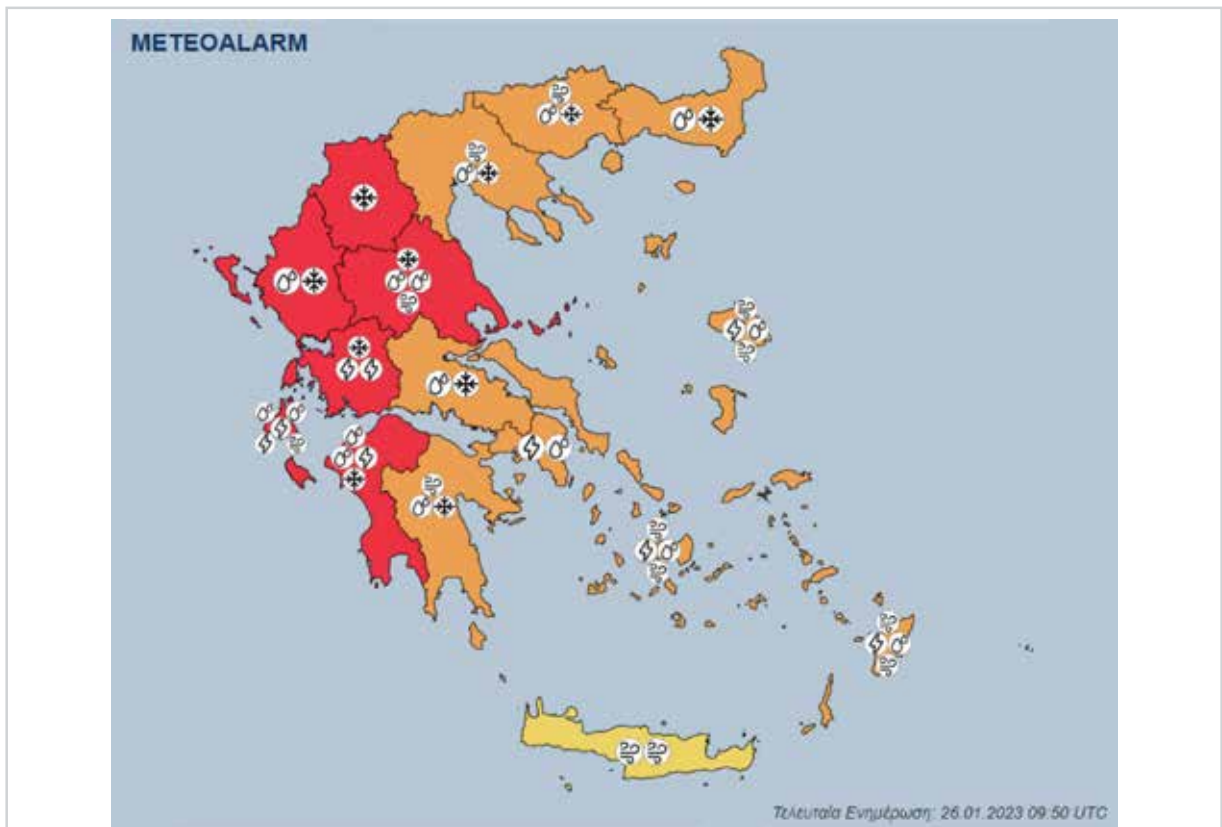
Η σύνταξη τιμών FFG αποτελεί μια προσπάθεια ερευνητικής μορφής με πρακτικό ενδιαφέρον. Για να γίνει αυτή πετυχημένα, θα πρέπει να υπάρχει συνεργασία των αρμόδιων για τα ΣΕΠΠ φορέων και της επιστημονικής-ερευνητικής κοινότητας, κάτι που ελπίζεται ότι μπορεί να γίνει και στη χώρα μας, ώστε να αποκτήσει τελικά επιτυχημένα ΣΕΠΠ.

MeteoAlarm

Το MeteoAlarm παρέχει τις περισσότερο σημαντικές πληροφορίες που απαιτούνται για την προετοιμασία για ακραία καιρικά φαινόμενα, τα οποία αναμένεται να εμφανιστούν κάπου στην Ευρώπη. Η ιστοσελίδα του MeteoAlarm ενσωματώνει όλες τις σημαντικές πληροφορίες για έντονα καιρικά φαινόμενα που προέρχονται από τις επίσημες εθνικές δημόσιες μετεωρολογικές υπηρεσίες σε μεγάλο αριθμό ευρωπαϊκών

χωρών. Αυτές οι πληροφορίες παρουσιάζονται με συνέπεια για να διασφαλιστεί η συνεκτική ερμηνεία τους όσο το δυνατόν ευρύτερα σε όλη την Ευρώπη. Το MeteoAlarm ειδοποιεί για πιθανή εμφάνιση έντονων καιρικών συνθηκών, όπως για ισχυρή βροχή με κίνδυνο πλημμύρας, ισχυρές καταιγίδες, θυελλώδεις ανέμους, κύματα καύσινα, δασικές πυρκαγιές, ομίχλη, χιόνι ή ακραίο κρύο με χιονοθύελλες, χιονοστιβάδες ή σοβαρές παράκτιες παλίρροιες. Η ιστοσελίδα του MeteoAlarm έχει αναπτυχθεί για το δίκτυο EUMETNET (2022) των 31 Ευρωπαϊκών Εθνικών Μετεωρολογικών Υπηρεσιών.

Ένα στιγμιότυπο του MeteoAlarm που παράγεται από την ΕΜΥ (2023) φαίνεται στην Εικόνα 7.8. Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του, όπως ο χρωματισμός, ο χαρακτηρισμός και η περιγραφή του καιρού και το μήνυμα με τη μορφή κειμένου της ΕΜΥ, και τα επίπεδα επικινδυνότητας για τη βροχόπτωση του MeteoAlarm φαίνονται στους Πίνακες 7.5 και 7.6, αντίστοιχα.



Εικόνα 7.8: Στιγμιότυπο του MeteoAlarm (ΕΜΥ, 2023)

Πίνακας 7.5

Χρωματισμός, χαρακτηρισμός και περιγραφή του καιρού και μήνυμα της ΕΜΥ στο MeteoAlarm (ΕΜΥ, 2023)		
Χαρακτηρισμός καιρού	Περιγραφή καιρού	Μήνυμα της ΕΜΥ
Μέτριος (Moderate) Κίτρινο	Ο καιρός μπορεί να γίνει επικίνδυνος. Τα καιρικά φαινόμενα που έχουν προβλεφθεί δεν είναι ασυνήθιστα, αλλά να είστε προσεκτικοί εάν σκοπεύετε να ασκήσετε δραστηριότητες που εκτίθενται σε μετεωρολογικούς κινδύνους. Μείνετε ενημερωμένοι για τις αναμενόμενες μετεωρολογικές συνθήκες και μην αναλαμβάνετε κανέναν κίνδυνο που μπορεί να αποφευχθεί.	ΕΝΗΜΕΡΩΘΕΙΤΕ, με τα πιο πρόσφατα δελτία καιρού. Αναμένονται κάποιες μικρές κλίμακας επιπτώσεις σε υπαίθριες δραστηριότητες.

Σημαντικός (Severe) Πορτοκαλί	<p>Ο καιρός είναι επικίνδυνος. Έχουν προβλεφθεί ασυνήθιστα μετεωρολογικά φαινόμενα. Είναι πιθανό να υπάρξουν ζημιές και θύματα. Να είστε πολύ προσεκτικοί και να ενημερώνεστε τακτικά για τις αναλυτικές αναμενόμενες μετεωρολογικές συνθήκες. Να γνωρίζετε τους κινδύνους που μπορεί να είναι αναπόφευκτοι. Ακολουθήστε τις συμβουλές που δίνονται από τις αρχές σας.</p>	<p>ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΤΕΙΤΕ, πάρτε προφυλάξεις βάσει των τελευταίων δελτίων καιρού. Περιμένετε και προετοιμαστείτε γιατί αναμένονται κάποιες επιπτώσεις σε καθημερινές και υπαίθριες δραστηριότητες.</p>
Ακραίος (Extreme) Κόκκινο	<p>Ο καιρός είναι πολύ επικίνδυνος. Έχουν προβλεφθεί εξαιρετικά έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα. Είναι πιθανό να συμβούν ζημιές και ατυχήματα σε μια ευρεία έκταση που σε πολλή περιπτώσεις μπορεί να απειλήσουν τη ζωή και ακεραιότητά σας. Να ενημερώνεστε συχνά για λεπτομερείς αναμενόμενες μετεωρολογικές συνθήκες και κινδύνους. Ακολουθήστε τις εντολές και κάθε συμβουλή που δίνεται από τις αρχές σας σε οποιοσδήποτε συνθήκες και να είστε προετοιμασμένοι για έκτακτα μέτρα.</p>	<p>ΠΑΡΤΕ προληπτικά ΜΕΤΡΑ, να είστε σε επαγρύπνηση και να ενεργείτε σύμφωνα με τις συμβουλές των αρμόδιων αρχών. Ενημερωθείτε από τα δελτία καιρού και περιμένετε σημαντικές επιπτώσεις στις καθημερινές σας δραστηριότητες.</p>

Πίνακας 7.6

Επίπεδα επικινδυνότητας για τη βροχόπτωση (mm) του MeteoAlarm (ΕΜΥ, 2023)		
Χαρακτηρισμός καιρού	Δυτική Ελλάδα ΒΑ Αιγαίο Δωδεκάνησα	Β. Ελλάδα Ανατολική Στερεά Θεσσαλία Πελοπόννησος Κυκλάδες Κρήτη
	<20 για 24 ώρες <15 για 12 ώρες	<15 για 24 ώρες <10 για 12 ώρες
Μέτριος (Moderate) Κίτρινο	20≤H<60 για 24 ώρες 50≤H<15 για 12 ώρες	50≤H<15 για 24 ώρες 30≤H<10 για 12 ώρες
Σημαντικός (Severe) Πορτοκαλί	100≤H<60 για 24 ώρες 80≤H<50 για 12 ώρες	80≤H<50 για 24 ώρες 60≤H<30για 12 ώρες
Ακραίος (Extreme) Κόκκινο	>100 για 24 ώρες >80 για 12 ώρες	>80 για 24 ώρες >60 για 12 ώρες

7.8 Βιβλιογραφία

1. Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., Martinez-Peir, M. & De la Hoz-Franco, E. (2018). Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods—A Review. *Sensors*, 18(7):2255. <https://doi.org/10.3390/s18072255>
2. AIDR (2009). Australian Institute for Disaster Resilience, Handbook Collection, Flood Warning, Manual 21. <https://knowledge.aidr.org.au/media/1964/manual-21-flood-warning.pdf>
3. Antronico, L., Coscarelli, R., De Pascale, F., & Muto, F. (2017). Geo-hydrological risk

- perception: A case study in Calabria (Southern Italy). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.022>
4. Bean, H., Sutton, J., Liu, B. F., Madden, S., Wood, M. M., & Mileti, D. S. (2015). The study of Mobile Public Warning Messages: A Research Review and Agenda. *Review of Communication*, 15(1), 60–80. <https://doi.org/10.1080/15358593.2015.1014402>
 5. BOM (2018). Bureau of Meteorology. National Arrangements for Flood Forecasting and Warning. Bureau of Meteorology, Australian Government. http://www.bom.gov.au/water/floods/document/National_Arrangements_V4.pdf
 6. BOM (2022). Bureau of Meteorology. <http://www.bom.gov.au/australia/flood/knowledge-centre/about-warning-service.shtml>
 7. Cools, J., Innocenti, D., & O'Brien, S. (2016). Lessons from flood early warning systems. *Environmental Science & Policy*, 58, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.006>
 8. EUMETNET (2022). Network of European Meteorological Services. <https://www.eumetnet.eu>, επίσης: <http://www.emy.gr/emy/el/warning/meteoalarm>
 9. FEMA (2005). Federal Emergency Management Agency. Reducing Damage from Localized Flooding - A Guide for Communities. FEMA 511 / June 2005. <https://www.fema.gov/pdf/fima/FEMA511-complete.pdf>
 10. Feldman, D., Contreras, S., Karlin, B., Basolo, V., Matthew, R., Sanders, B., Houston, D., Cheung, W., Goodrich, K., Reyes, A., Serrano, K., Schubert, J., & Luke, A. (2016). Communicating flood risk: Looking back and forward at traditional and social media outlets. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 15, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.12.004>
 11. Hagemeyer-Klose, M., & Wagner, K. (2009). Evaluation of flood hazard maps in print and web mapping services as information tools in flood risk communication. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 563–574. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-563-2009>
 12. HSSE (2023). Health, Safety, Security and Environment. Photo of the day: Flood Safety Tips. <https://hsseworld.com/photo-of-the-day-flood-safety-tips/>
 13. Khalid, M. S., & Shafiai, S. B. (2015). Flood disaster management in Malaysia: An evaluation of the effectiveness flood delivery system. *International Journal of Social Science and Humanity*, 5(4), 398–402. <https://doi.org/10.7763/ijssh.2015.v5.488>
 14. Keller, C., Siegrist, M., & Gutscher, H. (2006). The role of the affect and availability heuristics in risk communication. *Risk Analysis*, 26(3), 631–639. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00773.x>
 15. Kellens, W., Terpstra, T., & De Maeyer, P. (2013). Perception and communication of flood risks: A systematic review of Empirical Research. *Risk Analysis*, 33(1), 24–49. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01844.x>
 16. Lam, R. P., Leung, L. P., Balsari, S., Hsiao, Kai-hsun, Newnham, E., Patrick, K., Pham, P., & Leaning, J. (2017). Urban disaster preparedness of Hong Kong residents: A territory-wide survey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.04.008>
 17. Lechowska, E. (2018). What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements. *Natural Hazards*, 94(3), 1341–1366. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3480-z>
 18. Lindell, M. K., Huang, S.-K., & Prater, C. S. (2017). Predicting residents' responses to the May 1–4, 2010, Boston Water Contamination Incident. *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, 35(1), 84–114. <https://doi.org/10.1177/028072701703500105>
 19. Liu, B. F., Wood, M. M., Egnoto, M., Bean, H., Sutton, J., Mileti, D., & Madden, S. (2017). Is a picture worth a thousand words? The effects of maps and warning messages on how

- publics respond to disaster information. *Public Relations Review*, 43(3), 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2017.04.004>
20. METEO (2022). <https://www.meteo.gr/>
 21. METOFFICE (2022). <https://www.metoffice.gov.uk/weather/guides/flood-warnings>
 22. Morss, R. E., Mulder, K. J., Lazo, J. K., & Demuth, J. L. (2016). How do people perceive, understand, and anticipate responding to flash flood risks and warnings? results from a public survey in Boulder, Colorado, USA. *Journal of Hydrology*, 541, 649–664. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.047>
 23. Nigg, J. (1995). Risk communication and warning systems. In T. Hotlick-Jones et al. (Eds.), *Natural Risk and Civil Protection* (pp. 369–382). E & FN Spon.
 24. NOAA (2010). National Oceanic and Atmospheric Administration. Flash Flood Early Warning System Reference Guide, Available online: https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=958
 25. NWS (2022). National Weather Service. <https://www.weather.gov/safety/flood-turn-around-dont-drown>
 26. O'Sullivan, J. J., Bradford, R. A., Bonaiuto, M., De Dominicis, S., Rotko, P., Aaltonen, J., Waylen, K., & Langan, S. J. (2012). Enhancing flood resilience through Improved Risk Communications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2271–2282. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2271-2012>
 27. Plate, E. J. (2007). Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example. *Journal of Hydro-Environment Research*, 1(2), 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2007.10.002>
 28. Potter, S. H., Kreft, P. V., Milojev, P., Noble, C., Montz, B., Dhellemmes, A., Woods, R. J., & Gauden-Ing, S. (2018). The influence of impact-based severe weather warnings on risk perceptions and intended protective actions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.03.031>
 29. Rollason, E., Bracken, L. J., Hardy, R. J., & Large, A. R. (2018). Rethinking flood risk communication. *Natural Hazards*, 92(3), 1665–1686. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3273-4>
 30. Shreve, C., Begg, C., Fordham, M., & Müller, A. (2016). Operationalizing risk perception and preparedness behavior research for a multi-hazard context. *Environmental Hazards*, 15(3), 227–245. <https://doi.org/10.1080/17477891.2016.1176887>
 31. SPSS (2022). Statistical Package for the Social Sciences. <https://spss.en.softonic.com/>
 32. Sukhwani, V., Gyamfi, B. A., Zhang, R., AlHinai, A. M., & Shaw, R. (2019). Understanding the barriers restraining effective operation of Flood Early Warning Systems. *International Journal of Disaster Risk Management*, 1(2), 1–17. <https://doi.org/10.18485/ijdrm.2019.1.2.1>
 33. UNISDR (2010). United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Emerging challenges for early warning systems in context of climate change and urbanization, Humanitarian & Development Network, Coppet, CH.
 34. Wachinger, G., Renn, O., Begg, C., & Kuhlicke, C. (2013). The risk perception paradox-implications for governance and communication of natural hazards. *Risk Analysis*, 33(6), 1049–1065. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x>
 35. WMO (2010). World Meteorological Organization. Guidelines on early warning systems and application of nowcasting and warning operations. https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=4240#.Y994LXZBxPY
 36. WMO (2011). World Meteorological Organization. Manual on Flood Forecasting and Warning. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4090

37. WMO (2015). World Meteorological Organization. The role of media in flood management. Geneva, Switzerland. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19482#.Y-SlmnZBxD9
38. Wright, C (2001). Flash Flooding in an Urban Environment: Causes, Effects, Potential Damages and Possible Remedies, with Particular Reference to Keswick Creek in the Inner Suburbs of Adelaide, unpublished Master of Engineering Science thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide.
39. Zhu, X., Linham, M. M., & Nicholls, R. J. (2010). Technologies for climate change adaptation. Coastal erosion and flooding. Denmark. Technical report, Technical Univ. of Denmark, Risoe National Lab. for Sustainable Energy, UNEP Risoe Centre, Roskilde. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/1010716>
40. EMY (2023). Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Meteoalarm. <http://www.emy.gr/emyl/warning/meteoalarm>
41. Καραμούστου, Π. (2018). Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για ξαφνικές πλημμύρες – Η περίπτωση της Μάνδρας, Αττικής. Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
42. Καραμούστου, Π. & Στάμου, Α. (2019). Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ξαφνικών πλημμυρών και η τοπική κοινωνία – Η περίπτωση της Μάνδρας Αττικής. Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 16-16 Μαΐου, Βόλος.

Σχεδιασμός του Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης της πόλης της Μάνδρας

Γ. Μητσόπουλος, Γ. Τζάνες, Α. Μπουρνάς, Χ. Χαλκιαδάκης, Ε. Φελλώνη, Αιμ. Θεοχάρη, Σ. Σκρουφούτα, Α. Μπλούτσος, Μ. Γυμνόπουλος, Χ. Σαρόγλου, Μ. Διακάκης, Δ. Καλογεράς, Ι. Γκόλιας, Ε. Βλαχογιάννη, Ε. Λέκκας, Ε. Μπαητάς, Α. Ι. Στάμου

8.1 Βήμα 1: Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

8.1.1 Εισαγωγή

Γενικά

Η Μάνδρα είναι μια προαστιακή κωμόπολη που βρίσκεται στο δυτικότερο όριο της πεδιάδας του Θριασίου Πεδίου στη Δυτική Αττική, στους πρόποδες του Όρους Πατέρας. Οι κυριότεροι οικισμοί του Θριασίου Πεδίου είναι η Ελευσίνα, ο Ασπρόπυργος, η Μάνδρα και η Μαγούλα. Το υδρογραφικό δίκτυο του Όρους Πατέρα αποτελείται από πολλά συγκλίνοντα υδατορέματα με μεγάλες κλίσεις πυθμένα που σχηματίζουν τα δυο κύρια ρέματα (ρ.) Σούρες και Αγίας Αικατερίνης, η λεκάνη απορροής των οποίων είναι ίση με 23.0 και 22.0 km², αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (ΥΠΕΝ, 2018), η περιοχή της Μάνδρας περιλαμβάνεται στην ευρύτερη Λεκάνη Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ) του ρ. Σαρανταπόταμου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.1. Αποτελεί τμήμα της Ζώνης Δυνητικά



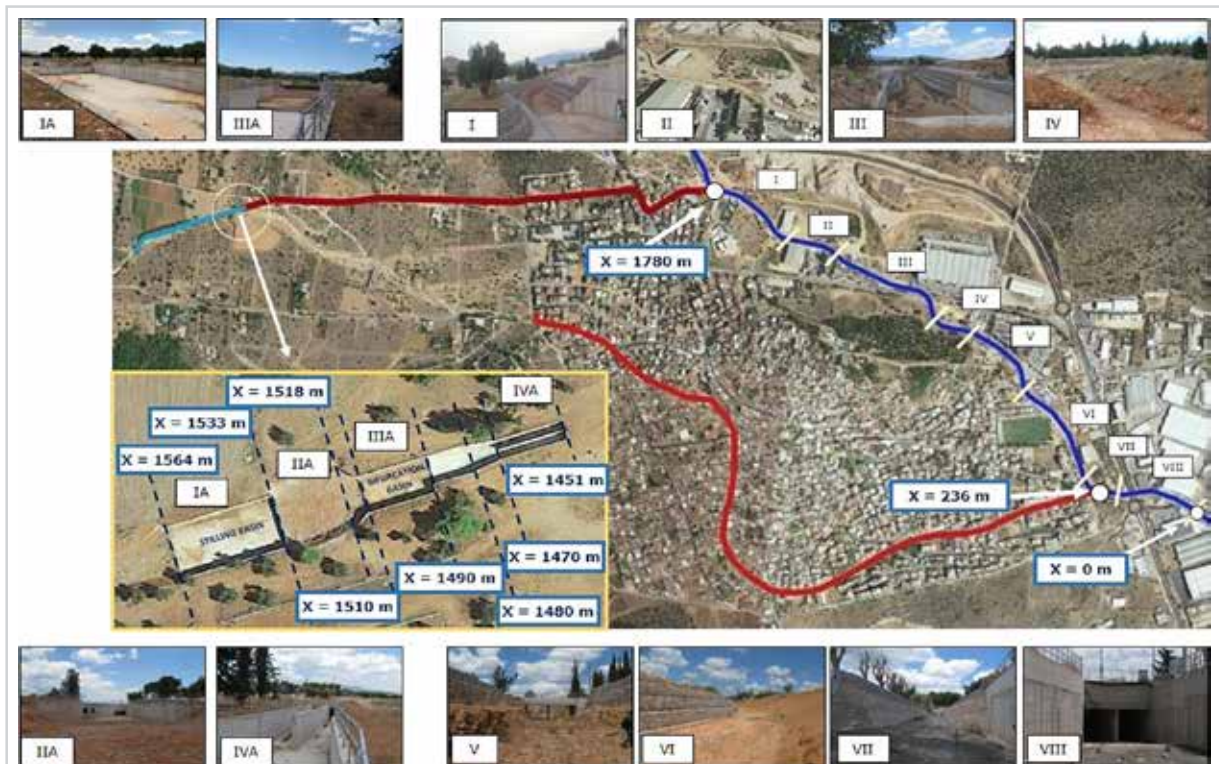
Εικόνα 8.1: Ζώνη Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας «Χαμηλή Ζώνη Ασπρόπυργου – Ελευσίνας» (GRO6RAK0005) εντός της ΛΑΠ Σαρανταπόταμου (Υπόβαθρο: Google Satellite)

Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) «Χαμηλή Ζώνη Ασπρόπυργου – Ελευσίνας» (GR06RAK0005) που έχει έκταση 94.31 km². Οριοθετείται από το Όρος Πατέρας στα δυτικά, την Πάρνηθα στα βόρεια και το Ποικίλο και το Αιγάλεω Όρος στα νοτιοανατολικά. Στο νότο βρέχεται από τον Κόλπο Ελευσίνας.

Το 2017, το ρ. Σούρες και το ρ. Αγίας Αικατερίνης, που διέρχονται από την πόλη της Μάνδρας, είχαν υποστεί σημαντικές μορφολογικές αλλαγές, εξαιτίας των εντατικών κατασκευαστικών εργασιών στην ευρύτερη περιοχή. Αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των διαθέσιμων διατομών τους και την εμφάνιση πλημμυρών, ακόμη και σε μικρές παροχές. Αυτά τα χαρακτηριστικά ήταν ένας από τους κύριους λόγους της καταστροφικής πλημμύρας τον Νοέμβριο του 2017. Η ξαφνική πλημμύρα στην πόλη της Μάνδρας στις 15 Νοεμβρίου 2017 (Stamou, 2018· Στάμου, 2018) ήταν η τρίτη πιο καταστροφική «Νοεμβριανή» πλημμύρα στην Αττική. Εκτιμήθηκε ότι αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς ίση με $T=150$ περίπου έτη, και ακολούθησε, σε αριθμό θυμάτων, τις πλημμύρες των δυτικών προαστίων της Αθήνας το 1961 (43 θάνατοι) και το 1977 (37 θάνατοι). Μάλιστα, το συμβάν αυτό σημειώθηκε 21 έτη μετά την «προειδοποιητική πλημμύρα» (2 θάνατοι) στην ίδια περιοχή τον Ιανουάριο του 1996. Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού επλήγη από την πλημμύρα (με συνέπεια 24 θανάτους και 24 τραυματίες), ενώ υπόγεια και ισόγεια κτιρίων στην πόλη υπέστησαν σοβαρές ζημιές, καθώς και σοβαρές επιπτώσεις στις υποδομές, τα οχήματα και το περιβάλλον (Diakakis et. al., 2020a,b). Εκτιμήθηκε ότι το 80% της περιοχής της πόλης είχε πληγεί από την πλημμύρα (IFRC, 2017).

Τα αντιπλημμυρικά έργα στη Μάνδρα

Εξαιτίας του καταστροφικού πλημμυρικού γεγονότος το 2017, η Ελληνική Πολιτεία αποφάσισε αμέσως να κατασκευάσει αντιπλημμυρικά έργα στη Μάνδρα, σύμφωνα με την Οριστική Μελέτη που εκπονήθηκε το 2014 (ΕΤΜΕ κ.ά, 2014). Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε για πλημμύρα σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη, η οποία βασίστηκε σε όμβριες καμπύλες που προσδιορίστηκαν στην υδρολογική μελέτη που έγινε το 1980.



Εικόνα 8.2: Τα 13 τμήματα των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στο ρ. Σούρες (από I μέχρι VIII) και στο ρ. Αγίας Αικατερίνης (από IA μέχρι VA)

Η κατασκευή των αντιπλημμυρικών έργων ξεκίνησε το 2018 και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2021. Τα αντιπλημμυρικά έργα περιλαμβάνουν κυρίως:

- ▶ τη διευθέτηση του ρ. Σούρες σε μήκος 1780 m για παροχή σχεδιασμού ίση με 91 m³/s (x=236-1780 m) και 125 m³/s (x=0-236 m), και
- ▶ την εκτροπή του ρ. Αγίας Αικατερίνης προς το ρ. Σούρες με αγωγό μήκους 1568 m για παροχή σχεδιασμού ίση με 47 m³/s.

Για τη συστηματική διερεύνηση του αντικειμένου, τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας στο ρ. Σούρες (από I μέχρι VIII) και στο ρ. Αγίας Αικατερίνης (από IA μέχρι VA) διακρίνονται στα 13 τμήματα που φαίνονται στην Εικόνα 8.2. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1

Κύρια χαρακτηριστικά των 13 τμημάτων των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στο ρ. Σούρες (από I μέχρι VIII) και στο ρ. Αγίας Αικατερίνης (από IA μέχρι VA)				
Τμήμα	x(m)	Διατομή	Υλικό πυθμένα	Υλικό πλευρών
I	1780 – 1435	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Συρματοκιβώτια
II	1435 – 1260	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Φυσικό έδαφος ή Συρματοκιβώτια
III	1260 – 974	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Συρματοκιβώτια
IV	974 – 870	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Φυσικό έδαφος
V	870 – 604	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος (κυρίως)	Φυσικό έδαφος
VI	604 – 300	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Αριστερό πρανές: Φυσικό έδαφος Δεξιό πρανές: Συρματοκιβώτια
VII	300 – 142	Τραπεζοειδής	Σκυρόδεμα	Επένδυση με λιθοδομή
VIII	142 – 0	Κλειστός δίδυμος ορθογωνικός αγωγός 4.0 m x 3.0 m	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
IA	1564 – 1533	Ορθογωνική ηλεκάνη ηρεμίας 30.0 m x 15.0 m	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
IIA	1533 – 1510	Τραπεζοειδής	Φυσικό έδαφος	Φυσικό έδαφος
IIIA	1510 – 1490	Έργο Κεφαλής - Μερισμού	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
IVA	1490 – 1470	Συναρμογή – Ορθογωνική διατομή	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
VA	1470 – 0	Ανοικτός δίδυμος ορθογωνικός αγωγός - Κλειστός δίδυμος ορθογωνικός αγωγός 2.5x2.5 m	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα

8.1.2 Τοπογραφικά δεδομένα

Στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας συλλήχθηκαν και αξιοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα:

- ▶ Το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας DSM (Digital Surface Model) για τις αστικές περιοχές της Μάνδρας και της Μαγούλλας και τη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας, και
- ▶ το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους DEM (Digital Elevation Model) της ευρύτερης περιοχής.

Το DSM αποτελεί μέρος της σειράς δεδομένων DSM Urban Areas που βασίζεται σε πλέγμα μεγέθους εικονοστοιχείου 0.8 m, το οποίο προέρχεται από το έργο VLSO που υλοποιήθηκε από το Ελληνικό Κτηματολόγιο (ΕΚ, 2020). Εξαιτίας της πολύ υψηλής ανάλυσης του, το DSM καταγράφει όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας της περιοχής, συμπεριλαμβανομένων των δρόμων, των δέντρων και των κτιρίων, τα οποία απαιτούνται για λεπτομερείς υδροδυναμικούς υπολογισμούς. Το DEM της ευρύτερης περιοχής έχει ανάλυση 5 m x 5 m.

- ▶ Σχέδια της μελέτης των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, τα οποία διατέθηκαν από την εταιρεία που την εκπόνησε (ΕΤΜΕ κ.ά., 2014).
- ▶ Σχέδια AUTOCAD 3D με την αποτύπωση της περιοχής των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, τα οποία διατέθηκαν από την τεχνική εταιρεία που κατασκεύασε τα έργα.

Τα παραπάνω δεδομένα δεν κρίθηκαν ως επαρκή. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκε η πραγματοποίηση συμπληρωματικών μετρήσεων πεδίου για την αποτύπωση συγκεκριμένων περιοχών. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το γεωδαιτικό όργανο GNSS RTK της Leica σε διατομές ανά περίπου 100 m

- ▶ στο ανάντη τμήμα (από $x=4392$ μέχρι 1780 m) και στο κατόντη τμήμα (από $x=0$ μέχρι -2223 m) του ρ. Σούρες (βλ. Εικόνα 8.2), και
- ▶ στο ανάντη τμήμα (από $x=1746$ μέχρι 1564 m) του ρ. Αγίας Αικατερίνης.

Στο ενδιάμεσο τμήμα (από $x=0$ μέχρι 1780 m) του ρ. Σούρες και στο κατόντη τμήμα του ρ. Αγίας Αικατερίνης, χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια AUTOCAD 3D.

8.1.3 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και συμβάντα πλημμυρών

Γενικά

Οι πηγές συλλογής των υδρομετεωρολογικών δεδομένων στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας είναι οι ακόλουθες:

- ▶ Οι τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή. Αυτοί είναι ένας σταθμός της ΕΜΥ στην Ελευσίνα και δυο σταθμοί του ΜΕΤΕΟ στη Μάνδρα και στην Ελευσίνα.
- ▶ Το δίκτυο του FloodHub (2022), βλ. επίσης OpenHi (2022).
- ▶ Το ΣΔΚΠ της Αττικής (ΥΠΕΝ, 2018).
- ▶ Υφιστάμενες μετρήσεις πεδίου.
- ▶ Το διαδίκτυο, π.χ. επιστημονικές και λοιπές δημοσιεύσεις.

Μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή

Ο σταθμός της ΕΜΥ στην Ελευσίνα βρίσκεται στο Αεροδρόμιο Ελευσίνας στη θέση που έχει γεωγραφι-

κό πλάτος ίσο με 38.06° N, γεωγραφικό μήκος ίσο με 23.56° E και υψόμετρο ίσο με 20 m. Ο σταθμός παρέχει πληροφορίες για τον καιρό, την υγρασία, τη θερμοκρασία, τη διεύθυνση και την ένταση του ανέμου μέσω της ιστοσελίδας της ΕΜΥ (ΕΜΥ, 2023).

Ο σταθμός του ΜΕΤΕΟ στην Ελευσίνα βρίσκεται εντός της πόλης της Ελευσίνας, κοντά στο Δημαρχείο, στη θέση με γεωγραφικό πλάτος ίσο με 38.0448° N, γεωγραφικό μήκος ίσο με 23.5396° E και υψόμετρο ίσο με 10 m. Ο σταθμός παρέχει πληροφορίες για την υγρασία, τη θερμοκρασία, τη διεύθυνση ανέμου και τη βροχόπτωση, καθώς και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των παραπάνω, μέσω της ιστοσελίδας του ΜΕΤΕΟ (ΜΕΤΕΟ, 2023α).

Ο σταθμός του ΜΕΤΕΟ στη Μάνδρα βρίσκεται στη θέση Παλαιοκούνδουρα του Αγ. Σωτήρα, που έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 38.1060° N, γεωγραφικό μήκος ίσο με 23.4238° E και υψόμετρο ίσο με 392 m. Ο σταθμός παρέχει πληροφορίες για την υγρασία, τη θερμοκρασία, τη διεύθυνση ανέμου, τη βροχόπτωση και την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των παραπάνω, μέσω της ιστοσελίδας του ΜΕΤΕΟ (ΜΕΤΕΟ, 2023β).



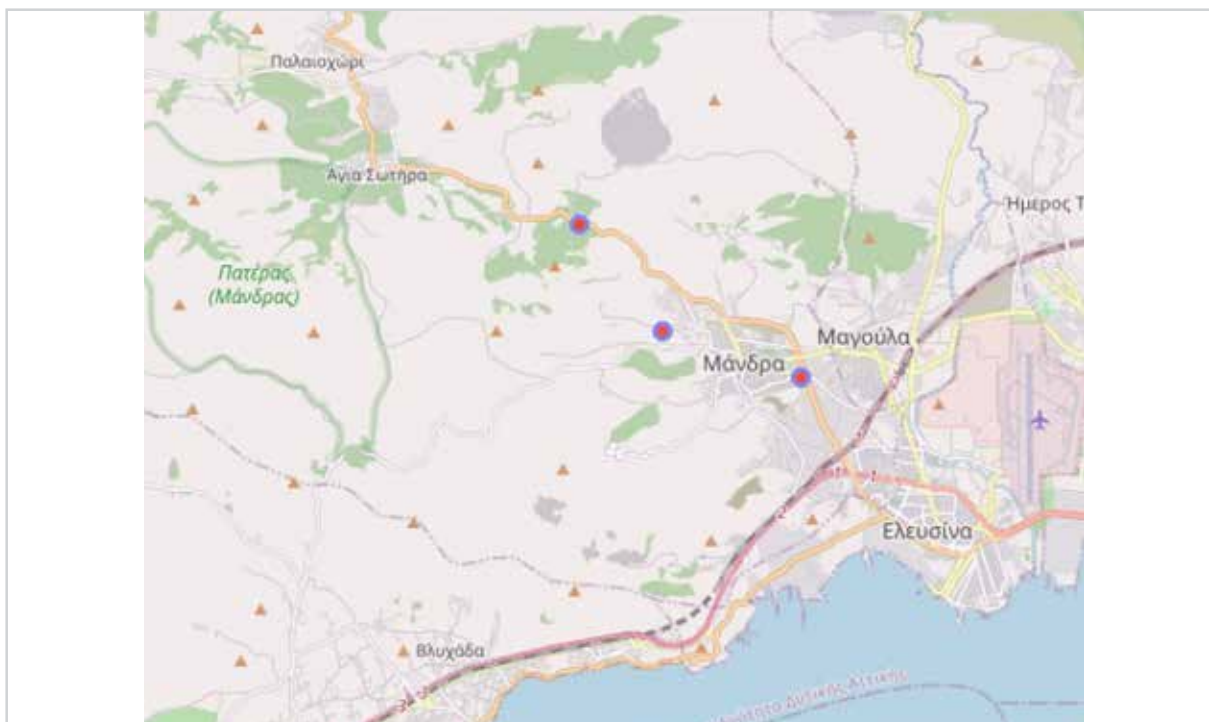
Εικόνα 8.3: Οι θέσεις των τριών μετεωρολογικών σταθμών στην ευρύτερη περιοχή

Το δίκτυο Flood Hub

Το Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ) του ΕΑΑ με συγχρηματοδότηση από την Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SMURBS/ERA-PLANET, σε συνεργασία με την Περιφέρεια Αττικής και την εταιρεία Metrica, εγκατέστησε τρεις υδρομετρικούς σταθμούς στην περιοχή της Μάνδρας, στις θέσεις Ρέμα, Εκτροπή και Κόμβος, οι οποίες φαίνονται στις Εικόνες 8.4 και 8.5 (FloodHub, 2022). Οι σταθμοί αυτοί με τις μετρήσεις τους βρίσκονται στο Δίκτυο Ανοιχτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων OpenHi.net, το οποίο είναι μια ανοιχτή πληροφοριακή υποδομή για τα επιφανειακά νερά της χώρας (Mamassis et al., 2021· OpenHi, 2022).

Επιχειρήθηκε η επεξεργασία των μέχρι σήμερα μετρήσεων των σταθμών αυτών για τον προσδιορισμό της εξίσωσης στάθμης επιφάνειας ροής – παροχής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση του Μοντέλου Πρόγνωσης πλημμυρών (ΜΠΠ), χωρίς όμως αποτέλεσμα.

Συνιστάται η βαθμονόμηση των σταθμών αυτών, ώστε να είναι δυνατό να αξιοποιηθούν σε ένα ΣΕΠΠ, όπως το προτεινόμενο.



Εικόνα 8.4: Οι θέσεις των τριών υδρομετρικών μετεωρολογικών σταθμών του FloodHub (2022)



Εικόνα 8.5: Φωτογραφίες των τριών υδρομετρικών σταθμών του FloodHub (2022) στις θέσεις (α) Ρέμα, (β) Εκτροπή και (γ) Κόμβος (ΟpenHi, 2022)

Το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας στην Αττική

Σύμφωνα με το ΣΔΚΠ της Αττικής, τα σημαντικότερα ρέματα στη ΖΔΥΚΠ «Χαμηλή Ζώνη Ασπρόπυργου – Ελευσίνας», GR06RAK0005 είναι το ρ. Αγ. Γεωργίου ή Γιαννούδας με συμβάλλοντα ρέματα το ρ. Μαύρης Ώρας και Διυλιστηρίων, το ρ. Αγ. Ιωάννου, το ρ. Σαρανταπόταμου, με συμβάλλοντα τα ρ. Μικρό και Μεγάλο Κατερίνη, και το ρ. Σούρες με συμβάλλοντα τα ρέματα Αγίας Αικατερίνης και Λούτσας. Τα ρέματα αυτά καταλήγουν στη στενή παραλία Ασπροπύργου - Ελευσίνας μήκους περίπου 8 km. Η στενή αυτή παραλία σε συνδυασμό με την πυκνότητα δόμησης της, επιδεινώνει το πρόβλημα της ασφαλούς παροχέτευσης προς τη θάλασσα των όμβριων απορροών (ΥΠΕΝ, 2018).

Στα ρέματα αυτά εντοπίζονται τα ακόλουθα προβλήματα (ΥΠΕΝ, 2018):

- ▶ Οι πεδινές κοίτες ελαττώνονται ή έχουν σχεδόν εξαφανισθεί όσο πλησιάζουν προς τη θάλασσα, είτε φυσιολογικά λόγω ελάττωσης ταχύτητας και μείωσης απόθεσης φερτών είτε κυρίως, τεχνητά λόγω παράνομης δόμησης σπιτιών και βιομηχανιών
- ▶ Στο μεγαλύτερο τμήμα τους δεν έχουν επαρκή διατομή λόγω ανθρωπογενών επεμβάσεων, όπως κατασκευές, ανεπαρκείς οχετούς σε διασταυρώσεις με δρόμους ή ακόμη από τις λεγόμενες Ιρλανδικές διαβάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συμβάντα πλημμυρών που οφείλονται σε υπερχειλίση ποταμού ή θραύση τεχνικών έργων.
- ▶ Σημαντικά προβλήματα εντοπίζονται και στις εκβολές των ρεμάτων. Στα τμήματα κοντά στις εκβολές δεν υπήρχε πάντοτε διαμορφωμένη κύρια κοίτη. Αυτό διαπιστώνεται στις περιπτώσεις όπου οδικά έργα διασταυρώνονταν με τα ρέματα αυτά. Ακόμη, λόγω της έντονης δόμησης που αναπτύχθηκε, μετά το 1950, οι εκβολές προς τη θάλασσα των περισσότερων ρεμάτων, έχουν εξαφανιστεί με αποτέλεσμα τα πλημμυρικά νερά να μην έχουν διέξοδο και να προκαλούν πλημμυρικά προβλήματα.

Στη ΖΔΥΚΠ «Χαμηλή Ζώνη Ασπρόπυργου – Ελευσίνας» (GR06RAK0005) έχουν καταγραφεί συνολικά επτά ιστορικά συμβάντα πλημμυρών, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια (ΥΠΕΝ, 2018).

- ▶ Στις 19 Νοεμβρίου 1963 το ρ. Σούρες ξεχειλίσε και σημειώθηκε μια απώλεια ανθρώπινης ζωής στην περιοχή Μπλόκου – Πυρκάλη.
- ▶ Στις 2 Νοεμβρίου 1977 παρατηρήθηκαν σφοδρές πλημμύρες στον Ασπρόπυργο, όταν πλημμύρισε το ρ. Αγίου Γεωργίου.
- ▶ Στις 27 Ιανουαρίου 1996 το πλημμυρικό επεισόδιο μετέτρεψε το Θριάσιο Πεδίο σε απέραντη λίμνη και δύο άτομα πνίγηκαν. Το ρ. Σαρανταπόταμου υπερχειλίσε, γιατί δεν είχε διέξοδο προς τη θάλασσα.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ στην Ελευσίνα για τα παραπάνω πλημμυρικά γεγονότα. Σημειώνεται ότι τα ύψη βροχής που καταγράφηκαν ο 1963 και το 1996 είναι αρκετά μικρά, ώστε να δικαιολογούν τις προαναφερθείσες καταστροφές. Είναι προφανές ότι τα υπόψη επεισόδια βροχής είχαν έντονη χωρική διασπορά, που αποτυπώθηκε επαρκώς στον συγκεκριμένο σταθμό. Αυτό καταδεικνύει την ανάγκη ύπαρξης πυκνού μετρητικού δικτύου, σε συνδυασμό με τεχνολογίες τηλεπισκόπησης που να επιτρέπουν την περιγραφή της χωρικής ετερογένειας των καταιγίδων στην περιοχή.

Πίνακας 8.2

Χαρακτηριστικά επεισοδίων βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ στην Ελευσίνα			
Ημερομηνία	Ύψος βροχής (mm)	Διάρκεια βροχής (min)	Ένταση βροχής (mm/h)
19 Νοεμβρίου 1963	25.0	345	4.35
2 Νοεμβρίου 1977	90.5	725	7.49
27 Ιανουαρίου 1996	17.3	650	1.60

- ▶ Στις 24 Οκτωβρίου 2014 σημειώθηκε βροχόπτωση ύψους 67 mm σύμφωνα με τον βροχομετρικό σταθμό στη Μάνδρα Αττικής. Στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών-Θηβών (ΠΕΟΑΘ) στο ύψος της Μάνδρας παρουσιάστηκαν προβλήματα λόγω της συσσώρευσης υδάτων με τα αυτοκίνητα να έχουν ακινητοποιηθεί εξαιτίας της περιορισμένης ορατότητας. Ανάλογα προβλήματα υπήρξαν στη Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου και στο ύψος του Σκαραμαγκά και της Χαλιβουργικής (ΥΠΕΝ, 2018).

- ▶ Στις 27 Φεβρουαρίου 2015 σημειώθηκε πλημμύρα στη Μάνδρα Αττικής εξαιτίας ισχυρής βροχόπτωσης. Η Πυροσβεστική Υπηρεσία χρειάστηκε να απεγκλωβίσει δύο ηλικιωμένα άτομα από τις οικίες τους και ένα άτομο από το αυτοκίνητο του. Οι δρόμοι μετατράπηκαν σε ορμητικούς χειμάρρους. Δεκάδες ήταν οι κλήσεις που δέχτηκε η Πυροσβεστική Υπηρεσία για την άντληση υδάτων και την παροχή βοήθειας, ενώ οι περιοχές Μάνδρα, Ελευσίνα, Ασπρόπυργος και η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου πεδίου, τέθηκαν σε "κόκκινο συναγερμό" (ΥΠΕΝ, 2018).
- ▶ Στις 14 Νοεμβρίου 2017 και ώρα 20:00 παρατηρήθηκε βροχόπτωση ήπιας έντασης και σχετικά μικρής διάρκειας στην πηλαγιά του όρους Πατέρα, βορειοδυτικά της περιοχής της Μάνδρας και βόρεια της Νέας Περάμου. Τα μεσάνυχτα της ίδιας ημέρας σημειώθηκε διακοπτόμενη ραγδαία καταιγίδα συνολικής διάρκειας περίπου 8 h, ο μεγαλύτερος όγκος της οποίας παρατηρήθηκε σε δυο διακοπτόμενα διαστήματα. Σύμφωνα με την περιγραφή της ΕΜΥ που βασίστηκε στην καταγραφή του μετεωρολογικού ραντάρ στο Όρος Υμηττός, το εκτιμώμενο αθροιστικό ύψος υετού στην ευρύτερη περιοχή του Όρους Πατέρα από το απόγευμα της 14ης μέχρι το απόγευμα της 15ης Νοεμβρίου εκτιμήθηκε ίσο με περίπου 80 mm. Ενδεικτικά, στο χρονικό διάστημα από τις 05:00 μέχρι τις 08:00 ο εκτιμώμενος συνολικός υετός έφθασε περίπου τα 60 mm. Αξιοσημείωτο γεγονός του πλημμυρικού επεισοδίου, ήταν η μεγάλη ραγδαιότητα που καταγράφηκε. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι τιμές βροχόπτωσης κατά διαστήματα ξεπέρασαν και τα 300 mm/h.

Η ραγδαία αυτή βροχόπτωση προκάλεσε ξαφνική πλημμύρα στα ρέματα Σούρες και Αγίας Αικατερίνης. Κατά την εξέλιξη του πλημμυρικού φαινομένου, τα ύδατα κάλυψαν την έκταση περί των οχθών των ρεμάτων. Σημαντικότερη έκταση περί την κοίτη καταλήφθηκε από το ρ. Αγίας Αικατερίνης, το οποίο μετά την συμβολή του με τον δρόμο που οδηγεί στην περιοχή της Νέας Ζωής, δεν διαθέτει σαφώς διαμορφωμένη κοίτη και το πλάτος ροής του φτάνει τα 200 m. Η απορροή του ρέματος μέσα από την κωμωπολή της Μάνδρας κάλυψε την περιοχή που ορίζεται από το βορειοδυτικό όριο της, την Οδό Κοροπούλη και μέχρι την Οδό Μεγάλου Αλεξάνδρου και την νοτιοανατολική είσοδο της Μάνδρας. Επίσης κατά μήκος του ρ. Σούρες στη θέση της εγκατάστασης της βιομηχανίας Βακόντιος Α.Ε. η πλημμύρα κάλυψε μέχρι και την ΠΕΟΑΘ και στη συνέχεια όλη την περιοχή του κοιμητηρίου της Μάνδρας. Από το σημείο εκείνο και ανατολικότερα η πλημμυρισμένη έκταση κάλυψε όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις περί την ΠΕΟΑΘ μέχρι και τον ανισόπεδο κόμβο της με την Αττική Οδό. Ο πλημμυρικός όγκος διοχετεύτηκε και μέσω της οδού Λεωνίδα Στάμου (Λούκα) προς την νοτιότερη περιοχή της Μαγούλας και την περιοχή



Εικόνα 8.6: Φωτογραφία της ξαφνικής πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας (Λέκκας κ.ά, 2018)

του οικισμού Πάτημα μέχρι και το πρηνές της Αττικής Οδού. Στο τμήμα αυτό υπήρξαν χαμηλά βάθη και μικρές ταχύτητες ροής. Επίσης, κατόπιν του ανισόπεδου κόμβου ΠΕΟΑΘ με την Αττική Οδό η πλημμυρική έκταση κάλυψε τη νότια περιοχή του οικισμού Παπακώστα και έφτασε μέχρι τον ανισόπεδο κόμβο Παραδείσου-Ελευσίνας της Ιόνιας Οδού. Στην περιοχή των εργατικών κατοικιών της Ελευσίνας παρατηρήθηκαν χαμηλά βάθη ροής και με μικρές ταχύτητες ροής (Μαρκόπουλος-Σαρίκας, 2018).

Στην Εικόνα 8.6 παρουσιάζεται φωτογραφικό στιγμιότυπο της ξαφνικής πλημμύρας στη Μάνδρα το Νοέμβριο 2017.

Μετρήσεις πεδίου

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου στην περιοχή της Μάνδρας κατά τη διάρκεια της πλημμύρας το 2017 και μετά από αυτή, οι οποίες περιλάμβαναν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ▶ τη μέγιστη στάθμη της επιφάνειας ροής στις θέσεις παρατήρησης O1 μέχρι O6 που φαίνονται στην Εικόνα 8.7,
- ▶ τους χρόνους παρατήρησης της μέγιστης στάθμης της επιφάνειας ροής στις παραπάνω θέσεις παρατήρησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.3, και
- ▶ την έκταση της περιοχής πλημμύρας (Mitsopoulos et al., 2022a).

Η μέγιστη στάθμη της επιφάνειας ροής μετρήθηκε με βάση τα ίχνη που άφησε η ροή στους τοίχους και άλλες επιφάνειες εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία των Koenig et al. (2016). Τα ίχνη αυτά ήταν: (i) γραμμές σπόρων, (ii) γραμμές πλύσης, (iii) εμπλοκές φερτών υλικών, (iv) γραμμές ξηραμένης λάσπης σε επιφάνειες, (v) φύλλα / πευκοβελόνες κολλημένες σε διάφορα σημεία, όπως σε δέντρα, (vi) γραμμές φερτών υλικών, και (vii) χαλαρές αποθέσεις νερού.

Κατά τις μετρήσεις των ιχνών δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή μέτρησής τους σε θέσεις που επηρεάζονται από κυματισμούς της ροής και εμπόδια στη ροή (Koenig et al., 2016). Σε ορισμένες θέσεις τα ίχνη είχαν τη μορφή παχύρρευστων γραμμών λάσπης σε επιφάνειες που εισάγουν μια αβεβαιότητα μερικών εκατοστών. Μετρήθηκαν τα ίχνη της ροής σε θέσεις όπου η ροή ήταν σχετικά ομαλή σύμφωνα με τις λήψεις βίντεο που πραγματοποιήθηκαν (i) από μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (Diakakis et al.,



Εικόνα 8.7: Θέσεις παρατήρησης O1 μέχρι O6

2019) και (ii) από κάμερες που στηρίζονταν στο έδαφος. Σε ορισμένα σημεία της περιοχής μελέτης, δεν ήταν δυνατόν να καταγραφούν τα ίχνη εξαιτίας της σταδιακής εξαφάνισής τους τις ημέρες που ακολούθησαν το συμβάν της πλημμύρας, γιατί η περιοχή κατάκλισης καθαρίστηκε. Σε ορισμένες τοποθεσίες του

αστικού ιστού, μετρήθηκαν τα ίχνη από το τοπικά χαμηλότερο σημείο. Έτσι, καθώς τα νερά της πλημμύρας κυλούσαν στους δρόμους της Μάνδρας, μετρήθηκε το ύψος των ιχνών στα κτίρια από το τοπικό χαμηλότερο σημείο του εδάφους ή του οδοστρώματος. Εκτιμήθηκαν οι χρόνοι παρατήρησης των μέγιστων βαθών ροής (βλ. Πίνακα 8.3), κυρίως με βάση τις εικόνες βίντεο που περιεγράφηκαν παραπάνω, αξιοποιώντας παράλληλα συνεντεύξεις με κατοίκους και βίντεο τρίτων (Diakakis et al., 2019).

Πίνακας 8.3

Μέγιστα βάθη ροής και χρόνοι παρατήρησής τους στις θέσεις παρατήρησης Ο1 μέχρι Ο6		
Θέση παρατήρησης	Μέγιστο βάθος ροής (m)	Ώρα άφιξης μέγιστου βάθους ροής
Ο1 (ρ. Αγίας Αικατερίνης)	3.70	07:15
Ο2 (πόλη)	1.55	07:38
Ο3 (ρ. Σούρες)	2.80	08:15
Ο4 (οδός Ρόκα)	1.54	07:09
Ο5 (ρ. Σούρες)	3.65	07:30
Παλαιά Εθνική Οδός Αθηνών - Θηβών (ΠΕΟΑΘ)	-	08:15

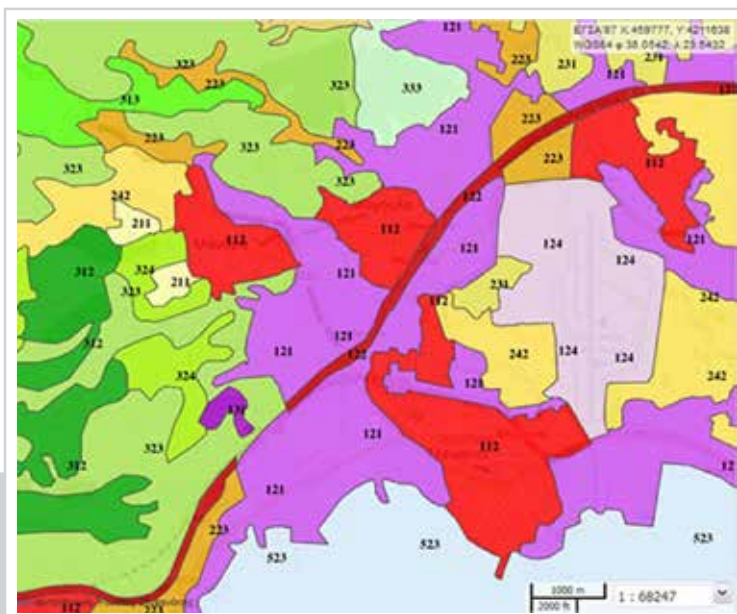
Προσδιορίστηκαν τα όρια της έκτασης κατάκλισης με βάση τις εικόνες βίντεο που περιεγράφηκαν παραπάνω (Andreadakis et al., 2020· Diakakis et al., 2019). Τα βίντεο αυτά διορθώθηκαν ή/και επιβεβαιώθηκαν, όπως περιγράφεται στους Koenig et al. (2016), χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις εδάφους που εντοπίζουν φύλλα και υπολείμματα βλάστησης τα οποία έχουν αποθεθεί ή κολληήσει στην πλημμυρική πεδιάδα, σπόρους, φερτά και γραμμές πλυσίματος στην πλημμυρική πεδιάδα και εμπλοκές φερτών στη βλάστηση, καθώς και γραμμές ξηραμένης λάσπης. Η παρατηρηθείσα περιοχή κατάκλισης φαίνεται στην Εικόνα 8.8.



Εικόνα 8.8: Παρατηρηθείσα περιοχή κατάκλισης

8.1.4 Χρήσεις γης

Για τον προσδιορισμό των χρήσεων γης στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το CORINE Land Cover 2018 (CLC, 2018). Στην Εικόνα 8.9 και στον Πίνακα 8.4 φαίνονται οι κύριες χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας με την (τριψήφια) κωδικοποίησή τους.



Εικόνα 8.9: Κύριες χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας και κωδικοποίησή τους

Πίνακας 8.4

Κύριες χρήσεις γης στην περιοχή της Μάνδρας (CLC, 2018)	
Κωδικός χρήσης	Περιγραφή χρήσης
112	Ασυνεχής αστικός ιστός
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
223	Ελαιώνες
242	Σύνθετες καλλιέργειες
313	Μικτό δάσος
323	Σκληροφυλλική βλάστηση
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις

8.1.5 Εδαφική διάβρωση των ρεμάτων

Απαιτούμενα δεδομένα

Για να προσδιοριστεί η εδαφική διάβρωση των ρεμάτων συλλέχθηκαν και αξιοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα:

- ▶ Τοπογραφικά δεδομένα, βλ. υποκεφάλαιο 8.1.2.
- ▶ Γεωλογικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής σε κλίμακα 1:25000 (Μαριοθιάκος, 2008).
- ▶ Γεωτεχνικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκε ο εδαφολογικός χάρτης της Ελλάδας (ΥΠΕΝ, 2022α), στον ιστότοπο του οποίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τον εδαφολογικό χάρτη της Ελλάδας σε μορφή shapefile. Στον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών του αρχείου αυτού ενδιαφέρει το πεδίο "VATHOS", όπου έχει κωδικοποιηθεί το πάχος του εδαφικού καλύμματος

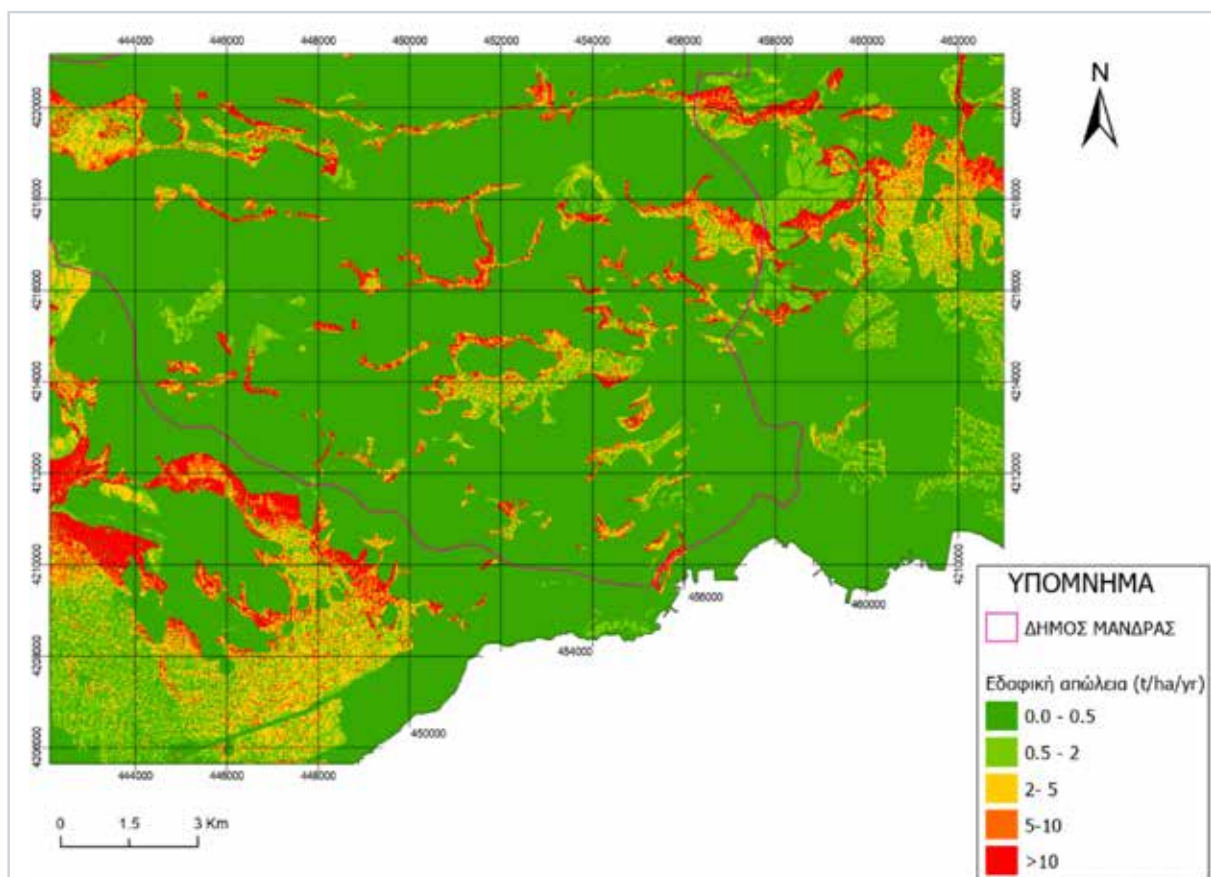
(βάθος εδάφους) με τιμές 1-9. Η τιμή '9' αντιστοιχεί σε βραχώδες έδαφος (έδαφος βάθους <5cm) και η τιμή '1' σε βαθύ έδαφος (έδαφος βάθους >30cm).

- ▶ Δεδομένα χρήσεων γης από το CORINE Land Cover (CLC, 2018), βλ. υποκεφάλαιο 8.1.4.
- ▶ Βροχομετρικά δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό Ελευσίνας της ΕΜΥ (ΕΜΥ, 2023) για την περίοδο 1958-2010 (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.3).

Μεθοδολογία υπολογισμού εδαφικής διάβρωσης

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω, εφαρμόστηκε η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE, βλ. Renard et al, 1997· Moore et al., 1993) και μεθοδολογία σε περιβάλλον GIS με τη χρήση ράστερ και του εργαλείου Raster calculator ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφονται στη συνέχεια.

- ▶ **Βήμα 1.** Προσδιορισμός του τοπογραφικού συντελεστή (LS). Χρησιμοποιήθηκε το DEM ως δεδομένο εισόδου στο ArcGIS για να δημιουργηθεί ράστερ, όπως αυτό των μορφολογικών κλίσεων (Slope) και της συγκέντρωσης ροής (Flow accumulation). Χρησιμοποιώντας τα ράστερ αυτά και εφαρμόζοντας την εξίσωση υπολογισμού του Moore (1986, 1993) δημιουργήθηκε το ράστερ του LS.
- ▶ **Βήμα 2.** Προσδιορισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας (K). Με βάση το διανυσματικό αρχείο της γεωλογίας της περιοχής, ενοποιήθηκαν οι σχηματισμοί με όμοια λιθολογία και χαρακτηριστικά. Σε κάθε ένα από αυτούς δόθηκε μια τιμή του K συνεκτιμώντας τη γεωλογία της περιοχής, τη βιβλιογραφία με έμφαση στις δημοσιεύσεις που έχουν ως περιοχή εφαρμογής τον Ελλαδικό χώρο (βλ. Bathrellos et al., 2010· Ξανθάκης κ.ά, 2017· Rozos et al., 2013), καθώς τις παρατηρήσεις πεδίου, και δημιουργήθηκε το ράστερ του K.



Εικόνα 8.10: Χάρτης εδαφικής απώλειας της ευρύτερης περιοχής της Μάνδρας

- ▶ **Βήμα 3.** Προσδιορισμός του εδαφικού καλύμματος. Τα εδάφη ταξινομήθηκαν ποιοτικά με βάση το εδαφικό τους κάλυμμα χρησιμοποιώντας το διανυσματικό αρχείο του εδαφολογικού χάρτη της Ελλάδας (ΥΠΕΝ, 2022α).
- ▶ **Βήμα 4.** Προσδιορισμός του συντελεστή φυτοκάλυψης (C). Οι τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης προσδιορίστηκαν με βάση τις χρήσεις γης και τη βιβλιογραφία (Panagos et al, 2015· Sigalos et al., 2010· Tsai et al. 2021· Bathrellos et al. 2010) και δημιουργήθηκε το ράστερ του C.
- ▶ **Βήμα 5.** Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωτικότητας λόγω βροχόπτωσης (R). Με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα υπολογίστηκε η μέση ετήσια βροχόπτωση ίση με 377.1 mm, η οποία εισήχθη στη γραμμική εξίσωση του Van der Knijff et al. (1999), υπολογίστηκαν οι τιμές του R και δημιουργήθηκε το ράστερ του.
- ▶ **Βήμα 6.** Εκτίμηση του συντελεστή διαχείρισης εδαφών (P). Θεωρήθηκε ότι η τιμή του P είναι ίση με τη μονάδα στην εξεταζόμενη περιοχή, καθόσον δεν διατίθενται επαρκείς πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή αντιδιαβρωτικών έργων. Όμως, ακόμα και αν υπήρχαν τέτοια έργα, αυτά αφορούν κυρίως τις γεωργικές εκτάσεις που καλύπτουν μικρό ποσοστό της συνολικής έκτασης.
- ▶ **Βήμα 7.** Υπολογισμός της εδαφικής απώλειας (A). Εφαρμόστηκε το μοντέλο διάβρωσης RUSLE, σύμφωνα με το οποίο η μέση ετήσια εδαφική απώλεια (t/ha/y) εξαιτίας της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής που δημιουργείται από την βροχόπτωση, υπολογίζεται από την εξίσωση με $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$. Δημιουργήθηκε το ράστερ του A και του χάρτη εδαφικής απώλειας (t/ha/y) για την ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας που φαίνεται στην Εικόνα 8.10.

Σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Η υπολογιζόμενη εδαφική απώλεια αναφέρεται στην ποσότητα εδαφικού υλικού που παρασύρεται μέσω των μηχανισμών της επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης.
- ▶ Η χαραδρωτική διάβρωση και η μεταφορά των φερτών υλικών δεν λαμβάνονται υπόψη. Θεωρείται ότι πραγματοποιείται εναπόθεση φερτών υλών στην περιοχή στην οποία εφαρμόζεται το μοντέλο.

8.1.6 Δεδομένα οδικού δικτύου

Δεδομένα και σκοπός

Πραγματοποιήθηκε συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, τα οποία αξιοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις σχετικά με το οδικό δίκτυο. Αυτές περιλάμβαναν:

- ▶ την επιλογή των κατάλληλων τμημάτων του οδικού δικτύου, τα οποία θα ενταχθούν στις οδούς διαφυγής κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος, και
- ▶ την εφαρμογή των κατάλληλων Στρατηγικών Διαχείρισης της Κυκλοφορίας, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε συνθήκες πλημμυρικού γεγονότος.

Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν για το οδικό δίκτυο της Μάνδρας είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Τοπολογικά και άλλα χρήσιμα δεδομένα του οδικού δικτύου από τον ιστότοπο OpenStreetMap (OSM, 2022), όπως π.χ. ο αριθμός λωρίδων των οδών, η λειτουργική κατάταξη του οδικού δικτύου και τα όρια ταχύτητας.
- ▶ Χρόνοι διαδρομής, για επιλεγμένα Ζεύγη Προέλευσης-Προορισμού, με υλοποίηση κατάλληλου κώδικα (script) στο Google Distance Matrix API (Google, 2022).
- ▶ Άλλα δεδομένα από σχετικές με την πλημμύρα έρευνες (Diakakis et al., 2020c).

Μεθοδολογία και υπολογισμοί

Αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία διερεύνησης και αξιολόγησης της κρισιμότητας του οδικού δικτύου της περιοχής της Μάνδρας και της επίδρασης των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών στη διαχείριση πλημμυρών. Το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο αποτελείται από τα ακόλουθα τρία βήματα:

- ▶ **Βήμα 1.** Προετοιμασία, κωδικοποίηση και προγραμματισμός.
- ▶ **Βήμα 2.** Αξιολόγηση συστήματος ως προς τα Στάδια Διαχείρισης Καταστροφών - Σενάρια ολοκληρωμένης διαχείρισης κυκλοφορίας.
- ▶ **Βήμα 3.** Αξιολόγηση σεναρίων και βέλτιστες επεμβάσεις.

Στο βήμα 1 πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία του κατευθυνόμενου αβαρούς γράφου (directed unweighted graph), ο οποίος αποτέλεσε το οδικό δίκτυο αναφοράς για την περιοχή της Μάνδρας. Παράλληλα, με χρήση των αντιλούμενων χρόνων διαδρομής από το Google Distance Matrix API και τη χρήση βιβλιογραφικών πηγών (Diakakis et al., 2020) προσδιορίστηκε ο κυκλοφοριακός φόρτος του δικτύου.

Το βήμα 2 αφορά στην αξιολόγηση του συστήματος ως προς τα τρία Στάδια Διαχείρισης Καταστροφών και στον καθορισμό των σεναρίων διαχείρισης της κυκλοφορίας. Σχετικά με την αξιολόγηση του συστήματος ως προς αυτά, εκείνο το οποίο κρίνεται σημαντικό για το ΣΕΠΠ της Μάνδρας είναι οι εργασίες υπολογισμού της τρωτότητας και της κρισιμότητας του οδικού δικτύου. Για τον υπολογισμό της τρωτότητας πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της σημαντικότητας των κόμβων (centrality), καθόσον σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αυτή αποτελεί ένα από τα βασικότερα μεγέθη προσδιορισμού της. Για να υπολογιστεί η σημαντικότητα των κόμβων του δικτύου της Μάνδρας, υλοποιήθηκε κατάλληλος κώδικας (script, σε γλώσσα προγραμματισμού R) με εφαρμογή των μεθοδολογιών υπολογισμού της σημαντικότητας των κόμβων, σύμφωνα με την έρευνα του Freeman (1978). Για την κρισιμότητα των συνδέσμων (links) του οδικού δικτύου της Μάνδρας υλοποιήθηκε σχετικός κώδικας (σε γλώσσα προγραμματισμού Python), ο οποίος υλοποιεί τη σχετική μεθοδολογία, όπως περιγράφεται στους Nagurney και Qiang (2008).

Για τα σενάρια κυκλοφορίας, έγινε επιλογή κατάλληλων Στρατηγικών Διαχείρισης Κυκλοφορίας, με ενσωμάτων τεχνολογιών (Συνεργατικών) Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών και τα σενάρια που διερευνήθηκαν περαιτέρω είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Σενάριο 1.** Διερεύνηση της επίδρασης της πλημμύρας χωρίς την εφαρμογή κάποιας Στρατηγικής Ελέγχου της Κυκλοφορίας (Do-nothing scenario).
- ▶ **Σενάριο 2.** Διερεύνηση της επίδρασης της πλημμύρας με εφαρμογή μιας στρατηγικής πληροφόρησης και αναδρομολόγησης
- ▶ **Σενάριο 3.** Διερεύνηση της επίδρασης της πλημμύρας με εφαρμογή μιας στρατηγικής πληροφόρησης και αναδρομολόγησης σε συνδυασμό με την ύπαρξη συνεργατικής επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο αστικό οδικό δίκτυο της Μάνδρας (Επικοινωνία από Όχημα σε Όχημα – V2V communications)

Το Βήμα 3 περιελάμβανε τη διενέργεια των κατάλληλων προσομοιώσεων για την αξιολόγηση της επίδρασης των επιλεγμένων Στρατηγικών Διαχείρισης Κυκλοφορίας σχετικά με την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της πλημμύρας στο οδικό δίκτυο της Μάνδρας.

Συμπεράσματα

Στον Πίνακα 8.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το Business-as-usual (μηδενικό) σενάριο και για τρία σενάρια διαχείρισης κυκλοφορίας σε συνθήκες πλημμύρας.

Πίνακας 8.5

Σύνοψη των επιπτώσεων των επικίνδυνων καιρικών φαινομένων στην κυκλοφορία				
Μετρική	Μηδενικό σενάριο	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Μέσο μήκος διαδρομής (m)	982.17	2890.76	2434.26	2045.55
Μέση ταχύτητα κίνησης οχημάτων (km/h)	37.91	8.93	24.62	33.08
Μέση διάρκεια κίνησης οχημάτων (s)	138.59	8637.62	2266.34	978.32
Διανυθέντα οχηματοχιλιόμετρα (km)	9484.82	7406.13	17431.74	17970.16
Οχήματα τα οποία εισήχθησαν στην προσομοίωση	9657	2562	7161	8785
Οχήματα τα οποία παρέμειναν στην προσομοίωση μετά το πέρας της προκαθορισμένης διάρκειάς της	280	2055	2854	1389
Εξυπηρετούμενα οχήματα	9377	507	4307	7396

Από την περαιτέρω εξέταση των τριών σεναρίων σε σχέση με το σενάριο Business-as-usual, προκύπτει ότι, τόσο η επίδραση της πλημμύρας στην απόδοση του αστικού οδικού δικτύου της Μάνδρας, όσο και ότι η εφαρμογή Στρατηγικών Διαχείρισης της Κυκλοφορίας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου κατά τη διάρκεια ενός καταστροφικού γεγονότος. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι, στη συγκεκριμένη έρευνα, η απόδοση του δικτύου δε θα μπορέσει ποτέ να προσεγγίσει την απόδοσή του χωρίς την επίδραση της πλημμύρας. Αυτό συμβαίνει καθώς το μέρος του αστικού οδικού δικτύου της Μάνδρας το οποίο είχε επηρεαστεί από την πλημμύρα είναι αρκετά μεγάλο σε έκταση. Ακόμη, ένα άλλο γεγονός το οποίο συντελεί στο συμπέρασμα αυτό είναι ότι η επίδραση του γεγονότος εκτεινόταν και στην πρωινή ώρα αιχμής, ώρα κατά την οποία η ζήτηση στο δίκτυο είναι αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες ώρες. Είναι ακόμη εμφανές από την εξέταση των αποτελεσμάτων ότι η ύπαρξη μόνο συμβατικών μεθόδων διαχείρισης της κυκλοφορίας, κάτι το οποίο υλοποιείται εδώ μέσω των αναδρομοηγητών, δε μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών όπως τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, κάτι το οποίο υλοποιείται εδώ μέσω της ύπαρξης συνεργατικής επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο αστικό οδικό δίκτυο της Μάνδρας μπορεί να βοηθήσει αρκετά στη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου καθώς συνεισφέρει στην ανταλλαγή κωδικοποιημένων μηνυμάτων μεταξύ των οχημάτων αναφορικά με τις συνθήκες κίνησης στο δίκτυο, με αποτέλεσμα τα οχήματα να προσαρμόζουν συνεχώς την πορεία τους και έτσι να κινούνται βέλτιστα στο αστικό οδικό δίκτυο.

Οι διαδικασίες που περιεγράφηκαν παραπάνω (υπολογισμός σημαντικότητας κόμβων, υπολογισμός κρισιμότητας συνδέσμων, επιδράσεις Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών στην απόδοση του οδικού δικτύου μέσω κατάλληλων Στρατηγικών Διαχείρισης Κυκλοφορίας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο ενός ΣΕΠΠ. Η χρησιμότητά τους αφορά αφενός στην προγενέστερη ανάλυση του δικτύου (υπολογισμός σημαντικότητας κόμβων, υπολογισμός κρισιμότητας συνδέσμων), αφετέρου στην επιλογή των κατάλληλων τμημάτων που μπορούν δυνητικά να προκαλέσουν μεγάλη απώλεια αποδοτικότητας του δικτύου αν κλείσουν λόγω κάποιου συμβάντος. Ακόμη, οι Στρατηγικές Διαχείρισης Κυκλοφορίας μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διατήρηση της αποδοτικότητας, ή ακόμα και για τη βελτίωση της απόδοσης, του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της δράσης ενός καταστροφικού γεγονότος όπως το πλημμυρικό γεγονός της Μάνδρας.

8.1.7 Δεδομένα θέσεων υδροληψίας

Στο Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας (ΕΜΣΥ, 2022) βρίσκονται οι συντεταγμένες των σημείων υδροληψίας στην κάθε λεκάνη απορροής, όπως πηγάδια, γεωτρήσεις, πηγές κλπ., που μπορεί να είναι ενεργά ή όχι. Το ΕΜΣΥ είναι ηλεκτρονικό μητρώο, το οποίο αναπτύσσεται και τηρείται στο ΥΠΕΝ με τη μορφή συστήματος βάσης γεωχωρικών δεδομένων και υπηρεσιών.

8.1.8 Υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων

Στο σχεδιαζόμενο Δίκτυο Παρακολούθησης (ΔΠ) προβλέπονται νέοι υδρομετεωρολογικοί και υδρομετρικοί σταθμοί (βλ. υποκεφάλαιο 8.2.3).

Για τη μετάδοση των δεδομένων των νέων απομακρυσμένων σταθμών παρατήρησης του ΔΠ στο ΚΠΠ προβλέπεται η χρήση του δικτύου της κυψελωτής τηλεφωνίας της εταιρείας Cosmote, με το πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης NB-IoT (Narrowband - Internet of Things).

Το πρωτόκολλο NB-IoT είναι περισσότερο σύγχρονο από άλλα αντίστοιχα πρωτόκολλα, όπως τα 3G και 4G/LTE, τα οποία είναι διαθέσιμα στην περιοχή της Μάνδρας. Το πρωτόκολλο NB-IoT επιλέγεται για τους παρακάτω λόγους:

- ▶ Το NB-IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω των υφιστάμενων δικτύων κυψελωτής τηλεφωνίας στη Μάνδρα Αττικής.
- ▶ Η χρήση του NB-IoT μέσω των υφιστάμενων δικτύων κυψελωτής τηλεφωνίας δεν απαιτεί το σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη διαχείριση και τη συντήρηση ιδιόκτητου δικτύου μετάδοσης δεδομένων.
- ▶ Η χρήση του NB-IoT έχει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για τη μετάδοση δεδομένων από τα άλλα αντίστοιχα διαθέσιμα πρωτόκολλα.
- ▶ Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί με βάση το NB-IoT καλύπτει τους απαιτούμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από τους σταθμούς του ΔΠ στο ΚΠΠ.



Εικόνα 8.11: Χάρτης εδαφικής κάλυψης 5G/4G+/4G στη Μάνδρα Αττικής (Πηγή: NPERF, 2023)

- ▶ Τα δεδομένα των σταθμών παρατήρησης πρέπει να μεταδίδονται στο ΚΠΠ κάθε 15 min. Με τη χρήση του NB-IoT υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων των σταθμών παρατήρησης στο ΚΠΠ κάθε 1 min.

Στην Εικόνα 8.11 φαίνεται η εδαφική κάλυψη για τα δίκτυα που βασίζονται στις τεχνολογίες 5G/4G+/4G. Το NB-IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω των δικτύων αυτών. Με βάση την εδαφική κάλυψη της περιοχής εφαρμογής, προτείνεται ο πάροχος του δικτύου να είναι η Cosmote.

8.1.9 Δεδομένα πλημμυρικής τρωτότητας

Γενικά

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν δυο μέθοδοι προσδιορισμού της πλημμυρικής τρωτότητας, οι οποίες περιγράφονται στο κεφάλαιο 5. Στην πρώτη μέθοδο χρησιμοποιείται το στοιχείο κινδύνου «κτίριο» και προσδιορίζονται τα σχετικά χαρακτηριστικά τους (βλ. υποκεφάλαιο 5.4). Στη δεύτερη μέθοδο που εφαρμόζεται στα ΣΔΚΠ προσδιορίζονται και καταγράφονται οι δείκτες χρήσεων (βλ. υποκεφάλαιο 5.3).

Χαρακτηριστικά τρωτότητας κτιρίων

Πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των δεδομένων τρωτότητας που αναφέρονται στον Πίνακα 8.6 με επισκέψεις στην περιοχή εφαρμογής. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπέστησαν επεξεργασία και αποθηκεύτηκαν για κάθε κτίριο σε βάση δεδομένων που περιλαμβάνει 1070 κτίρια και 7844 τιμές τους. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν οι πέντε χάρτες με το αντικείμενο, την αρίθμηση εικόνας και τις χρωματικές σημάνσεις που φαίνονται στον Πίνακα 8.6. Στους χάρτες αυτούς σημειώνονται με μπλε γραμμή τα όρια της περιοχής κατάκλισης. Στην περίπτωση που σημειώνεται «άγνωστο», το χαρακτηριστικό αυτό δεν προσδιορίστηκε εξαιτίας αδυναμίας πρόσβασης.

Πίνακας 8.6

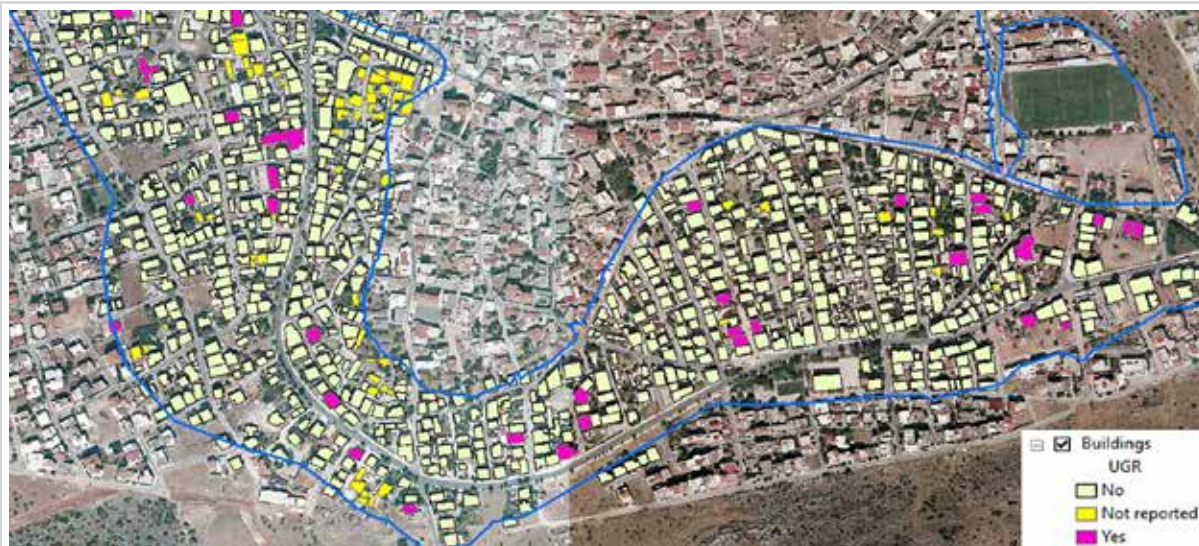
Τα αντικείμενα των πέντε χαρτών και οι χρωματικές σημάνσεις τους				
Αντικείμενο χάρτη (Αρίθμηση εικόνας)	Χρωματισμός			
Όρια των κτιρίων (Εικόνα 8.12)	-	-	-	-
Θέση χαμηλότερου ανοίγματος σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους (Εικόνα 8.13)	Κόκκινο Κάτω	Μπλε Πάνω	Ροζ Στο ίδιο	Κίτρινο Άγνωστο
Ύπαρξη ράμπας υπογείου γκαράζ (Εικόνα 8.14)	Ροζ Ναι	Λαχανί Όχι		Κίτρινο Άγνωστο
Ύπαρξη παράθυρου σε υπόγειο χώρο (Εικόνα 8.15)	Πράσινο Ναι	Ανοιχτό κόκκινο Όχι		Ροζ Άγνωστο
Ύπαρξη και θέση πιλοτής σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους (Εικόνα 8.16)	Πράσινο Κάτω	Πορτοκαλί Όχι	Ροζ Στο ίδιο	



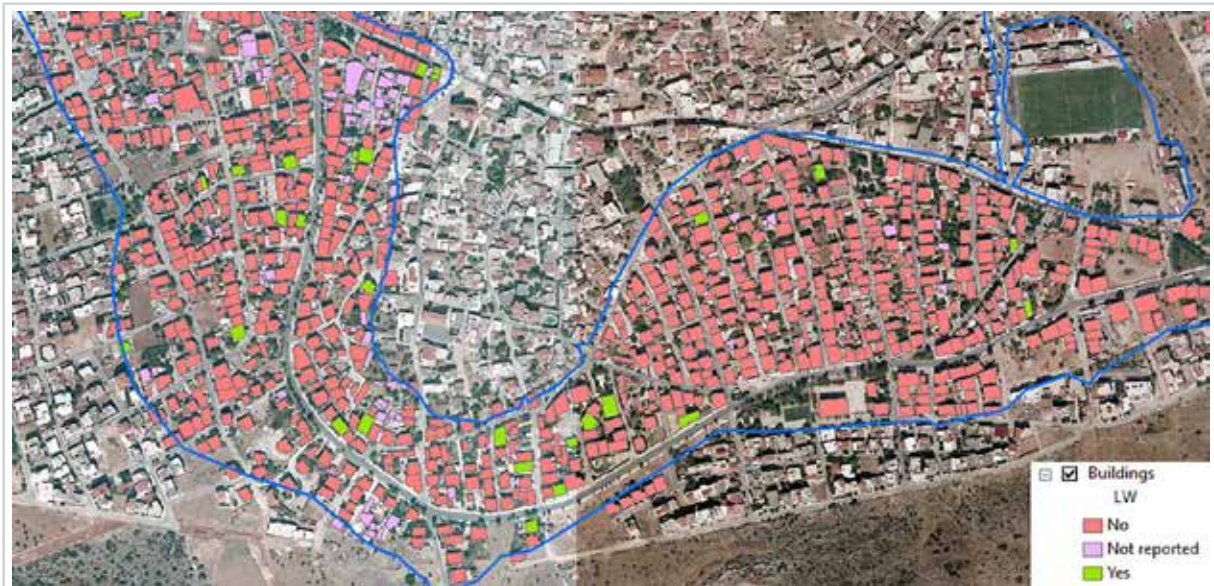
Εικόνα 8.12: Τμήμα της πόλης της Μάνδρας με τα όρια των κτιρίων



Εικόνα 8.13: Τμήμα της πόλης της Μάνδρας με το χαρακτηρισμό της θέσης του χαμηλότερου ανοίγματος του κτιρίου



Εικόνα 8.14: Τμήμα της πόλης της Μάνδρας με τον χαρακτηρισμό της ύπαρξης ράμπας υπόγειου γκαράζ



Εικόνα 8.15: Τμήμα της πόλης της Μάνδρας με τον χαρακτηρισμό της ύπαρξης παράθυρου σε υπόγειο χώρο

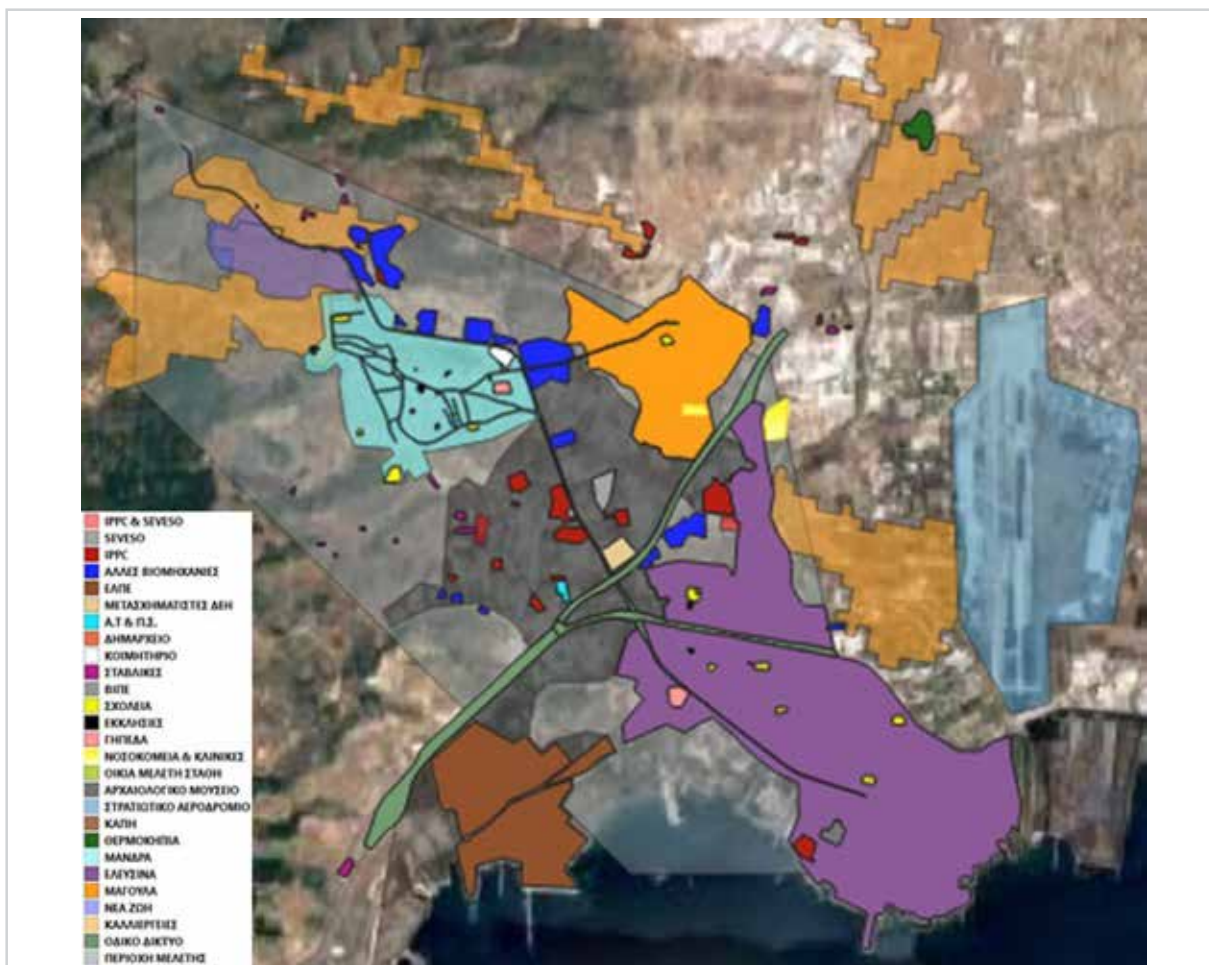


Εικόνα 8.16: Τμήμα της πόλης της Μάνδρας με τον χαρακτηρισμό της ύπαρξης πιλοτής και της θέσης της

Δείκτες χρήσεων

Πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων:

- ▶ **Βήμα 1.** Συλλήχθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα για όλες τις κατηγορίες δεικτών χρήσεων που αφορούν την περιοχή της Μάνδρας: (α) τα όρια των χρήσεων γης του πολεοδομικού σχεδίου στην περιοχή της Μάνδρας (ΥΠΕΝ, 2022γ), (β) οι χρήσεις γης σύμφωνα με το CORINE Land Cover 2018 (CLC, 2018), και το ΣΔΚΠ της Αττικής (ΥΠΕΝ, 2018). Τα παραπάνω δεδομένα διαμορφώθηκαν μετά από επεξεργασία σε αρχεία μορφής SHP (βλ. Εικόνα 8.17).
- ▶ **Βήμα 2.** Εισήχθησαν στο πρόγραμμα QGIS τα αρχεία shp και κάθε ένα έλαβε μια βαθμολογία σύμφωνα με τη μεθοδολογία των ΣΔΚΠ, βλ. υποκεφάλαιο 5.3.3. Π.χ. το αρχείο της πολεοδομικής έκτασης της Μάνδρας έλαβε βαθμολογία 250 για τη κατηγορία «Αστικές συγκεντρώσεις με πυκνότητα < 80 άτομα/ha» και βαθμολογία 100 για την κατηγορία δεικτών χρήσεων «εξωαστικές συγκεντρώσεις», δηλ. έλαβε συνολική βαθμολογία ίση με 350.



Εικόνα 8.17: Κατηγοριοποίηση των δεικτών χρήσεων γης

- **Βήμα 3.** Τα αρχεία shp μετατράπηκαν σε ψηφιδωτά αρχεία (Raster), με τα οποία μπορούν να γίνονται πράξεις μεταξύ αρχείων. Τα αρχεία αυτά αποτελούν τα επεξεργασμένα δεδομένα υπολογισμού της τρωτότητας.

Πίνακας 8.7

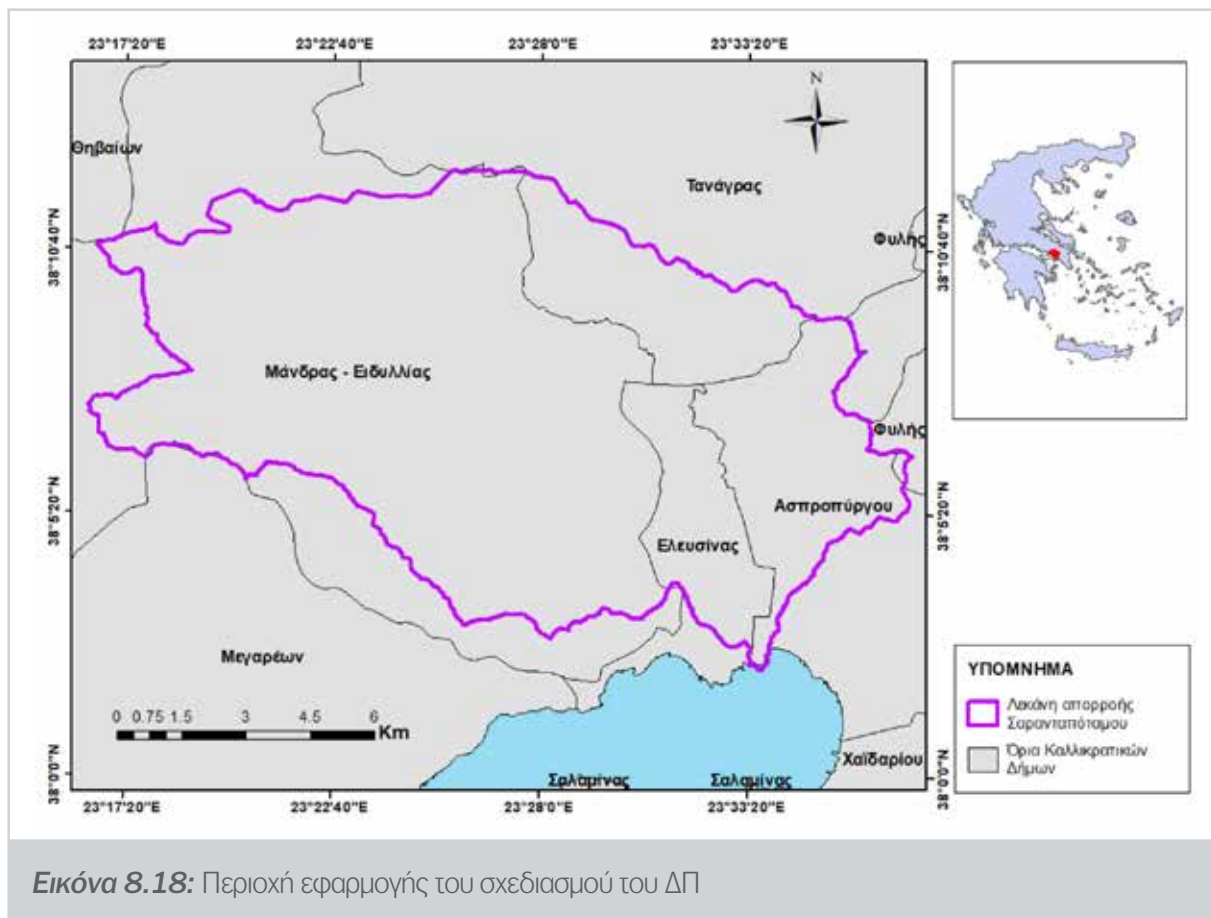
Κατηγορίες δεικτών χρήσεων στην περιοχή διερεύνησης	
Δείκτες Χρήσεων	Καταγραφή
Αστικές συγκεντρώσεις με πυκνότητα < 80 άτομα/ha και σε «εξαστικές συγκεντρώσεις».	Μάνδρα (62.77 α.α./ha), Μαγούλα (32.24 α.α./ha), Νέα Ζωή (9.98 α.α./ha), και Ελευσίνα (41.20 α.α./ha).
Νοσοκομεία (λόγω πιθανής κατάκλισης των υποδομών λειτουργίας τους).	Attica - Κέντρο Αποκατάστασης, Θριάσιο Γενικό Νοσοκομείο Ελευσίνας.
Άλλες κοινωνικές υποδομές π.χ. νηπιαγωγεία, σχολεία, πανεπιστήμια, Μονάδες Φροντίδας Ηλικιωμένων.	13 Σχολεία (Νηπιαγωγεία, Δημοτικά Λύκεια), ΚΑΠΗ Μάνδρας, Κοιμητήριο Μάνδρας, Δημαρχείο Μάνδρας, 10 Εκκλησίες, Φράγκειο Δημοτικό Γήπεδο, Κλειστό Γυμναστήριο «Ανδρέας Δασκαλάκης».
Υποδομές κοινής ωφέλειας π.χ. ΕΕΝ, κοινοτικές γεωτρήσεις ύδρευσης, τα σημαντικότερα αντλιοστάσια ύδρευσης (σταθμοί – υποσταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας).	Μετασχηματιστές Δ.Ε.Η. στην διασταύρωση ΠΕΟΑΘ με Αττική Οδό.

Υποδομές μηχανισμού πολιτικής προστασίας π.χ. αστυνομία ή πυροσβεστική και κεντρικές εγκαταστάσεις ΕΚΑΒ.	Αστυνομικό Τμήμα Μάνδρας, Διαχείριση Υλικού Πυροσβεστικού Σώματος.
Αγροτικές περιοχές με θερμοκήπια.	Θερμοκήπια Μαγούλας «Green Houses».
Αγροτικές περιοχές με καλλιέργειες.	Ελαιώνες (Μόνιμες Καλλιέργειες), Ετερογενείς Γεωργικές Περιοχές (Σύνθετες Καλλιέργειες).
Κτηνοτροφικές μονάδες (σταβλικές εγκαταστάσεις στοιχεία του ΟΠΕΚΕΠΕ).	22 Σταβλικές εγκαταστάσεις.
Αναπτυγμένες τουριστικές περιοχές, σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο για τον Τουρισμό (Άρθρο 4 του ΦΕΚ 1138 Β/2009).	Αρχαιολογικό Μουσείο Ελευσίνας.
Αναπτυσσόμενες τουριστικές περιοχές, σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο για τον Τουρισμό (Άρθρο 4 του ΦΕΚ 1138 Β/2009).	Οικία ιδιοκτησίας Μελέτη Στάθη.
«Βιομηχανικές συγκεντρώσεις» (θεσμοθετημένες ΒΙΠΕ και άλλες «άτυπες βιομηχανικές συγκεντρώσεις»).	Θεσμοθετημένη Βιομηχανική Περιοχή, Ελληνικά Πετρέλαια (ΕΛΠΕ).
Βιομηχανίες SEVESO, IPPC εκτός βιομηχανικών συγκεντρώσεων.	3 Seveso (ELLAGRET, ECOLAB, LINDE), 16 IPPC, 2 Seveso & IPPC.
Λοιπές μεμονωμένες βιομηχανικές μονάδες εκτός βιομηχανικών συγκεντρώσεων.	17 Λοιπές μεμονωμένες βιομηχανικές μονάδες.
Διακοπή διευρωπαϊκού και πρωτεύοντος εθνικού οδικού δικτύου (σε αυτοκινητόδρομους), ενεργούς σιδηροδρομικούς άξονες και αεροδρόμια.	ΝΑΙ.
Διακοπή δευτερεύοντος εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου.	ΝΑΙ.
Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις για Βιομηχανικές εγκαταστάσεις IPPC ή Seveso και Μνημεία, στον βαθμό που κρίνεται ότι είναι ευάλωτες σε πλημμύρες.	3 Seveso (ELLAGRET, ECOLAB, LINDE), 2 Seveso & IPPC.
Μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς εθνικής και περιφερειακής σημασίας.	Οικία ιδιοκτησίας Μελέτη Στάθη, Αρχαιολογικό Μουσείο Ελευσίνας.

8.2 Βήμα 2: Σχεδιασμός του Δικτύου Παρακολούθησης

8.2.1 Καθορισμός της περιοχής εφαρμογής

Στο σχεδιασμό του ΣΕΠ επιλέχθηκε ως περιοχή εφαρμογής η ευρύτερη λεκάνη απορροής του ρ. Σαρανταπόταμου με στόχο το σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου ΔΠ που εξυπηρετεί όλους τους οικισμούς της ευρύτερης αυτής περιοχής, περιλαμβανομένης της πόλης της Μάνδρας. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε στην αρχή του έργου θεωρώντας ότι στην περιοχή της Μάνδρας μπορεί να αξιοποιηθεί στο προτεινόμενο ΔΠ το δίκτυο FloodHub (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.3). Η περιοχή αυτή φαίνεται στην Εικόνα 8.18.



Εικόνα 8.18: Περιοχή εφαρμογής του σχεδιασμού του ΔΠ

8.2.2 Προσδιορισμός και αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης

Εντοπίστηκαν οι κύριοι μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή, οι οποίοι περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 8.1.3. Με βάση την εμπειρία της πλημμύρας του Νοεμβρίου 2017, οι σταθμοί αυτοί δεν φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσουν τμήμα του ΔΠ, εξαιτίας τόσο της γεωγραφικής τους θέσης όσο και της πυκνότητάς τους, χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν ένα δίκτυο αντιπροσωπευτικό για την παρακολούθηση της βροχόπτωσης σε μια περιοχή, και που για την εξεταζόμενη περίπτωση υπάρχει απαίτηση για ένα ολοκληρωμένο ΔΠ ανάντη των οικισμών (Theochari et al., 2019, 2021).

Επίσης, δεν μπορεί να αξιοποιηθούν ακόμα οι διαθέσιμες μετρήσεις των σταθμών του ΔΠ του FloodHub, μέχρι τη βαθμονόμησή τους (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.3). Έτσι, προς το παρόν αυτοί οι σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν ως εφεδρικοί.

8.2.3 Βέλτιστη χωροθέτηση των υδρομετεωρολογικών και των υδρομετρικών σταθμών

Μεθοδολογία σχεδιασμού

Εφαρμόζεται η μεθοδολογία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.6.2.

Βέλτιστη χωροθέτηση υδρομετεωρολογικών σταθμών

Βήμα 1. Καθορισμός του αριθμού των μετρητικών σταθμών. Χρησιμοποιείται ο Πίνακας 3.5 (βλ. κεφάλαιο 3) που διαμορφώνεται με τη μορφή του Πίνακα 8.8, από τον οποίο προκύπτει ότι ο επιθυμητός αριθμός των υδρομετεωρολογικών σταθμών είναι ίσος με 3.

Πίνακας 8.8

Ζώνες υψομέτρων και επιθυμητός αριθμός των υδρομετεωρολογικών σταθμών				
Ζώνη	Ζώνες υψομέτρων (m)	Έκταση (km ²)	Έκταση ενός σταθμού (km ²)	Αριθμός σταθμών
A	0-200	71	600	0
B	200-500	163	100	2
Γ	500-800	90	75	1
Δ	800-1200	17	50	0
E	1200-1900	0	50	
Σύνολο	-	341	-	3

Βήμα 2. Επιλογή των κριτηρίων βέλτιστης χωροθέτησης. Επιλέχθηκαν και τα οκτώ κριτήρια που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.6.2 και θεωρούνται ως κύρια τα Κ2, Κ4, Κ5 και Κ6.

- ▶ **Κ1. Υψόμετρο.** Δημιουργήθηκε χάρτης με τις πέντε ζώνες υψομέτρων.
- ▶ **Κ2. Ήπιες κλίσεις εδάφους.** Δημιουργήθηκε χάρτης (Boolean) σε περιβάλλον GIS, στον οποίο αποδόθηκε η τιμή 1 στις επιτρεπόμενες κλίσεις εδάφους (<5%) και την τιμή 0 στις μη αποδεκτές (>5%).
- ▶ **Κ3. Είδη κάλυψης γης.** Δημιουργήθηκε χάρτης με τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες ειδών επιφάνειας κάλυψης: (1) τεχνητές επιφάνειες, (2) αγροτικές περιοχές, (3) δάση και ημι-φυσικές περιοχές, και (4) υδάτινες επιφάνειες - συλλογές υδάτων, και επιχειρήθηκε να τοποθετηθούν οι σταθμοί σε περιοχές που να καλύπτουν όλες τις κατηγορίες.
- ▶ **Κ4. Εγγύτητα σε οικισμούς.** Δημιουργήθηκε χάρτης με τις περιοχές που απέχουν μέχρι 1 km από τους μεγάλους οικισμούς και 500 m από τους μικρούς οικισμούς, ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση των υπευθύνων για τις μετρήσεις (εφόσον αυτό απαιτηθεί) και την επίβλεψη/προστασία των οργάνων.
- ▶ **Κ5. Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο.** Δημιουργήθηκε χάρτης με τις περιοχές που απέχουν απόσταση μέχρι 200 m από το οδικό δίκτυο. Τα δεδομένα του οδικού δικτύου ελήφθησαν από το OpenStreet maps και χρησιμοποιήθηκαν τα θεματικά επίπεδα μέχρι και τη δεύτερη τάξη αγροτικών δρόμων (grade 2-track road), δηλ. οδών με επίστρωση ασφάλτου ή χονδρού χαλικιού, ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση σε όλες τις εποχές από συμβατικά οχήματα.
- ▶ **Κ6. Εγγύτητα σε σημεία υδροληψίας.** Δημιουργήθηκε χάρτης με τις περιοχές που απέχουν απόσταση μέχρι 500 m από τα σημεία υδροληψίας του Εθνικού Μητρώου Σημείων Υδροληψίας (ΕΜΣΥ, 2022), βλ. υποκεφάλαιο 8.1.7.
- ▶ **Κ7. Διοικητικά κριτήρια.** Η ευθύνη για τη διοίκηση και τη λειτουργία του προτεινόμενου δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών υπάγεται στα όρια του Δήμου Μάνδρας-Ειδυλλίας, όπως αυτά καθορίστηκαν με βάση το Πρόγραμμα «Καλλικράτης» (ν. 3852/2010). Εφόσον σχεδιάζεται το δίκτυο στη λεκάνη απορροής του ρ. Σαρανταπόταμου θεωρήθηκε το σύνολο της περιοχής που φαίνεται στην Εικόνα 8.18.
- ▶ **Κ8. Γεωμετρικά κριτήρια.** Για την καλύτερη κάλυψη κάθε υψομετρικής ζώνης (βλ. Πίνακα 3.5) επιδιώχθηκε οι θέσεις των σταθμών να ισαπέχουν και να καλύπτουν ομοίμορφα κάθε ζώνη.

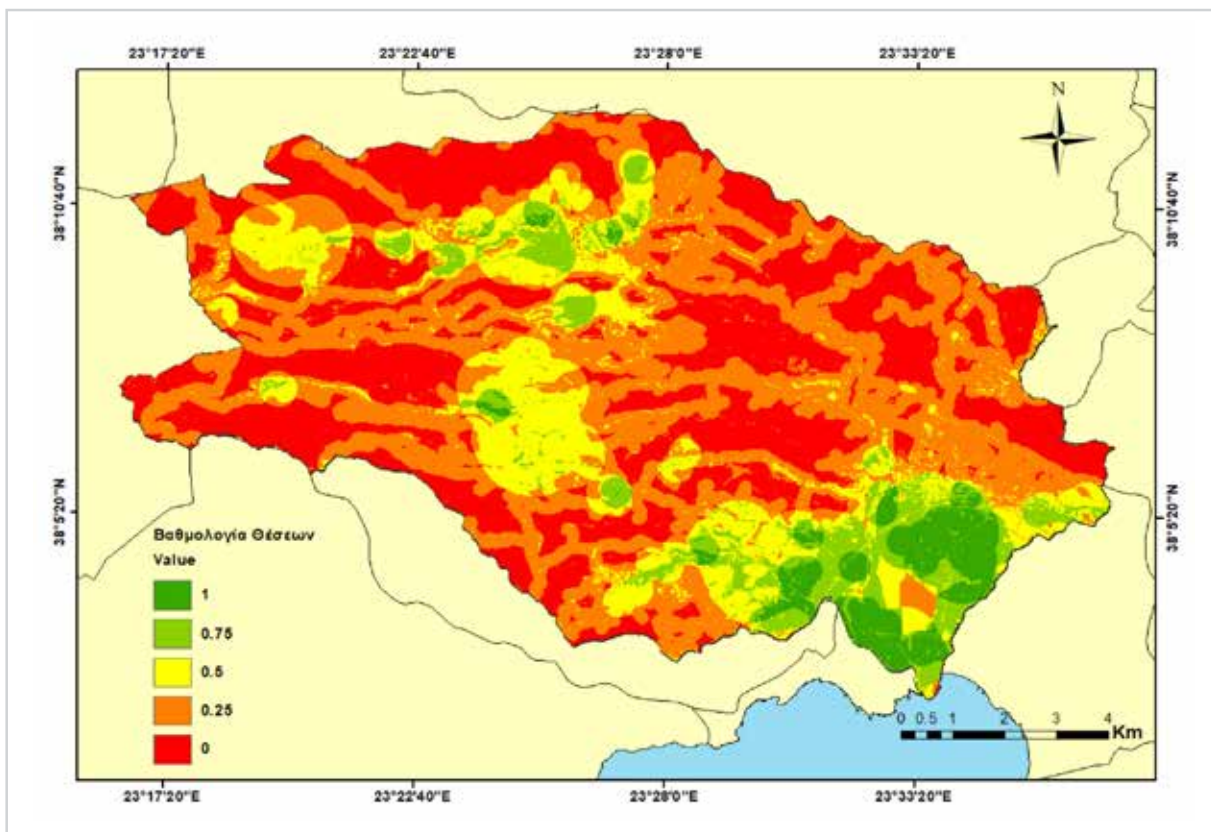
Βήμα 3. Τυποποίηση/ταξινόμηση κριτηρίων σε περιβάλλον GIS. Εφαρμόστηκε η διαδικασία της ταξινόμησης που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.6.2 και μετασχηματίστηκαν τα κριτήρια ώστε να έχουν τιμές από 0 μέχρι 1.

Βήμα 4. Επιλογή μεθόδου σύνθεσης κριτηρίων. Για τη σύνθεση των παραπάνω κριτηρίων εφαρμόστηκε η μέθοδος WLC (βλ. υποκεφάλαιο 3.6.2).

Βήμα 5. Καθορισμός συντελεστών βαρύτητας. Οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας των τεσσάρων κύριων κριτηρίων τέθηκαν ίσες με 0.25.

Βήμα 6. Σύνθεση κριτηρίων και καθορισμός βέλτιστων θέσεων. Εφαρμόστηκε η μέθοδος WLC σε περιβάλλον GIS και μέσω της εξίσωσης (3.11) προέκυψε ο χάρτης της Εικόνας 8.19 με τη βαθμολογία των θέσεων των υδρομετεωρολογικών σταθμών. Οι περιοχές του χάρτη με τιμή 1 είναι ιδανικές για τη χωροθέτηση και αυτές με τιμή 0 είναι ακατάλληλες.

Στον τελικό καθορισμό των θέσεων των υδρομετεωρολογικών σταθμών, ελέγχθηκε η ισχύς των υπόλοιπων τεσσάρων κριτηρίων K1, K3, K7 και K8.



Εικόνα 8.19: Χάρτης βαθμολογίας των θέσεων των υδρομετεωρολογικών σταθμών

Βέλτιστη χωροθέτηση υδρομετρικών σταθμών

Βήμα 1. Καθορισμός του αριθμού των μετρητικών σταθμών. Η περιοχή μελέτης αντιστοιχεί σε τύπο πεδιάδας, οπότε σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6 (βλ. κεφάλαιο 3), απαιτείται ένας υδρομετρικός σταθμός. Για λόγους ασφαλείας, προτείνεται η εγκατάσταση δυο υδρομετρικών σταθμών.

Βήμα 2. Επιλογή των κριτηρίων βέλτιστης χωροθέτησης. Επιλέχθηκαν και τα πέντε κριτήρια που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.6.2.

- ▶ **K1. Εδάφη με ήπιες κλίσεις.** Υπολογίστηκαν οι τοπογραφικές κλίσεις στην περιοχή και ταξινομήθηκαν σε πέντε κλάσεις τυποποιώντας την κάθε μια.
- ▶ **K2. Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο.** Επιλέχθηκαν οι θέσεις κατά μήκος του κάθε ρέματος που απέχουν απόσταση μέχρι 50 m από το οδικό δίκτυο.
- ▶ **K3. Μακριά από συμβολές ρεμάτων.** Προσδιορίστηκε μια περιμετρική ζώνη εύρους 250 m, στην οποία δεν πρέπει να εγκατασταθεί υδρομετρικός σταθμός.
- ▶ **K4. Εγγύτητα σε οικισμούς.** Καθορίστηκαν τα όρια των κύριων οικισμών σύμφωνα με το σύνολο δεδομένων του CORINE Land Cover (CLC, 2018), επιλέγοντας την κατηγορία με κωδικό 112 (βλ. Πίνακα 10.1-4) και των μικρότερων οικισμών μετά από ψηφιοποίηση.
- ▶ **K5. Ανάντη περιοχών που πλημμυρίζουν.** Επιλέχθηκαν θέσεις κοντά σε περιοχές που πληττονται περισσότερο από πλημμύρες και ανάντη των ευάλωτων περιοχών. Αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της εργασίας των Feloni et al. (2021) που αποτελεί μια GIS-based MCDM που πραγματοποιήθηκε με στόχο την εύρεση της βέλτιστης τεχνικής για τον καθορισμό των ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών, με μελέτη περίπτωσης την περιοχή της Αττικής που περιλαμβάνει την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής.

Βήμα 3. Τυποποίηση/ταξινόμηση κριτηρίων σε περιβάλλον GIS. Για τα κριτήρια K2, K3, K4, και K5 χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της τυποποίησης και για το K1 η μέθοδος της ταξινόμησης σε πέντε κλάσεις (βλ. κεφάλαιο 3). Τα κριτήρια αυτά μετασχηματίστηκαν έτσι ώστε να έχουν εύρος τιμών από 0 μέχρι 1.

Βήμα 4. Επιλογή μεθόδου σύνθεσης κριτηρίων. Για να γίνει η σύνθεση των παραπάνω κριτηρίων εφαρμόστηκε η μέθοδος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Βήμα 5. Καθορισμός συντελεστών βαρύτητας. Προσδιορίστηκαν οι συντελεστές βαρύτητας που φαίνονται στον Πίνακα 8.9 θεωρώντας τα ακόλουθα τρία σενάρια βέλτιστης χωροθέτησης:

- ▶ Σενάριο 1. Αποδίδεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα τεχνικά κριτήρια K1, K2 και K4.
- ▶ Σενάριο 2. Αποδίδεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα κριτήρια K3, K4 και K5 που αφορούν κυρίως την αντιπλημμυρική προστασία και κατά συνέπεια τη δόμηση ενός ΣΕΠΠ.
- ▶ Σενάριο 3. Αποτελεί συνδυασμό των σεναρίων 1 και 2. Το σενάριο αυτό υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες AHP και FAHP (βλ. κεφάλαιο 3).

Πίνακας 8.9

Συντελεστές βαρύτητας των πέντε κριτηρίων				
Κριτήριο	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3 (AHP)	Σενάριο 3 (FAHP)
K1	0.566	0.474	0.476	0.565
K2	0.183	0.039	0.118	0.000
K3	0.124	0.036	0.061	0.000
K4	0.060	0.166	0.032	0.000
K5	0.067	0.284	0.312	0.435

Με βάση τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας του Πίνακα 8.9 και τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Το κριτήριο K1 είναι το προτιμότερο για όλα τα σενάρια, ενώ το κριτήριο K4 έχει τον μικρότερο συντελεστή βαρύτητας για τα σενάρια 1 και 3.
- ▶ Στο σενάριο 2 το μικρότερο συντελεστή βαρύτητας λαμβάνει το κριτήριο K3. Το κριτήριο K5 θεωρείται υψηλής βαρύτητας στην περίπτωση όπου ο σχεδιασμός εξυπηρετεί τη δόμηση ενός ΣΕΠΠ.

Όλα τα σενάρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.9 έχουν κοινές βέλτιστες λύσεις για βαθμολογία επίδοσης μεγαλύτερη του 90%. Στη συγκεκριμένη κλίση επίδοσης, το σενάριο 3 (FAHP) δίνει τις περισσότερες προτεινόμενες βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης υδρομετρικών σταθμών (437) και το σενάριο 3 (AHP) τις λιγότερες (59). Το σενάριο 1 κατανέμει τις προτεινόμενες βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης για βαθμολογία επίδοσης μεγαλύτερη του 90% κατά μήκος των υδατορεμάτων σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σενάρια όπου υπάρχει μια τάση κατανομής των βέλτιστων θέσεων στα νότια της λεκάνης απορροής.

Βήμα 6. Σύνθεση κριτηρίων και καθορισμός βέλτιστων θέσεων. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο WLC σε περιβάλλον GIS μέσω της εξίσωσης (3.10) προέκυψε ο χάρτης καταλληλότητας κατά μήκος των δυο κύριων ρεμάτων, στον οποίο καθορίστηκαν οι βέλτιστες θέσεις που λαμβάνουν βαθμολογία επίδοσης μεγαλύτερη του 97%.

Προτεινόμενο δίκτυο υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία χωροθέτησης δικτύου υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών που εφαρμόστηκαν στη λεκάνη απορροής του ρ. Σαρανταπόταμου:

- ▶ ο απαιτούμενος αριθμός των υδρομετεωρολογικών σταθμών προκύπτει ίσος με 3, και
- ▶ ο απαιτούμενος αριθμός υδρομετρικών σταθμών προκύπτει ίσος με 2.

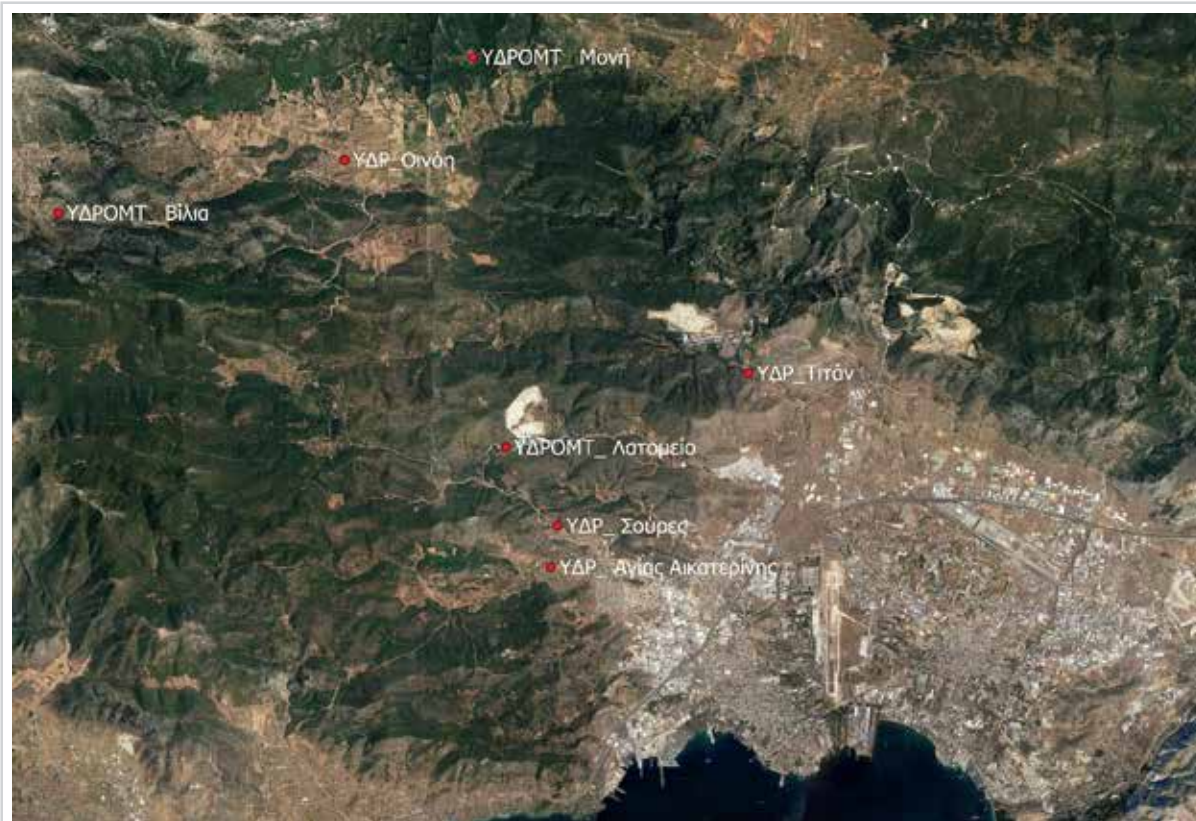
Για λόγους ασφάλειας, στα δύο κύρια ρέματα της Μάνδρας κρίθηκε σκόπιμη η τοποθέτηση ακόμα δυο υδρομετρικών σταθμών κοντά στις θέσεις εξόδου των δύο λεκανών απορροής ανάντη της συμβολής τους και του οικισμού της Μάνδρας, εξαιτίας του έκδηλου πλημμυρικού χαρακτήρα της ευρύτερης περιοχής.

Οι παραπάνω επτά σταθμοί εγκαθίστανται στις θέσεις που φαίνονται στο χάρτη της Εικόνας 8.20 και στις Εικόνες 8.21 μέχρι 8.27. Στους Πίνακες 8.10 και 8.11 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των θέσεων στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ) 1987, και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, αντίστοιχα.

Πίνακας 8.10

Συντεταγμένες (Χ,Υ) των προτεινόμενων θέσεων εγκατάστασης των υδρομετεωρολογικών και των υδρομετρικών σταθμών			
Είδος σταθμού	Συμβολισμός σταθμού	Χ	Υ
Υδρομετρικός	ΥΔΡ_ Αγίας Αικατερίνης	454212.091	4214502.622
Υδρομετρικός	ΥΔΡ_ Σούρες	454378.458	4215506.989
Υδρομετρικός	ΥΔΡ_ Οινόη	449422.500	4224397.706

Υδρομετρικός	ΥΔΡ_Τιτάν	458875.022	4219181.797
Υδρομετεωρολογικός	ΥΔΡΟΜΤ_ Λατομείο	453164.636	4217413.178
Υδρομετεωρολογικός	ΥΔΡΟΜΤ_ Βίλια	442686.905	4223163.451
Υδρομετεωρολογικός	ΥΔΡΟΜΤ_ Μονή	452450.783	4226876.480



Εικόνα 8.20: Χάρτης με τις θέσεις των προτεινόμενων σταθμών

Πίνακας 8.11

Χαρακτηριστικά των προτεινόμενων υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών		
Είδος σταθμού	Λεκάνη απορροής	Θέση
Υδρομετρικός	ρ. Αγίας Αικατερίνης	Υπερχειλιστής
Υδρομετρικός	ρ. Σούρες	Εθν. Οδός Αθηνών Θηβών – κατάντη από τις καντίνες – Συρματοκιβώτια
Υδρομετρικός	ρ. Σαρανταπόταμου	Γέφυρα – Οδού Οινόης-Μαγούλας
Υδρομετρικός	ρ. Σαρανταπόταμου (κατάντη συμβολής με ρ. Οινόη)	Κατάντη εργοστασίου Τιτάν
Υδρομετεωρολογικός	ρ. Σούρες	Περιοχή λατομείου Μάνδρας
Υδρομετεωρολογικός	ρ. Σαρανταπόταμου	Περιοχή βιολογικού σταθμού Βιλιών
Υδρομετεωρολογικός	ρ. Σαρανταπόταμου	Περιοχή Μονής Οσίου Μελετίου



Εικόνα 8.21: Θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στο ρ. Αγίας Αικατερίνης



Εικόνα 8.22: Θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στο ρ. Σούρες



Εικόνα 8.23: Θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στη θέση «Οινόη»



Εικόνα 8.24: Θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στη θέση «Τιτάν»



Εικόνα 8.25: Θέση του προτεινόμενου υδρομετεωρολογικού σταθμού στη θέση «Λατομείο»



Εικόνα 8.26: Θέση του προτεινόμενου υδρομετεωρολογικού σταθμού στη θέση «Βίλια»



Εικόνα 8.27: Θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στη θέση «Μονή»

8.2.4 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μετρητικών σταθμών

Για τους επτά σταθμούς που φαίνονται στον Πίνακα 8.12 προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά (α) των μετρητών, (β) των καταγραφών δεδομένων, και (γ) του εξοπλισμού για την τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια.

Χαρακτηριστικά των μετρητών

Κάθε υδρομετεωρολογικός σταθμός περιλαμβάνει βροχογράφο, θερμόμετρο, υγρόμετρο, βαρόμετρο, ανεμοδείκτη, ανεμόμετρο και μετρητή της ηλιακής ακτινοβολίας. Κάθε υδρομετρικός σταθμός περιλαμβάνει μετρητή της στάθμης της επιφάνειας ροής και μετρητή ταχυτήτων ροής με τον οποίο υπολογίζεται η παροχή. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετρητών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 8.12.

Πίνακας 8.12

Τεχνικά χαρακτηριστικά των μετρητών					
A/A	Μετρούμενο μέγεθος	Είδος αισθητήρα	Εύρος λειτουργίας	Διακριτική ικανότητα	Ακρίβεια
1	Στάθμη της επιφάνειας ροής	Ραντάρ 24.125 GHz ή 24.200 GHz	0 - μερικά m	0.5 mm	±2 mm
2	Ταχύτητα ροής στην επιφάνεια	Ραντάρ 24.125 GHz ή 24.200 GHz	0.02 - 15 m/s	0.001 m/s	1%
3	Βροχόπτωση	Ανατρεπόμενου δοχείου	0 - 6553 mm	0.2 mm	±3-4%
4	Θερμοκρασία	Ηλεκτρονικός - Δίοδος πυριτίου PN	-40 - +65 °C	0.1 °C	±0.3 °C
5	Σχετική υγρασία	Ηλεκτρονικός - Πυκνωτής φιλήμ	1 -100 %	1%	±2%,
6	Ατμοσφαιρική πίεση	Ηλεκτρονικός	540 - 1100 hPa	0.1 hPa	±1.0 hPa
7	Διεύθυνση ανέμου	Ανεμοδείκτης – Ποτενσιόμετρο	0 - 360°	1°	±3°
8	Ταχύτητα ανέμου	Κυπελλοφόρο με μαγνητικό διακόπτη	1 - 80 m/s, 1 -320 km/h	0.1 m/s, 1 km/h	±5% max
9	Ηλιακή ακτινοβολία	Φωτοδίοδος πυριτίου με διαχύτη (400-1100 nm)	0 - 1800 Wm ⁻²	1 Wm ⁻²	±5%

Καταγραφείς και μετάδοση των δεδομένων

Σε κάθε σταθμό τοποθετείται καταγραφέας δεδομένων, ο οποίος συλλέγει μετρήσεις από τους μετρητές, τις αποθηκεύει τοπικά και τις μεταδίδει στο ΚΠΠ. Ενδεικτικά και με βάση στοιχεία από εγχειρίδια καταγραφέων που εφαρμόζονται σήμερα στην Ελλάδα, τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού καταγραφέα είναι τα ακόλουθα:

- ▶ Τα κανάλια εισόδου του υποστηρίζουν τα πρωτόκολλα Modbus και SDI-12, με τα οποία επικοινωνούν οι μετρητές του Πίνακα 8.12.
- ▶ Ο ρυθμός δειγματοληψίας του είναι ίσος με 1/s που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας που υποστηρίζουν οι μετρητές του Πίνακα 8.12.
- ▶ Έχει δυνατότητα υπολογισμού της ελάχιστης τιμής, της μέσης τιμής, της μέγιστης τιμής, και της τυπικής απόκλισης του μετρούμενου μεγέθους σε προεπιλεγμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία μπορεί να μεταβάλλονται από 1 min μέχρι 1 h.
- ▶ Έχει δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας μετάδοσης των δεδομένων από 1/10 s μέχρι 1/h. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του όγκου δεδομένων προς αποθήκευση.
- ▶ Έχει τοπική μνήμη τουλάχιστον 1GB για να αποθηκεύονται τοπικά οι μετρήσεις για τουλάχιστον 6 μήνες.
- ▶ Έχει βαθμό προστασίας τουλάχιστον IP65.
- ▶ Η λειτουργία του δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από -20° C μέχρι + 50° C.

Καθώς η απόσταση των σταθμών είναι μεγάλη από το ΚΠΠ, αλλά και μεταξύ τους, επιλέγεται η τεχνολογία NB-IoT για τη μετάδοση των δεδομένων. Συνεπώς, ο καταγραφέας υποστηρίζει τη μετάδοση των δεδομένων με τη χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και του αντίστοιχου modem.

Ενεργειακή τροφοδοσία

Οι σταθμοί βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν είναι δυνατή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνεπώς, απαιτείται η ενεργειακή αυτονομία τους που περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- ▶ Φωτοβολταϊκό πάνελ ονομαστικής ισχύος 22 Wp και τάσεως 12 V.
- ▶ Συσσωρευτή μολύβδου κλειστού τύπου ονομαστικής χωρητικότητας 17 Ah και τάσης 12 V.
- ▶ Παρελκόμενα και ηλεκτρολογικό υλικό, όπως ρυθμιστή φόρτισης, σύστημα αντικεραυνικής προστασίας του σταθμού κ.ά.

8.3 Βήμα 3: Επιλογή, δόμηση, βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση του Μοντέλου Πρόγνωσης Πλημμυρών

8.3.1 Καθορισμός των ορίων της περιοχής υπολογισμών και δόμηση του 3D μοντέλου εδάφους

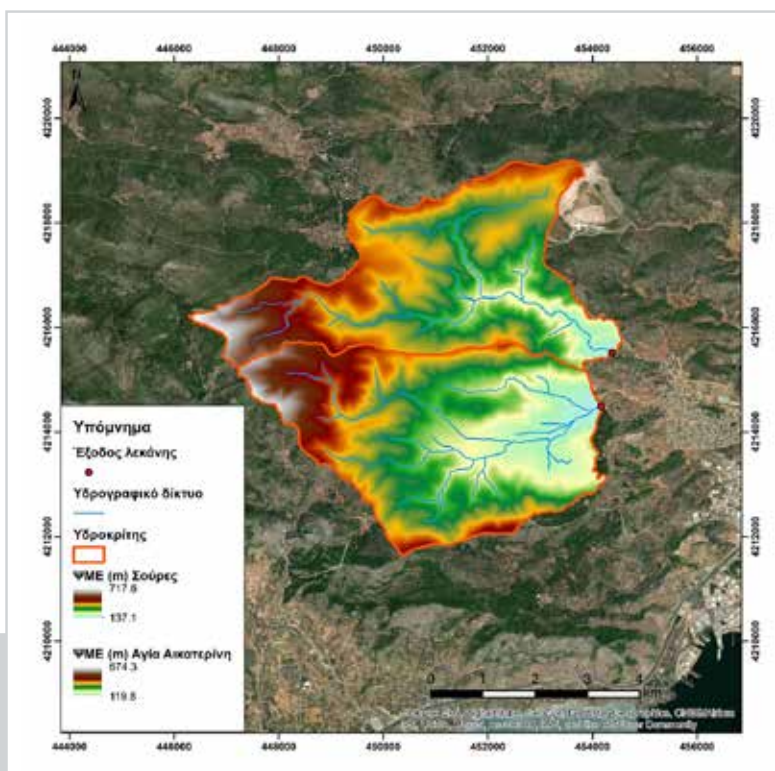
Προσδιορίστηκαν τα όρια της περιοχής εφαρμογής του ΜΠΠ που αποτελείται από

- ▶ τις λεκάνες απορροής των δυο ρεμάτων, στις οποίες εφαρμόζεται το υδρολογικό μοντέλο, και
- ▶ τις περιοχές διέλευσης των δυο ρεμάτων, στις οποίες εφαρμόζεται το υδροδυναμικό μοντέλο.

Στην Εικόνα 8.28 φαίνεται η περιοχή των λεκανών απορροής ανάντη του οικισμού της Μάνδρας, που αποτελείται από τις ακόλουθες λεκάνες απορροής:

- ▶ του ρ. Σούρες συνολικής έκτασης ίσης με 16.82 km², και
- ▶ του ρ. Αγίας Αικατερίνης συνολικής έκτασης ίσης με 18.82 km².

Στην Εικόνα 8.29 φαίνονται οι περιοχές διέλευσης των δυο ρεμάτων μέχρι τις θέσεις απόληξής τους. Στην περιοχή εφαρμογής πραγματοποιήθηκε η δόμηση του 3D μοντέλου εδάφους, αρχικά για τις συνθήκες της πλημμύρας του



Εικόνα 8.28: Λεκάνες απορροής των ρεμάτων Σούρες και Αγίας Αικατερίνης

Νοεμβρίου 2017, αξιοποιώντας τα δεδομένα που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 8.1. Στην περιοχή διέλευσης των δυο ρεμάτων δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις κύριες οδούς κατοικημένων περιοχών που (ενδέχεται να) πλημμυρίζουν.

Εικόνα 8.29: Περιοχές διέλευσης των δυο ρεμάτων



8.3.2 Επιλογή, δόμηση και εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου

Εισαγωγή

Στις λεκάνες απορροής των ρεμάτων Σούρες και Αγίας Αικατερίνης, όπως και στην πλειονότητα των ελληνικών λεκανών, δεν υπάρχουν δεδομένα παροχής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να βαθμονομηθεί το υδρολογικό μοντέλο. Έτσι, εφαρμόστηκε η τυπική υδρολογική προσέγγιση σχεδιασμού για λεκάνες απορροής χωρίς μετρήσεις (Feloni et al., 2021), που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτή λαμβάνονται υπόψη τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά των παραπάνω λεκανών και προσδιορίζονται τα απαραίτητα υδρολογικά μεγέθη, δηλ. τα πλημμυρογραφήματα, στις θέσεις εξόδου τους.

Υπολογισμός της πλημμυρικής αιχμής

- **Βήμα 1.** Υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης. Υπολογίστηκε ο χρόνος συγκέντρωσης εφαρμόζοντας τις τέσσερις μεθόδους που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 4.4.2, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.13.

Πίνακας 8.13

Πίνακας υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης		
Παράμετρος	ρ. Σούρες	ρ. Αγίας Αικατερίνης
A (km ²)	16.82	18.81
Giandotti		
L [km]	7.32	6.30
ΔH [m]	224.34	179.00
t _c [h]	2.29	2.50
Kirpich		
L [m]	10236.20	8934.57
S [m/m]	23.22	21.10

t_c [min]	7.10	6.63
t_c [h]	0.76	0.70
Passini		
L [km]	10.24	8.93
t_c [h]	1.25	1.30
SCS - NRCS		
L [ft]	33583.33	29312.89
H πλέον απομακρυσμένου σημείου	715.00	594.50
H εξόδου	137.10	119.90
ΔH [ft]	1896.00	1557.09
t_c [h]	1.18	1.09

Παρατηρείται ότι με την εξίσωση Giandotti υπολογίζονται οι μεγαλύτερες τιμές, με τις εξισώσεις Kirpich και Passini οι μικρότερες τιμές και με την εξίσωση SCS υπολογίζονται ενδιάμεσες τιμές. Οι τελευταίες εφαρμόζονται στη συνέχεια των υπολογισμών.

- **Βήμα 2.** Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης. Χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες στο ΣΔΚΠ του ΥΔ Αττικής (ΥΠΕΝ, 2018) σημειακές όμβριες καμπύλες, όπου δίνονται οι πέντε παράμετροι για κάθε βροχομετρικό σταθμό. Δεδομένου ότι εντός της λεκάνης απορροής δεν έχει αναπτυχθεί σημειακή όμβρια καμπύλη, πραγματοποιήθηκε έλεγχος με τα πολύγωνα επιρροής της μεθόδου Thiessen για την εύρεση των σταθμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της έντασης της βροχόπτωσης στην περιοχή εφαρμογής. Με βάση τον έλεγχο αυτό, διαπιστώθηκε ότι (α) στη λεκάνη απορροής του ρ. Αγίας Αικατερίνης επηρεάζει εξολοκλήρου ο σταθμός «Ελευσίνα», και (β) στη λεκάνη απορροής του ρ. Σούρες επηρεάζουν οι δυο σταθμοί «Ελευσίνα» και «Μάνδρα» σε ποσοστό 84 % και 16 %, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, θεωρήθηκε η διάρκεια της βροχόπτωσης ίση με το χρόνο συγκέντρωσης του Πίνακα 8.13 και προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων της όμβριας καμπύλης για τους δύο σταθμούς και για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και η κρίσιμη ένταση βροχόπτωσης για τα δυο ρέματα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.14.

Πίνακας 8.14

Παράμετροι όμβριων καμπυλών και κρίσιμη ένταση βροχόπτωσης			
Ρέμα	Σούρες		Αγίας Αικατερίνης
Σταθμός	Ελευσίνα	Μάνδρας	Ελευσίνα
Έκταση (m ²)	14047960.44	2773457.51	
κ	0.13	0.13	0.13
η'	171.40	213.40	171.40
ψ'	0.70	0.64	0.70
θ	0.12	0.12	0.12
n	0.62	0.62	0.62

T	100.00	100.00	100.00
d	1.18	1.18	1.09
i (mm/h)	42.91	56.09	44.92
Συντελεστής Βαρύτητας	84 %	16 %	100.00
Κρίσιμη ένταση Βροχόπτωσης (mm/h)	45.08		44.92

- **Βήμα 3.** Υπολογισμός του συντελεστή απορροής. Για να προσδιοριστούν οι τιμές των τεσσάρων επιμέρους συντελεστών C_r , C_i , C_v , και C_s , πραγματοποιήθηκε γεωαναφορά και ψηφιοποίηση των απαιτούμενων χαρτών εντός των ορίων των δυο λεκανών απορροής, σταθμίζοντας το εμβαδό επιρροής της κάθε λεκάνης με τους συντελεστές βαρύτητας που φαίνονται στον Πίνακα 8.14. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάστηκε το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών με τον διορθωτικό συντελεστή C_f , ο οποίος είναι ίσος με 1.20 για $T=100$ έτη και προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή απορροής που φαίνονται στον Πίνακα 8.15.

Πίνακας 8.15

Υπολογισμοί του συντελεστή απορροής		
Συντελεστής	ρ. Σούρες	ρ. Αγίας Αικατερίνης
C_r	0.26	0.24
C_i	0.06	0.08
C_v	0.06	0.08
C_s	0.08	0.09
$C_r + C_i + C_v + C_s$	0.46	0.49
C_f	1.20	1.20
C	0.55	0.59

- **Βήμα 4.** Υπολογισμός της πλημμυρικής αιχμής. Στον Πίνακα 8.16 παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής αιχμής που υπολογίστηκαν με την Ορθολογική Μέθοδο για τις τέσσερις μεθόδους υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο SCS - NRCS, η παροχή είναι ίση με $116.37 \text{ m}^3/\text{s}$ στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ρ. Σούρες και $138.11 \text{ m}^3/\text{s}$ στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ρ. Αγίας Αικατερίνης.

Πίνακας 8.16

Παροχή αιχμής που υπολογίζεται με την ορθολογική μέθοδο για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη		
Μέθοδος υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης	Παροχή (m^3/s) λεκάνης απορροής ρ. Σούρες	Παροχή (m^3/s) λεκάνης απορροής ρ. Αγίας Αικατερίνης
Giandotti	79.55	85.45
Kirpich	150.63	179.73
Passini	114.66	128.10
SCS - NRCS	116.37	138.11

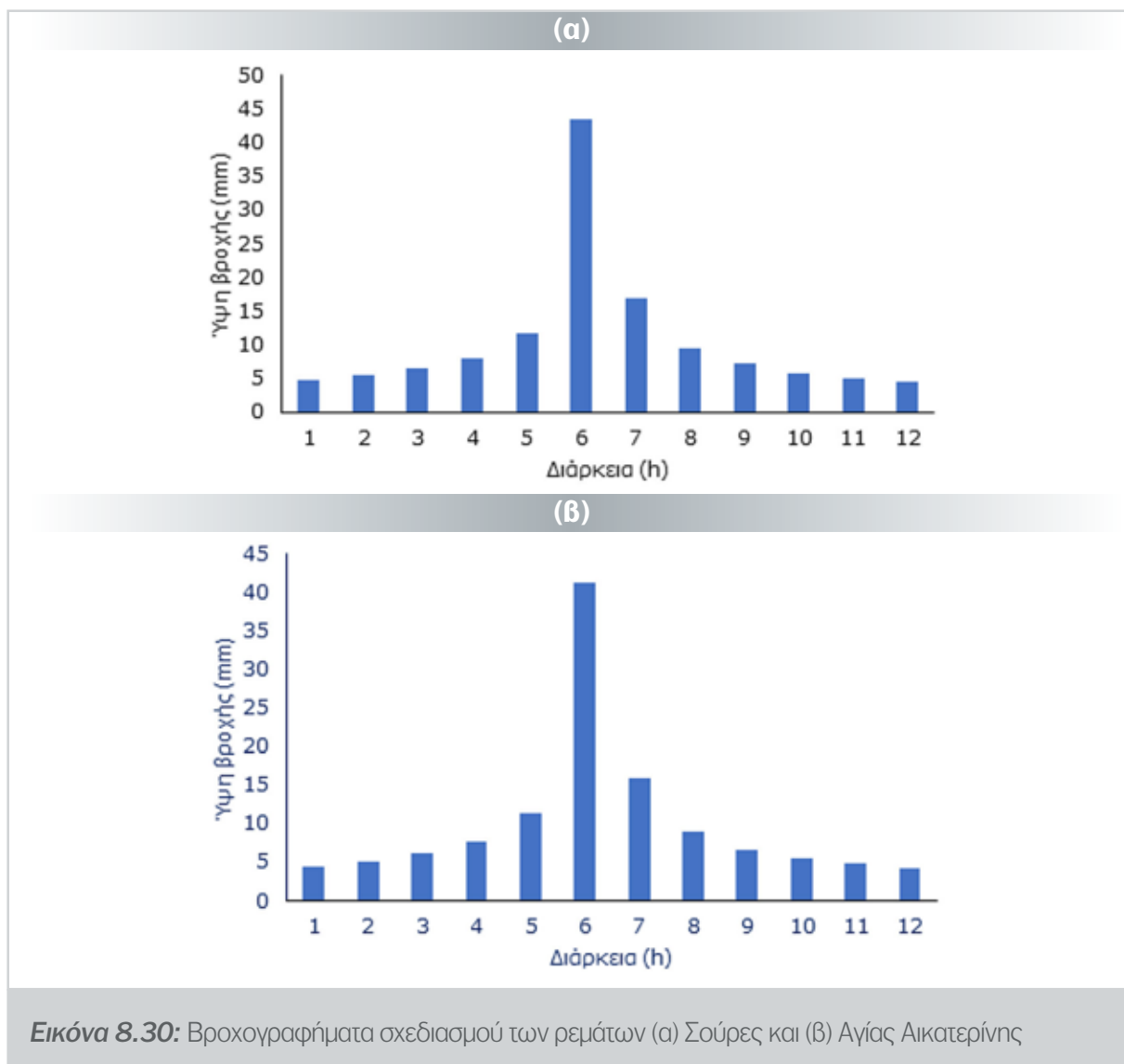
Υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος

- ▶ **Βήμα 1.** Καθορισμός της διάρκειας της βροχόπτωσης σχεδιασμού. Η καταιγίδα του Νοεμβρίου του 2017 είχε διάρκεια περίπου 24 ώρες. Εξετάστηκαν τιμές διάρκειες βροχής ίσες με 6, 12, 18 και 24 ώρες και παρατηρήθηκαν οι δυσμενέστερες (μέγιστες) εντάσεις βροχής στην περίπτωση των 12 ωρών. Έτσι, επιλέχθηκε η διάρκεια βροχόπτωσης σχεδιασμού ίση με 12 ώρες.
- ▶ **Βήμα 2.** Καθορισμός της περιόδου επαναφοράς της καταιγίδας σχεδιασμού. Εξετάστηκαν σενάρια πλημμυρών για $T = 20, 50, 100, 150$ και 200 έτη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά το σενάριο για $T=100$ έτη.
- ▶ **Βήμα 3.** Καθορισμός της χρονικής διακριτότητας της καταιγίδας σχεδιασμού. Σύμφωνα με την εξίσωση (4.8) η χρονική διακριτότητα της καταιγίδας σχεδιασμού για τα ρέματα Σούρες και Αγίας Αικατερίνης υπολογίστηκε της τάξης της μιας ώρας.
- ▶ **Βήμα 4.** Υπολογισμός του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής. Οι σχετικοί υπολογισμοί του συντελεστή και των μέσων επιφανειακών υψών βροχής συνοψίζονται στον Πίνακα 8.17.

Πίνακας 8.17

Συντελεστές επιφανειακής αναγωγής και μέσα επιφανειακά ύψη βροχής						
Διάρκεια	ρ. Σούρες			ρ. Αγίας Αικατερίνης		
	h (mm)	ϕ	$h \cdot \phi$ (mm)	h (mm)	ϕ	$h \cdot \phi$ (mm)
1	49.5	0.88	43.5	47.1	0.87	41.2
2	66.7	0.90	60.3	63.4	0.90	57.1
3	78.7	0.92	72.1	74.9	0.91	68.4
4	88.2	0.92	81.6	84.0	0.92	77.4
5	96.4	0.93	89.6	91.7	0.93	85.1
6	103.5	0.93	96.7	98.5	0.93	91.8
7	109.9	0.94	103.1	104.6	0.94	97.9
8	115.8	0.94	108.9	110.2	0.94	103.4
9	121.1	0.94	114.3	115.3	0.94	108.5
10	126.2	0.95	119.3	120.1	0.94	113.3
11	130.9	0.95	124.0	124.6	0.95	117.8
12	135.4	0.95	128.4	128.8	0.95	122.0

- ▶ **Βήμα 5.** Προσδιορισμός του βροχογραφήματος σχεδιασμού. Τα μέσα επιφανειακά ύψη διατάχθηκαν με τη μέθοδο των Εναλλασσόμενων Υψών Βροχής και τα αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 8.30 (α) και 8.30 (β).

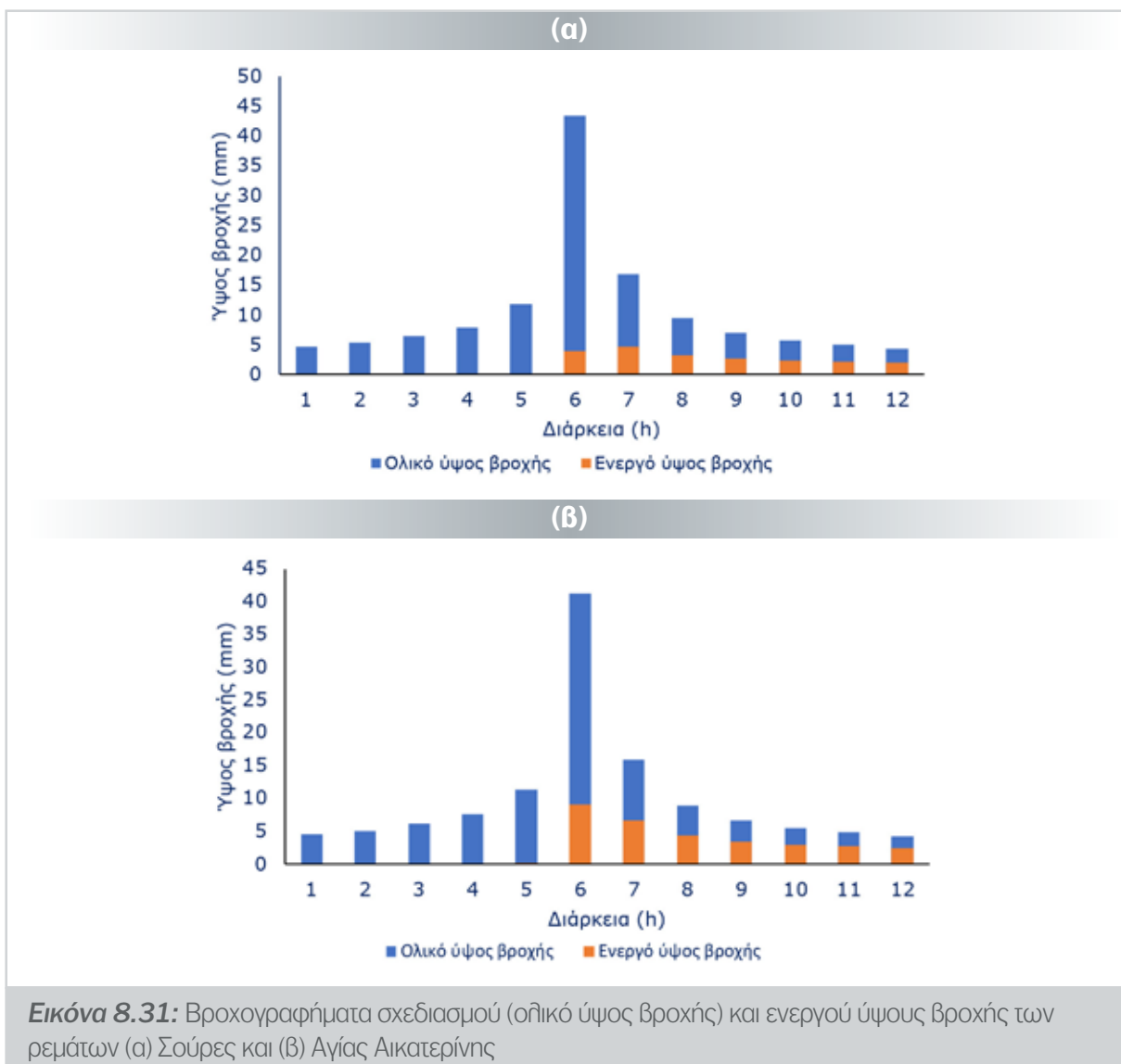


Εικόνα 8.30: Βροχογραφήματα σχεδιασμού των ρεμάτων (α) Σούρες και (β) Αγίας Αικατερίνης

- **Βήμα 6.** Προσδιορισμός της ενεργού βροχόπτωσης. Για τον προσδιορισμό της ενεργού βροχόπτωσης εφαρμόστηκε η μέθοδος του αριθμού καμπύλης απορροής (CN) για την εκτίμηση των απωλειών λόγω διήθησης και υπολογίστηκε η μέγιστη πιθανή κατακράτηση. Η τιμή του CN υπολογίστηκε αξιολογώντας τα σχετικά γεωγραφικά δεδομένα, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 4.4.3. Οι κύριοι υπολογισμοί των παραμέτρων για τον προσδιορισμό της ενεργού βροχόπτωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 8.18 και τα βροχογραφήματα σχεδιασμού των ρεμάτων Σούρες και Αγίας Αικατερίνης (ολικό και ενεργό) παρουσιάζονται στις Εικόνες 8.31(α) και 8.31(β), αντίστοιχα.

Πίνακας 8.18

Παράμετροι προσδιορισμού της ενεργού βροχόπτωσης		
Παράμετροι	ρ. Σούρες	ρ. Αγίας Αικατερίνης
CN	52	61
S (mm)	234.46	162.39
h_0 (mm)=0.2*S	46.89	32.48
Ενεργό ύψος βροχής	21.08	31.81



Εικόνα 8.31: Βροχογραφήματα σχεδιασμού (ολικό ύψος βροχής) και ενεργού ύψους βροχής των ρεμάτων (α) Σούρες και (β) Αγίας Αικατερίνης

- **Βήμα 7.** Κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Πραγματοποιήθηκε η κατάρτιση του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΜΥΓ) εφαρμόζοντας τη μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών σε περιβάλλον GIS. Για να δημιουργηθεί το ιστόγραμμα με τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν ανά καθορισμένο χρονικό διάστημα και να μετασχηματιστεί σε απορροή πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με τη σειρά που φαίνεται στον Πίνακα 8.19.

Πίνακας 8.19

Σειρά υπολογισμών για τον προσδιορισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος			
A/A	Κάναβος	Όνομα αρχείου	Υπολογισμός
1	Κλίσεις εδάφους (%)	slope_perc	Από το DEM
2	Διεύθυνση ροής	flowdir	Από το DEM
3	Συγκέντρωση ροής	flowacc	Από το flowdir
4	Υδρογραφικό δίκτυο	stream	Μέσω ταξινόμησης του flowacc
5	Ταξινομημένο υδρογραφικό δίκτυο	streamorder	Μέσω της εντολής stream order

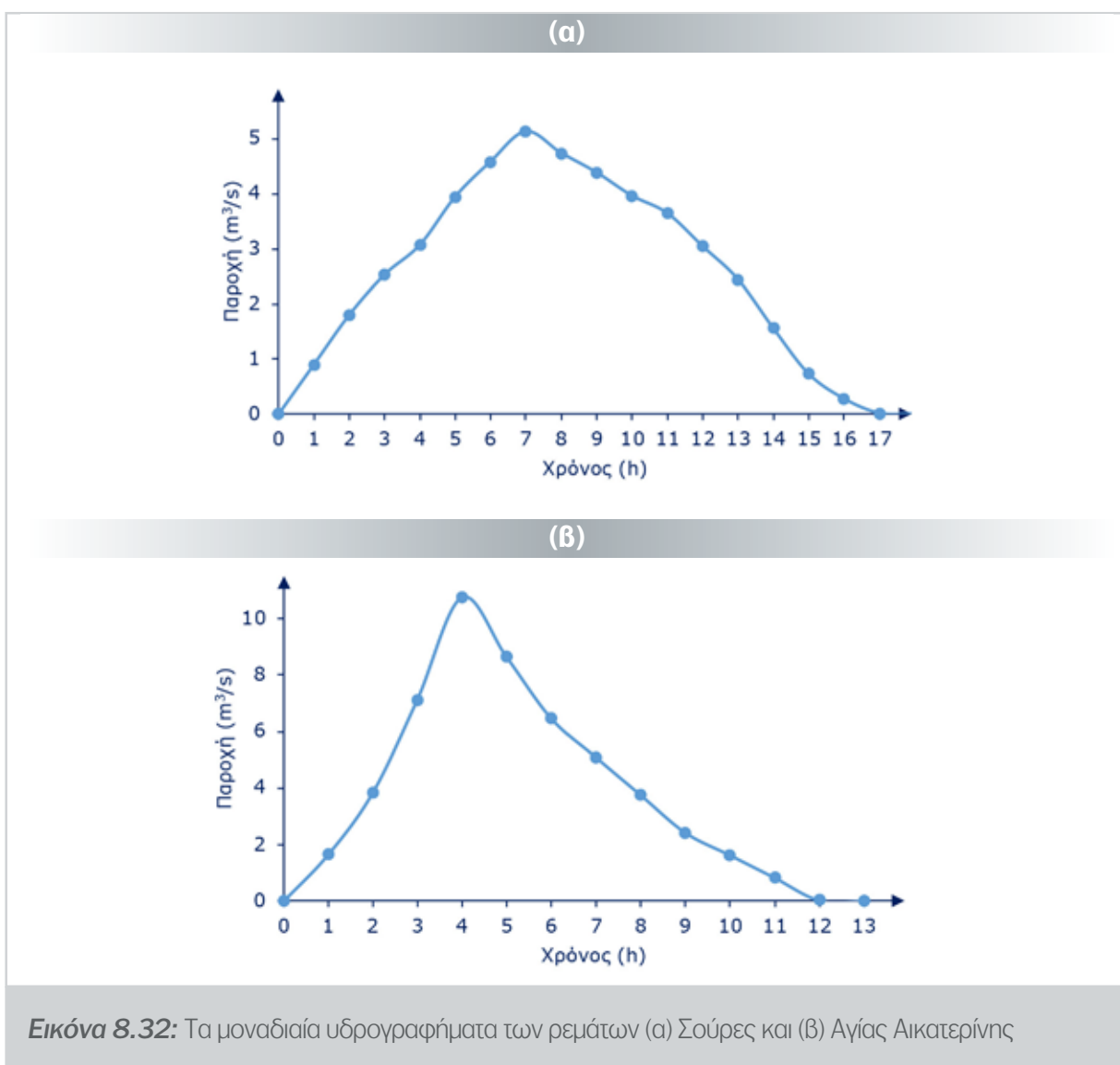
6	Τραχύτητα εδάφους	k_div100	Μέσω της απόδοσης των κατάλληλων τιμών k στο αρχείο χρήσεων γης
7	Χερσαία ταχύτητα ροής	vhill	Μέσω εφαρμογής της εξίσωσης στο raster calculator
8	Ταχύτητα ροής στο υδρογραφικό δίκτυο	vstr	Με χρήση των streamorder και k_div100
9	Συνολική ταχύτητα ροής	v_total	Με άθροιση των vhill και Vstr
10	Συντελεστής βαρύτητας	weight	Μέσω του v_total
11	Μήκος ροής	flowlength	Μέσω της εντολής flow length ενσωματώνοντας το αρχείο weight
12	Χρόνος απορροής	times	Τελικό αρχείο που ταξινομείται σε κλάσεις και εξάγεται το ιστόγραμμα με τον αριθμό φατνίων (count) διαστάσεων 5x5 m ανά κλάση χρόνου σε ώρες

Από τους υπολογισμούς προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.20 και τα αρχικά μοναδιαία υδρογραφήματα, τα οποία ρυθμίστηκαν μέσω GIS, ώστε να αποκτήσουν την ενδεδειγμένη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 8.32.

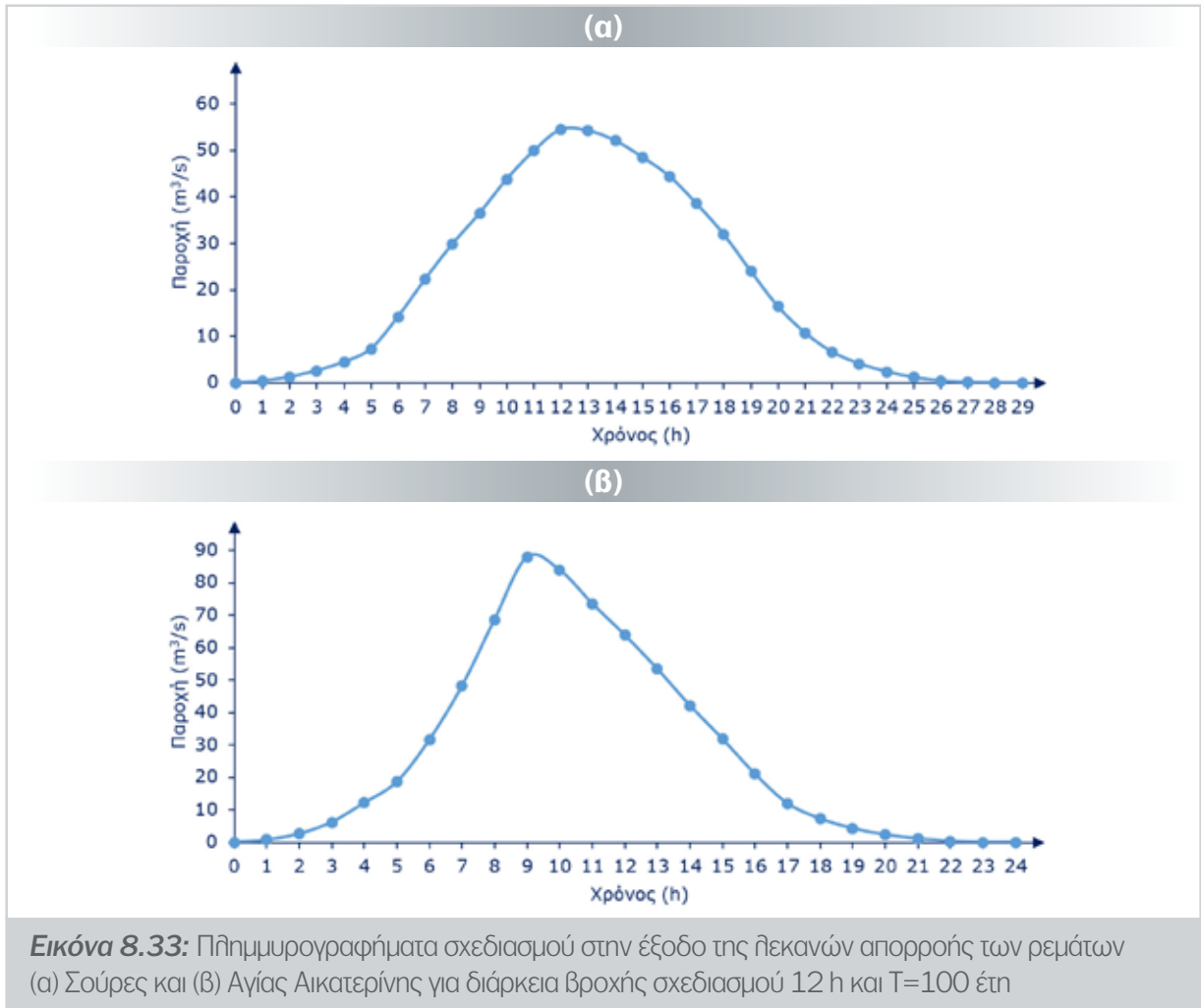
Πίνακας 8.20

Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Ισόχρονων Καμπυλών					
Ρέμα		Σούρες		Αγίας Αικατερίνης	
α/α	Χρόνος (h)	Αριθμός Φατνίων (-)	Q (m ³ /s)	Αριθμός Φατνίων (-)	Q (m ³ /s)
0	-	-	0.00	-	0.00
1	1	23852	1.66	23726	1.65
2	2	25921	1.80	47580	3.30
3	3	29595	2.06	88232	6.13
4	4	33281	2.31	154666	10.74
5	5	41788	2.90	124400	8.64
6	6	65945	4.58	93128	6.47
7	7	67129	4.66	73314	5.09
8	8	51584	3.58	68489	4.76
9	9	63066	4.38	35042	2.43
10	10	66935	4.65	31221	2.17
11	11	73997	5.14	12088	0.84
12	12	47879	3.32	533	0.04

13	13	44658	3.10	-	0.00
14	14	22450	1.56		
15	15	10532	0.73		
16	16	4008	0.28		
17	17	233	0.02		
18	-	-	0.00		

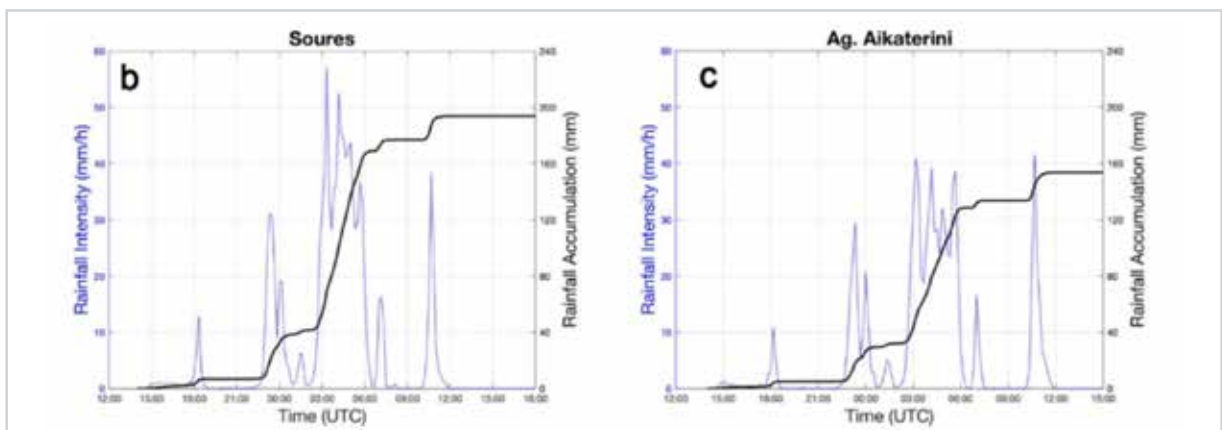


- **Βήμα 8.** Κατάρτιση του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού. Στις Εικόνες 8.33(α) και 8.33 (β) παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού στις εξόδους των λεκανών απορροής του ρ. Σούρες και του ρ. Αγίας Αικατερίνης, αντίστοιχα. Τα πλημμυρογραφήματα αυτά αντιστοιχούν σε μέσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, με βάση την προσέγγιση της καταίγιδας σχεδιασμού για T = 100 έτη και εφαρμογή της μεθόδου των Εναηθλασσόμενων Υψών Βροχής.

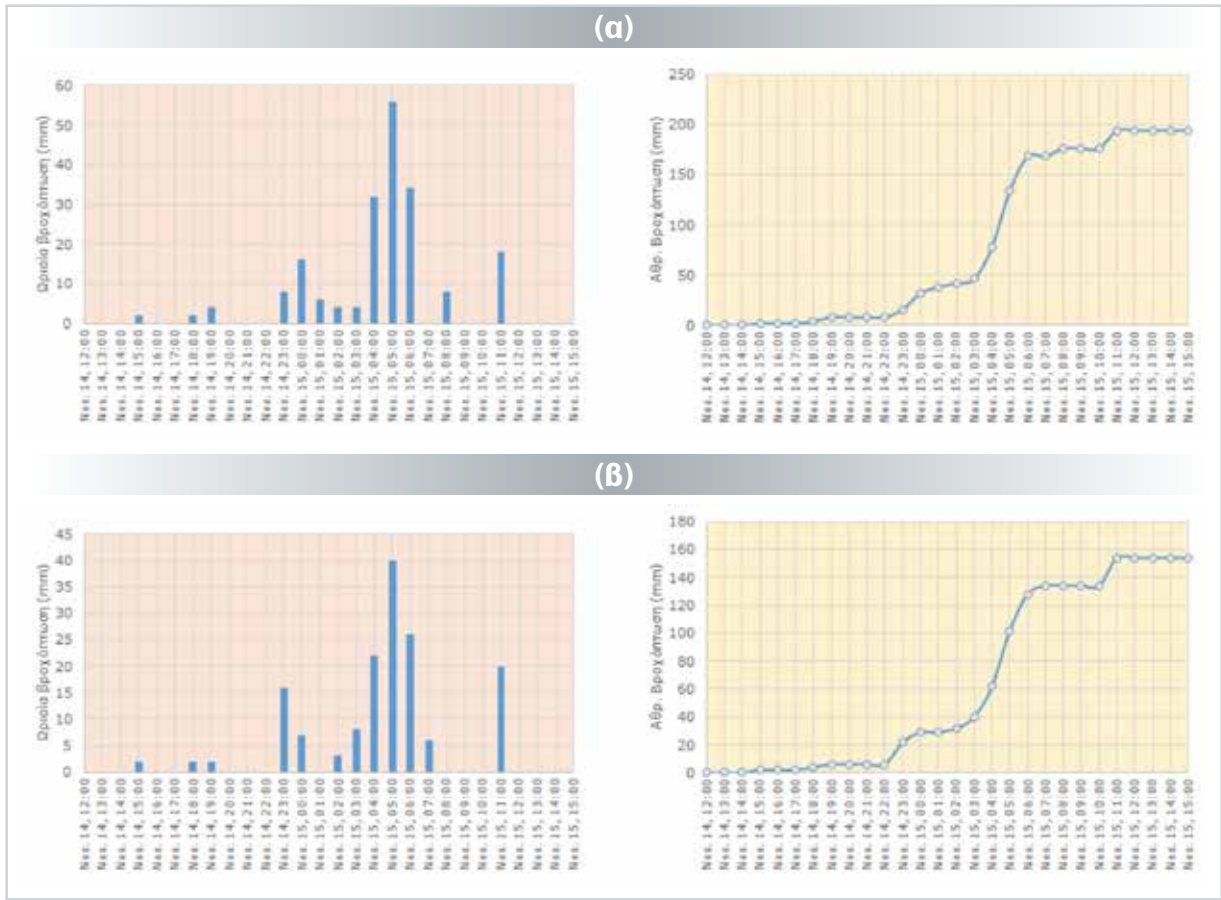


Υπολογισμός πλημμυρογραφήματων για την πλημμύρα του 2017

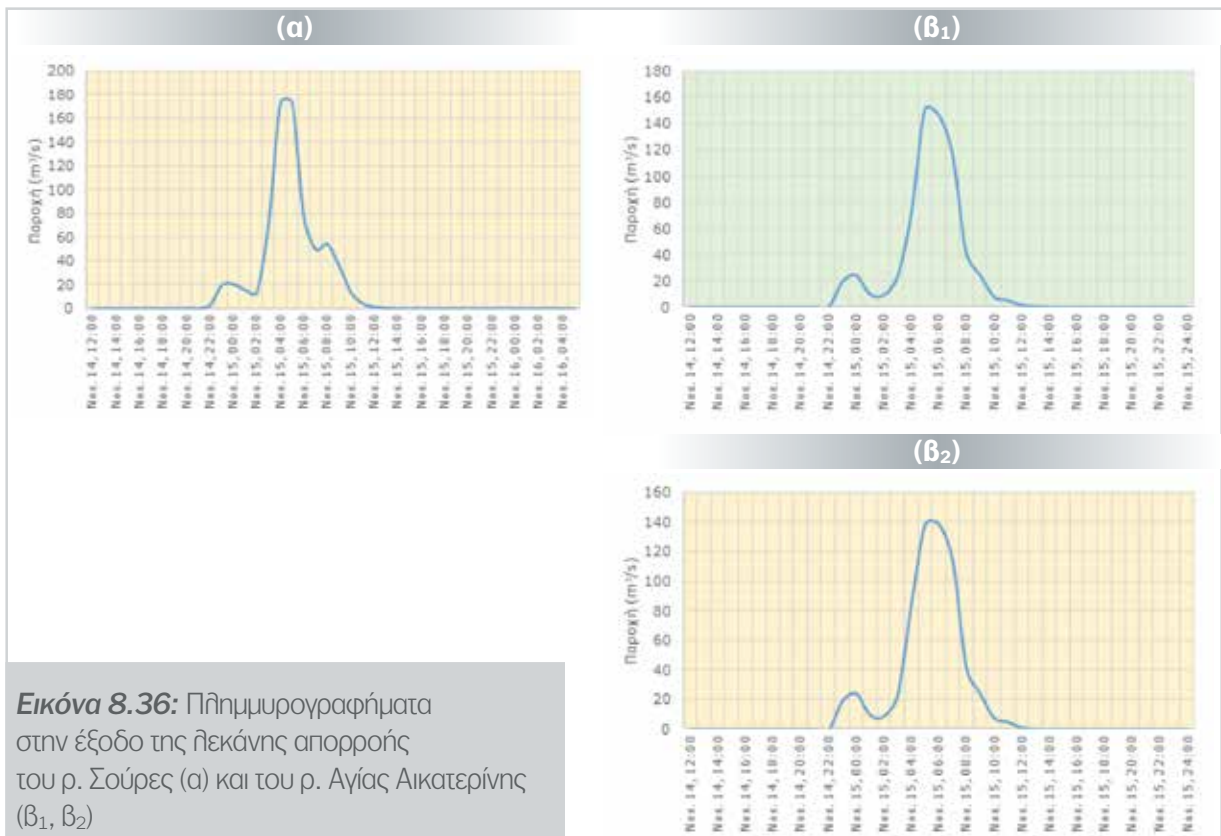
Πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των πλημμυρογραφήματων για το επεισόδιο του Νοεμβρίου 2017. Σύμφωνα με τη διακύμανση της βροχόπτωσης αυτού του επεισοδίου που φαίνεται στην Εικόνα 8.34 (Diakakis et al., 2019), η καταιγίδα είχε διάρκεια περίπου 24 ώρες και στο μέσο του χρόνου (στις 12 ώρες) παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα υψηλές εντάσεις βροχής (58 mm/h). Στην Εικόνα 8.35 παρουσιάζεται η κατανομή των ωριαίων υψών βροχής και στην Εικόνα 8.36 τα υπολογιζόμενα πλημμυρογραφήματα στις εξόδους των λεκανών απορροής των δυο ρεμάτων.



Εικόνα 8.34: Διακύμανση βροχόπτωσης κατά το επεισόδιο του Νοεμβρίου 2017 (Πηγή: Diakakis et al., 2019)



Εικόνα 8.35: Οριαία ύψ βροχής (αριστερά) και αθροιστική βροχόπτωση (δεξιά) για το επεισόδιο του Νοεμβρίου 2017 για τις λεκάνες απορροής (α) του ρ. Σούρες και (β) του ρ. Αγίας Αικατερίνης



Εικόνα 8.36: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ρ. Σούρες (α) και του ρ. Αγίας Αικατερίνης (β₁, β₂)

8.3.3 Επιλογή, δόμηση και βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου

Επιλογή υδροδυναμικού μοντέλου

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί αρχικά με το μοντέλο TELEMAC-2D (Μαρκόπουλος-Σαρίκας κ.ά., 2019· Papadonikolaki et al., 2020) και στη συνέχεια με το μοντέλο HEC-RAS 1D/2D (Tsokanis et al., 2021· Mitsopoulos et al., 2021a, b). Οι υπολογισμοί και με τα δυο μοντέλα μετά τη βαθμονόμησή τους με δεδομένα της πλημμύρας του 2017 ήταν ικανοποιητικοί. Με κριτήριο την ταχύτητα υπολογισμών επιλέχθηκε το μοντέλο HEC-RAS 1D/2D (Brunner, 2020).

Το μοντέλο HEC-RAS 1D/2D επιλύει τις εξισώσεις μη μόνιμης ροής (Shallow Water Equations, SWE) σε 1D μορφή στο μονοδιάστατο πλέγμα που καθορίζεται από τις διατομές του ρ. Σούρες και του ρ. Αγίας Αικατερίνης και σε 2D μορφή στο δισδιάστατο πλέγμα των περιοχών που ενδέχεται να πλημμυρίζουν.

Σημειώνεται, ότι πριν από την εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικοί υπολογισμοί, ώστε να εξασφαλιστεί η ικανοποιητική ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων του από το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιείται.

Δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος

Η περιοχή των υδραυλικών υπολογισμών που φαίνεται στην Εικόνα 8.29 καλύπτει έκταση περίπου 18.36 km². Περιλαμβάνει την πλημμυρισμένη έκταση, που ίση είναι με περίπου 3.0 km² (Mitsopoulos et al., 2022b) και αποτελείται από τρία τμήματα Α, Β και Γ. Το τμήμα Α καλύπτει την περιοχή στη βόρεια πλευρά του ρ. Σούρες και περιλαμβάνει το βόρειο τμήμα της πόλης της Μάνδρας, ένα τμήμα της πόλης της Μαγούλας και το βιομηχανικό πάρκο. Το τμήμα Β καλύπτει την περιοχή στη ΝΔ (δεξιά) πλευρά του ρ. Σούρες και περιλαμβάνει το ρ. Αγίας Αικατερίνης και το κύριο τμήμα της πόλης της Μάνδρας. Το τμήμα Γ εκτείνεται νότια, μέχρι τις ακτές του Σαρωνικού, και περιλαμβάνει τμήμα της πόλης της Ελευσίνας και τη βιομηχανική της ζώνη.

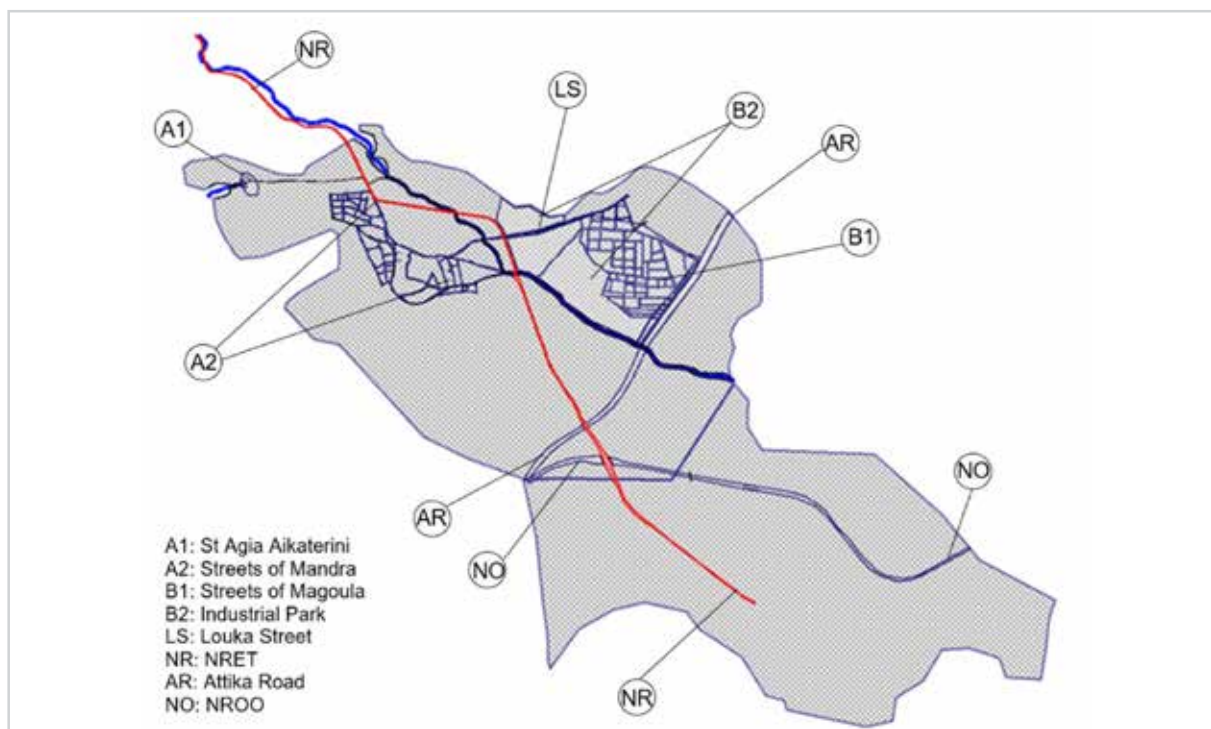
Αξιοποιήθηκαν τα διαθέσιμα τοπογραφικά δεδομένα (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.2) για να δημιουργηθεί η 3D επιφάνεια της περιοχής υπολογισμών. Στις περιοχές των ρεμάτων Σούρες και Αγίας Αικατερίνης εισήχθη η τρισδιάστατη επιφάνεια στο πρόγραμμα AUTODESK CIVIL 3D και εξήχθησαν διατομές στο HEC-RAS, οι οποίες διορθώθηκαν με βάση την ακριβή τοπογραφική αποτύπωση. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το «Έδαφος των διατομών» (Cross Sections Terrain) μέσω του HEC-RAS MAPPER, το οποίο «τοποθετήθηκε» πάνω από το DSM κάνοντας πρακτικά μια διόρθωση του. Έτσι, στα δυο ρέματα δομήθηκε το 1D αριθμητικό πλέγμα του ρ. Σούρες, το οποίο αποτελείται από 180 διατομές ανά περίπου 50 m, και του ρ. Αγίας Αικατερίνης, το οποίο αποτελείται από 16 διατομές ανά περίπου 10-50 m.

Στην περιοχή που ενδέχεται να πλημμυρίσει δομήθηκε το κύριο 2D πλέγμα με ορθογωνικά κελιά διαστάσεων 20 m x 20 m. Στις περιοχές ενδιαφέροντος που είναι οι οικιστικές και βιομηχανικές περιοχές των πόλεων Μάνδρας και Μαγούλας και οι δρόμοι κατά μήκος των οποίων διήλθε το πλημμυρικό κύμα από την πόλη της Μάνδρας το Νοέμβριο του 2017, μειώθηκαν οι διαστάσεις μέχρι 5.0 m x 5.0 m. Στην Εικόνα 8.37 φαίνονται οι περιοχές αυτές που είναι οι ακόλουθες:

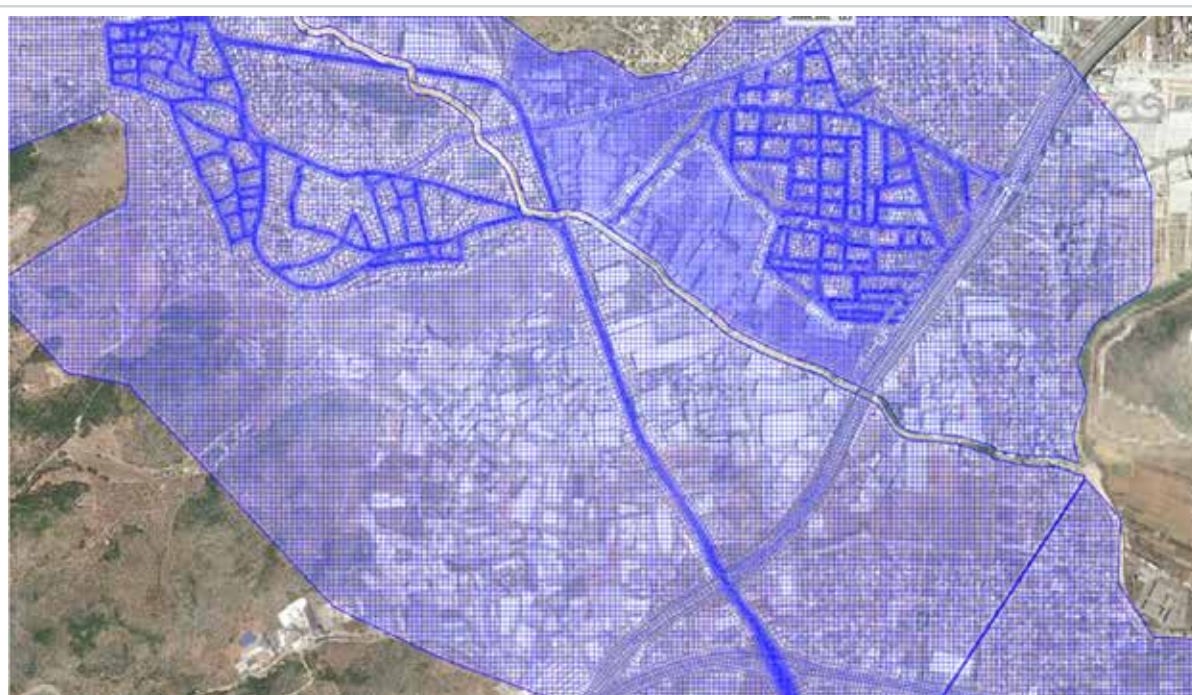
- ▶ A1: Κατά μήκος της οδού Αγίας Αικατερίνης (10 m x 10 m).
- ▶ A2: Στις κύριες οδούς της οικιστικής περιοχής της πόλης της Μάνδρας (5 m x 5 m μέχρι 2 m x 2 m).
- ▶ B1: Στις κύριες οδούς της οικιστικής περιοχής της πόλης της Μαγούλας (5 m x 5 m μέχρι 2 m x 2 m).
- ▶ B2: Στις κύριες οδούς της πόλης της Μάνδρας (10 m x 10 m).
- ▶ NR: Κατά μήκος της Εθνικής (Ολυμπίας) Οδού (5 m x 5 m μέχρι 2 m x 2 m).

- ▶ AR: Κατά μήκος της Αττικής Οδού (10 m x 10 m).
- ▶ LS: Κατά μήκος της οδού Λουκά (10 m x 10 m).

Ένα τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος στην κεντρική οικιστική περιοχή της Μάνδρας φαίνεται στην Εικόνα 8.38.



Εικόνα 8.37: Άποψη του υπολογιστικού πλέγματος των υδροδυναμικών υπολογισμών



Εικόνα 8.38: Τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος στην κεντρική οικιστική περιοχή της Μάνδρας.

Καθορισμός οριακών και αρχικών συνθηκών

Στους υδραυλικούς υπολογισμούς θεωρήθηκαν οι ακόλουθες συνθήκες:

- ▶ **Οριακές συνθήκες.** Για τα 1D ρέματα, ως ανάντη οριακές συνθήκες (ανάντη άκρα των ρεμάτων) χρησιμοποιήθηκαν τα υδρογραφήματα που υπολογίστηκαν με το υδρολογικό μοντέλο (βλ. υποκεφάλαιο 8.3.2) και ως κατάντη οριακές συνθήκες (κατάντη άκρα των ρεμάτων) θεωρήθηκε ομοιόμορφη ροή με βάση την κλίση του τελευταίου κατάντη τμήματος. Για τις 2D περιοχές που μπορεί να πλημμυρίζουν χρησιμοποιήθηκαν ως ανάντη οριακές συνθήκες αυτές των κάθετων ορίων – υπερχειλιστών και στα κατάντη άκρα (κατάντη οριακές συνθήκες) θεωρήθηκε ομοιόμορφη ροή που προκύπτει από την κλίση της γραμμής ενέργειας.
- ▶ **Αρχικές συνθήκες.** Στην αρχή των υπολογισμών θεωρήθηκε στα 1D ρέματα μια αρχική κατανομή βαθών ροής και στις 2D περιοχές ότι δεν υπάρχει ροή.

Βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου

Οι υπολογισμοί βαθμονόμησης του HEC-RAS 1D/2D πραγματοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι τιμές των συντελεστών τραχύτητας (κατά Manning) στις 2D περιοχές χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της πλημμύρας του 2017 (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.3). Στις 1D περιοχές των δυο ρεμάτων επιλέχθηκαν τιμές από τη βιβλιογραφία με βάση τα χαρακτηριστικά τους, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 8.21 μαζί με το εύρος τιμών από παρόμοιες εργασίες. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στις εργασίες των Mitsopoulos et al. (2022a και 2022b).

Πίνακας 8.21

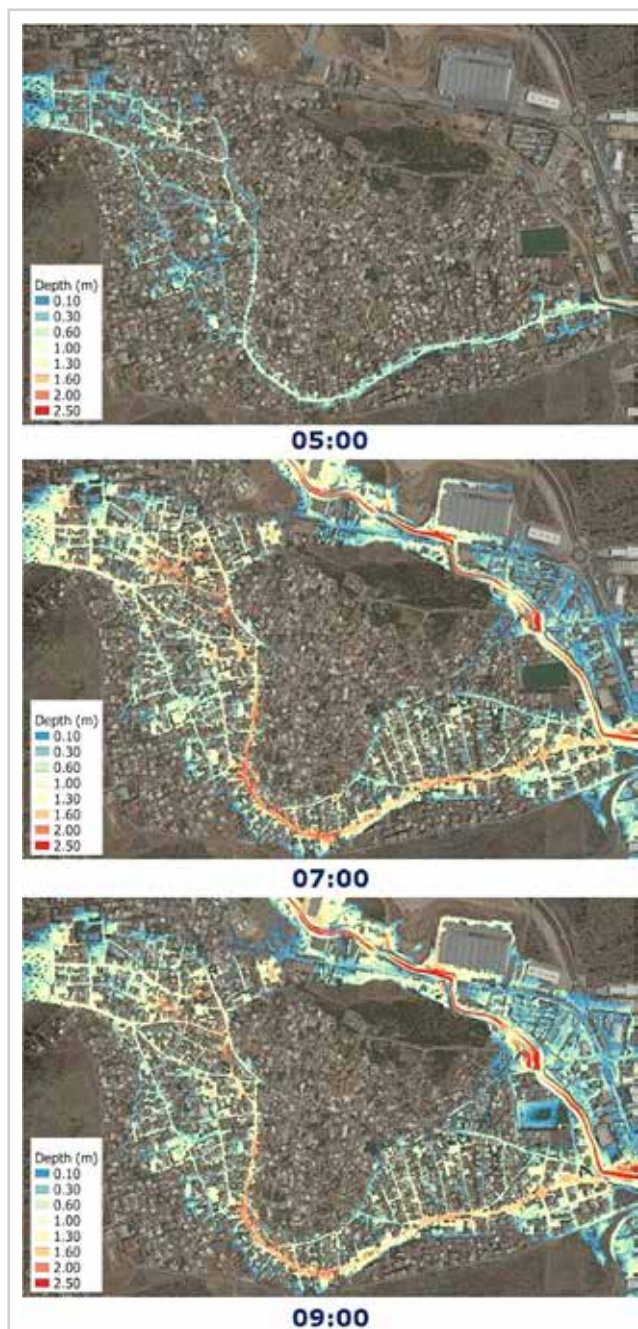
Τιμές των συντελεστών τραχύτητας στις 1D και 2D περιοχές			
Κωδικός Corine	Περιγραφή χρήσης	Τιμή	Εύρος τιμών
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	0.100	0.080 - 0.160
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.100	0.100 - 0.200
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα	0.020	0.013 - 0.016
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	0.035	0.020 - 0.050
223	Ελαιώνες	0.045	0.030 - 0.080
242	Σύνθετες καλλιέργειες	0.035	0.020 - 0.050
313	Μικτό δάσος	0.120	0.080 - 0.200
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.100	0.035 - 0.160
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.050	0.025 - 0.100
-	Φυσικά ρέματα με πέτρες και χόρτα	0.050	0.045 - 0.060
-	Διευθετημένα ρέματα με φυσική γη	0.030	0.013 - 0.016
-	Διευθετημένα ρέματα με σκυρόδεμα	0.016	0.013 - 0.016

Τα κύρια αποτελέσματα της βαθμονόμησης του υδροδυναμικού μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

- ▶ **Συμπεριφορά της πλημμύρας.** Η υπερχειλίση του ρ. Αγίας Αικατερίνης αρχίζει στις 03:30 π.μ. Στη συνέχεια, η ροή κατευθύνεται προς την πόλη της Μάνδρας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.39.

Μετά από περίπου 1 ώρα (στις 04:30 π.μ.) τα βάθη ροής στους κύριους δρόμους της Μάνδρας φτάνουν το 0.30 m, ενώ μετά από περίπου 3.5 ώρες (στις 7:05 - 7:20 π.μ.) φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Στις 8:00-8:30 π.μ. παρατηρούνται τα μέγιστα βάθη ροής στη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας. Στον Πίνακα 8.22 φαίνεται ότι τα υπολογισθέντα βάθη ροής και οι αντίστοιχοι χρόνοι άφιξής τους στις θέσεις παρατήρησης O1 μέχρι O6 δείχνουν μια ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις. Στην παρούσα εργασία ορίζεται ο χρόνος άφιξης της πλημμύρας σε μια συγκεκριμένη θέση ως ο απαιτούμενος χρόνος για να φτάσει το βάθος του νερού τα 0.30 m. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται στα ΣΔΚΠ (ΥΠΕΝ, 2018) και αυτό το βάθος θεωρείται γενικά ασφαλές για οχήματα, ανθρώπους και κτίρια (Smith et al., 2014), βλ. επίσης Εικόνα 7.7.

► **Βάθη και ταχύτητες ροής.** Τα υπολογισθέντα βάθη ροής κυμαίνονται από 0.27 m μέχρι 6.22 m στο ρ. Σούρες και από 2.14 m μέχρι 3.43 m στο ρ. Αγίας Αικατερίνης. Το εύρος τιμών της μέγιστης ταχύτητας ροής είναι 0.49 - 14.22 m/s στο ρ. Σούρες και 2.10 - 3.43 m/s στο ρ. Αγίας Αικατερίνης. Στις Εικόνες 8.40 και 8.41 συγκρίνονται τα υπολογισθέντα μέγιστα βάθη ροής με τις μετρήσεις κατά μήκος των οδών Κοροπούλη και Αίαντος, αντίστοιχα, που είναι δυο από τις κύριες οδούς της Μάνδρας που υπέστησαν σημαντικές επιπτώσεις κατά την πλημμύρα του 2017. Τα υπολογισθέντα βάθη ροής κατά μήκος της οδού Κοροπούλη κυμάνθηκαν από 1.40 m μέχρι 2.17 m και κατά μήκος της οδού Αίαντος κυμάνθηκαν από 0.94 m

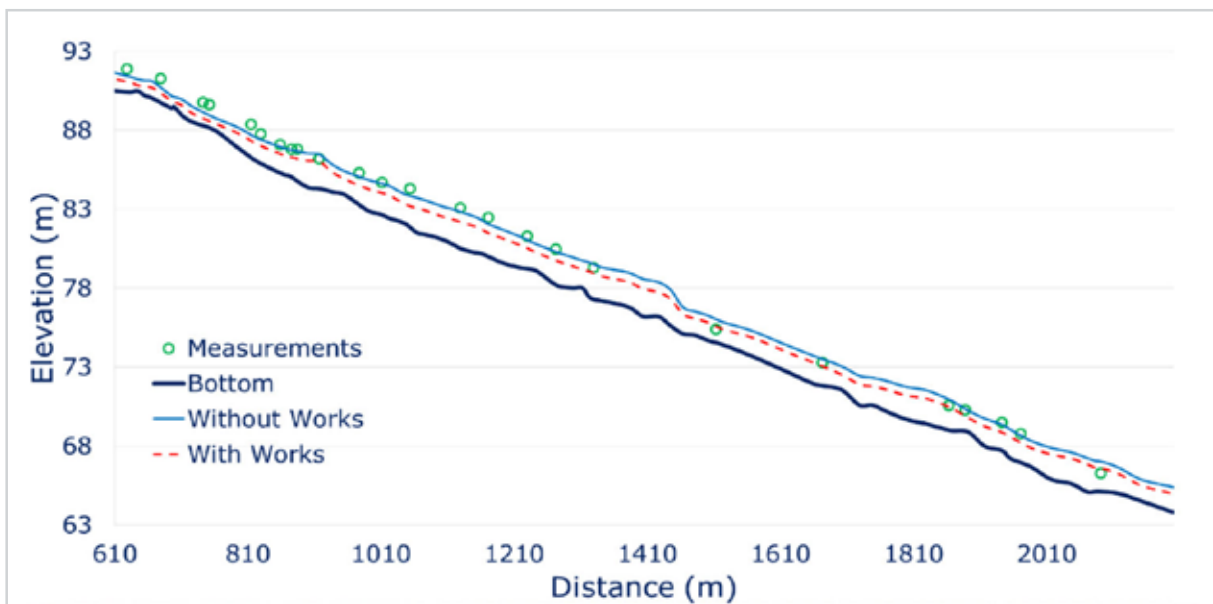


Εικόνα 8.39: Χρονική εξέλιξη της περιοχής κατάκλισης από την πλημμύρα στις ώρες 05:00, 07:00 και 09:00

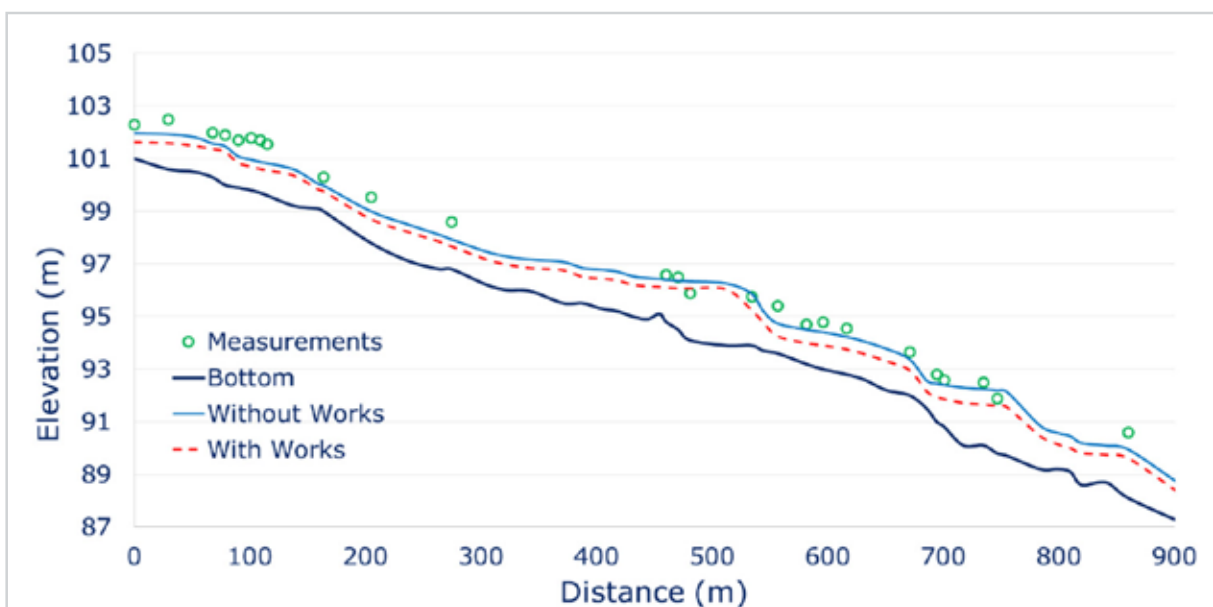
Πίνακας 8.22

Σύγκριση των υπολογισθέντων βαθών ροής και των χρόνων άφιξής τους με τις μετρήσεις στις θέσεις παρατήρησης O1 μέχρι O6				
Χαρακτηριστικό ροής	Μέγιστα βάθη ροής (m)		Χρόνοι άφιξης μέγιστου βάθους ροής	
	Μοντέλο	Μέτρηση	Μοντέλο	Μέτρηση
O1 (ρ. Αγίας Αικατερίνης)	2.86	3.70	06:52	07:15
O2 (πόλη)	1.56	1.55	07:05	07:38

03 (ρ. Σούρες)	2.80	2.80	08:03	08:15
04 (οδός Ρόκα)	1.55	1.54	07:05	07:09
05 (ρ. Σούρες)	3.53	3.65	07:53	07:30
06 (ΕΟΑΘ)	2.77	-	08:25	08:15



Εικόνα 8.40: Υπολογισθέντα και μετρημένα μέγιστα βάθη ροής κατά μήκος της οδού Κοροπούλη



Εικόνα 8.41: Υπολογισθέντα και μετρημένα μέγιστα βάθη ροής κατά μήκος της οδού Αίαντος

μέχρι 2.43 m, και γενικά δείχνουν μια καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Οι υπολογισθείσες μέγιστες ταχύτητες ροής στα δυο ρέματα κυμάνθηκαν από 3.60 μέχρι 6.50 m/s.

► **Περιοχή κατάκλυσης.** Στην Εικόνα 8.42 φαίνεται η έκταση της υπολογισθείσας περιοχής κατάκλυσης που είναι ίση με 494 ha και συμφωνεί ικανοποιητικά με την μετρημένη.



Εικόνα 8.42: Σύγκριση υπολογισθείσας περιοχής κατάκλισης με την παρατηρηθείσα (σημειώνεται με κίτρινο πολύγωνο) κατά την πλημμύρα του 2017

8.3.4 Βελτιστοποίηση του υδροδυναμικού μοντέλου

Σκοπός της βελτιστοποίησης – Σενάρια υπολογισμών

Για τη διαμόρφωση της οριστικής μορφής του υδροδυναμικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίησή του ώστε να προσδιοριστεί το πλέγμα που συνδυάζει το μικρότερο χρόνο υπολογισμού με την ελάχιστη απαιτούμενη ακρίβεια.

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για οκτώ σενάρια με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 8.23 για να διερευνηθεί η επίδραση:

- ▶ διαφορετικών διαστάσεων του υπολογιστικού πλέγματος και
- ▶ της επίλυσης των Εξισώσεων Ρηχών Υδάτων (SWE) έναντι των Εξισώσεων Κύματος Διάχυσης (DWE) στο χρόνο υπολογισμών του υδροδυναμικού μοντέλου, των οποίων τα σενάρια συμβολίζονται με SWE και DWE, αντίστοιχα.

Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στις εργασίες των Mitsopoulos et al. (2022a) και Mitsopoulos et al. (2022b).

Με βάση τους υπολογισμούς επιλέχθηκε το σενάριο SWE-4, το οποίο προέκυψε από τη βαθμονόμηση του μοντέλου και χαρακτηρίστηκε ως το «καλύτερο» σενάριο. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τα υπόλοιπα επτά σενάρια του Πίνακα 8.23 επιχειρώντας τη μείωση του χρόνου υπολογισμών χρησιμοποιώντας αδρότερο πλέγμα ή/και επιλύοντας τις DWE.

Πίνακας 8.23

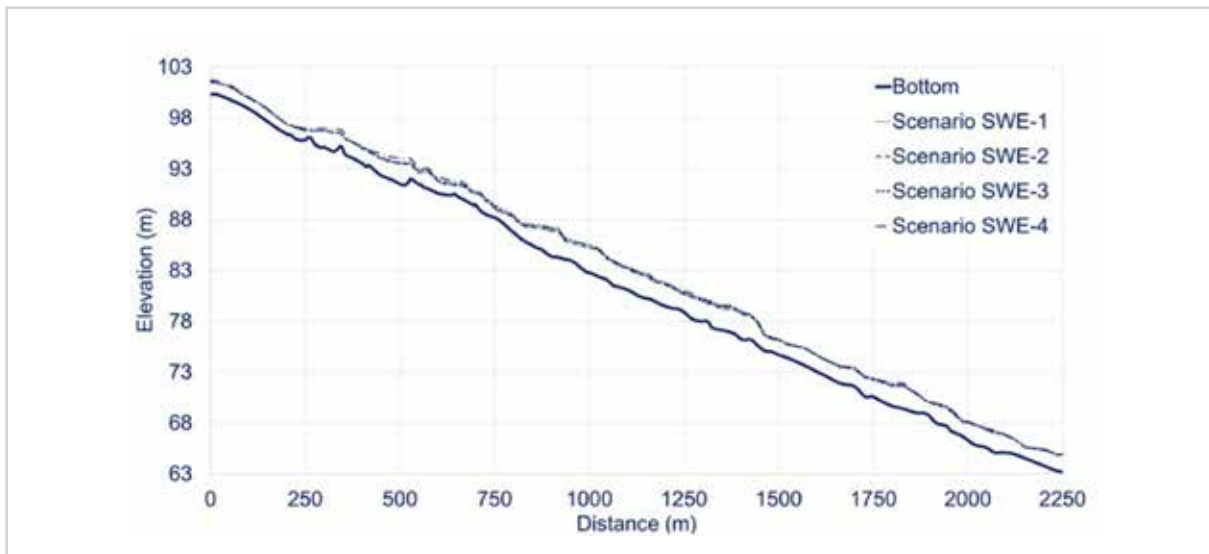
Χαρακτηριστικά των οκτώ σεναρίων βελτιστοποίησης του υδροδυναμικού μοντέλου								
Σενάριο	Διαστάσεις πλέγματος (m x m)			Αριθμός κελιών				Ολικός χρόνος υπολογισμών (min)
	Κύριο	A2 B1 NR	A1 B2 NO AR LS	Περιοχή A	Περιοχή B	Περιοχή C	Σύνολο	
DWE-1	50x50	5x5	10x10	18423	19564	5982	43969	42.05
DWE-2	40x40	5x5	10x10	19630	20358	7617	47605	44.97
DWE-3	20x20	5x5	10x10	30778	26314	21859	78951	67.40
DWE-4	20x20	2x2	10x10	46890	26314	21859	95063	74.47
SWE-1	50x50	5x5	10x10	18423	19564	5982	43969	66.87
SWE-2	40x40	5x5	10x10	19630	20358	7617	47605	77.83
SWE-3	20x20	5x5	10x10	30778	26314	21859	78951	107.33
SWE-4	20x20	2x2	10x10	46890	26314	21859	95063	126.72

Μέγιστα βάθη και μέγιστες ταχύτητες ροής

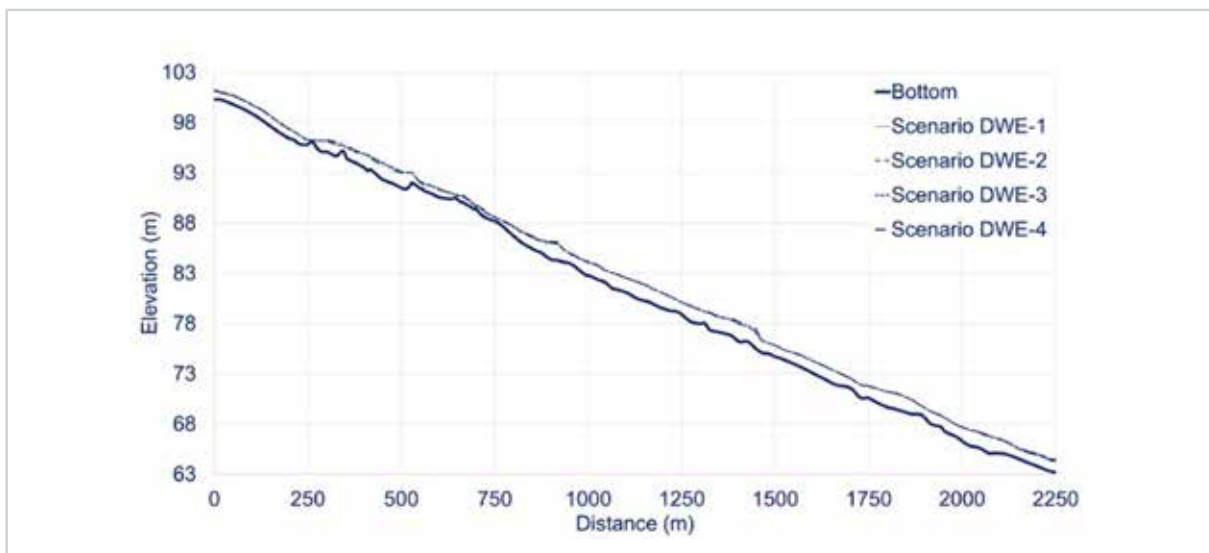
Στις Εικόνες 8.43 και 8.44 φαίνονται οι υπολογισμένες μέγιστες στάθμες της επιφάνειας ροής για τα σενάρια SWE και DWE, αντίστοιχα, κατά μήκος της οδού Κοροπούλη, που είναι ο κεντρικός δρόμος της Μάνδρας και ο οποίος υπέστη σοβαρές επιπτώσεις κατά την πλημμύρα του 2017. Στην Εικόνα 8.45, οι υπολογισμοί του σεναρίου SWE-4 συγκρίνονται με το αντίστοιχο DWE-4. Επίσης, στις Εικόνες 8.46 και 8.47 φαίνονται, ενδεικτικά, τα γραφήματα του βάθους ροής και της παροχής, αντίστοιχα, στη διατομή που διέρχεται από τη θέση παρακολούθησης L5.

Από τις Εικόνες 8.43 μέχρι 8.47 και τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

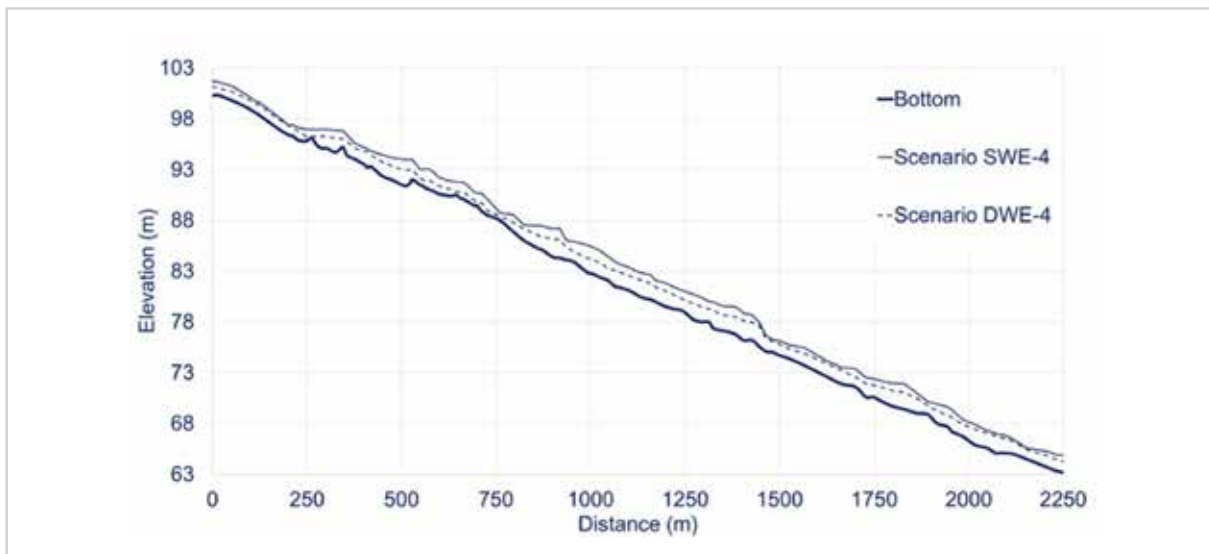
- ▶ Επιλύοντας τις DWE, τα μέγιστα βάθη ροής είναι ίσα με το 60-65% των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν επιλύοντας τις SWE, δηλ. οι υπολογισμοί με τις DWE υποεκτιμούν σημαντικά τα βάθη ροής.
- ▶ Τα βάθη ροής για τα σενάρια DWE-1, DWE-2 και DWE-3 δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές από το DWE-4, ενώ το υπολογιζόμενο σφάλμα (RMSE) είναι περίπου 9%. Έτσι, πρακτικά, ένα σχετικά αδρό πλέγμα, όπως το DWE-1 που επιλύει τις DWE μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς.
- ▶ Τα βάθη ροής για τα σενάρια SWE-1, SWE-2 και SWE-3 εμφανίζουν μεγαλύτερες διαφορές από το SWE-4 από τα αντίστοιχα σενάρια DWE, ενώ το υπολογιζόμενο RMSE κυμαίνεται από 9 μέχρι 16%. Έτσι, οι υπολογισμοί επιλύοντας τις SWE απαιτούν πολύ λεπτότερα πλέγματα, που θα πρέπει να καθοριστούν μετά από υπολογισμούς ανεξαρτησίας πλέγματος για την εξεταζόμενη περίπτωση.



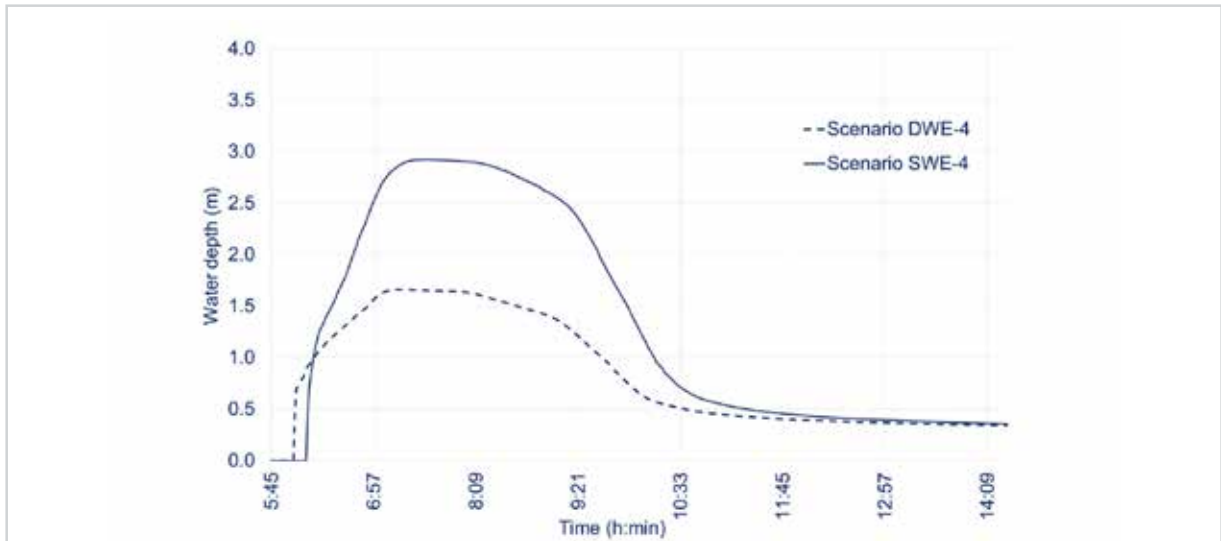
Εικόνα 8.43: Σύγκριση της στάθμης της επιφάνειας της ροής κατά μήκος της οδού Κοροπούλη για τα σενάρια SWE



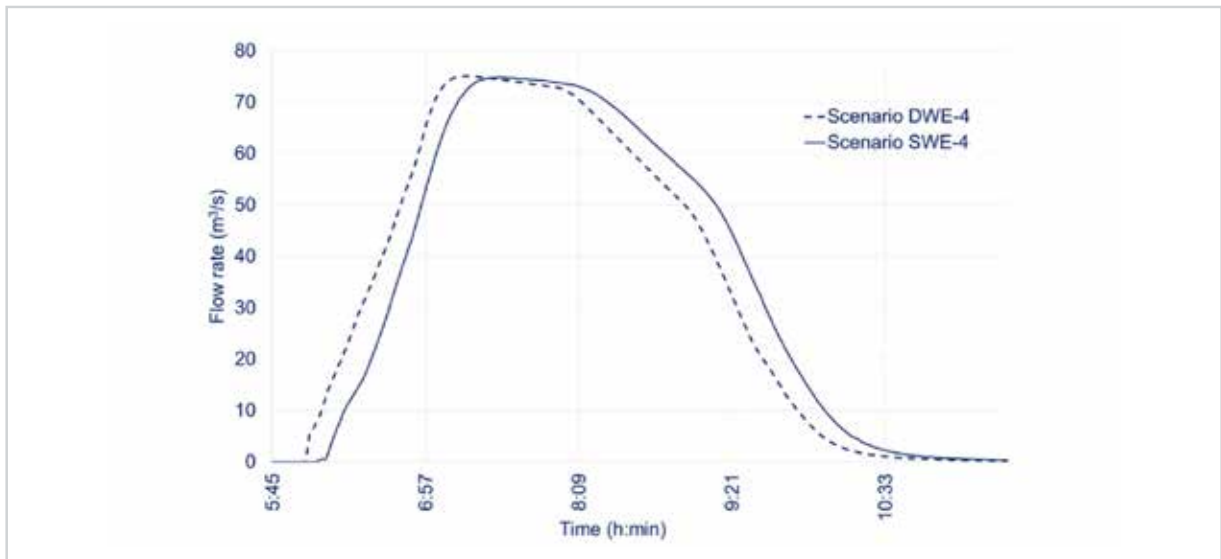
Εικόνα 8.44: Σύγκριση της στάθμης της επιφάνειας της ροής κατά μήκος της οδού Κοροπούλη για τα σενάρια DWE



Εικόνα 8.45: Σύγκριση της στάθμης της επιφάνειας της ροής κατά μήκος της οδού Κοροπούλη για τα σενάρια SWE-4 και DWE-4



Εικόνα 8.46: Σύγκριση των υδρογραφημάτων του βάθους ροής στη θέση L5 για τα σενάρια SWE-4 και DWE-4

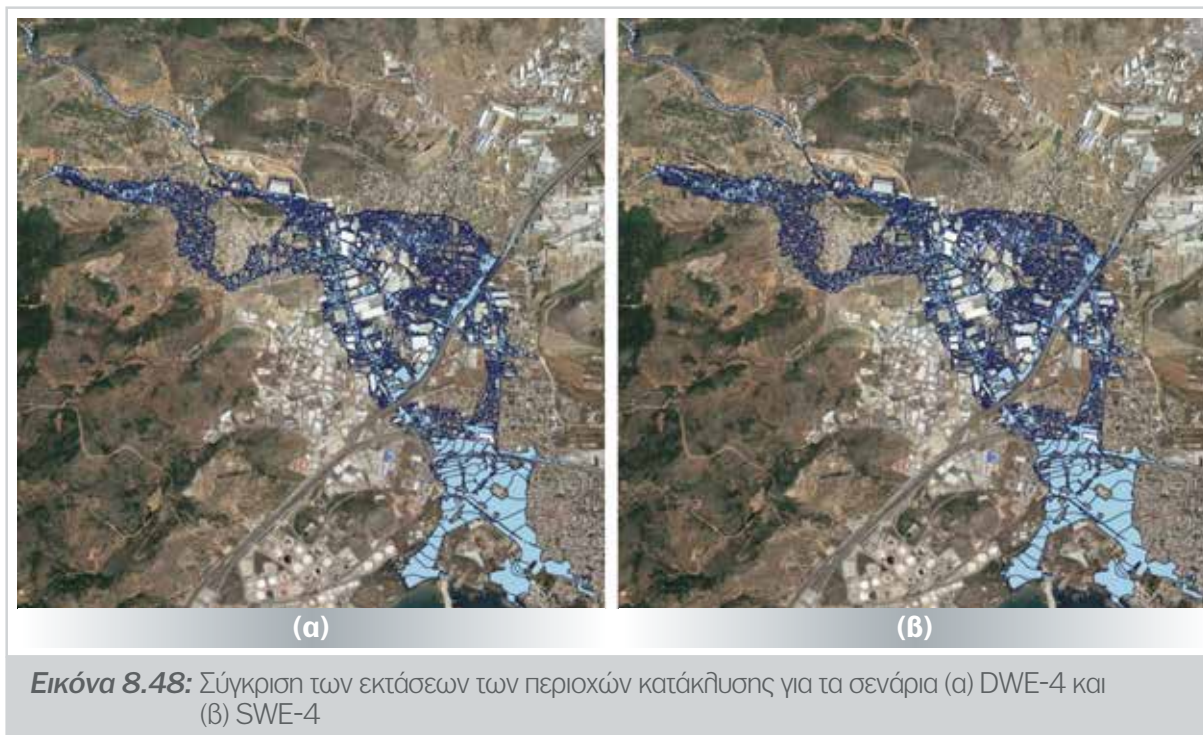


Εικόνα 8.47: Σύγκριση των υδρογραφημάτων της παροχής στη θέση L5 για τα σενάρια SWE-4 και DWE-4

Έκταση των περιοχών κατάκλισης

Στην Εικόνα 8.48 και στον Πίνακα 8.24 φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των υπολογισμένων περιοχών (πλημμυρικής) κατάκλισης, από τα οποία προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ▶ Οι συνολικές εκτάσεις των περιοχών κατάκλισης για τα σενάρια DWE-1, DWE-2 και DWE-3 παρουσιάζουν μικρές διαφορές (μικρότερες από 3.1%) από αυτή του σεναρίου DWE-4.
- ▶ Οι συνολικές εκτάσεις των περιοχών κατάκλισης για τα σενάρια SWE-1, SWE-2 και SWE-3 παρουσιάζουν επίσης μικρές διαφορές (μικρότερες από 5.2%) από αυτή του σεναρίου SWE-4, οι οποίες ωστόσο είναι μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα σενάρια DWE.
- ▶ Οι συνολικές εκτάσεις των περιοχών κατάκλισης για τα σενάρια SWE είναι μεγαλύτερες από αυτές των σεναρίων DWE κατά περίπου 4.9-7.9% με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται για τα λιεπτότερα πλέγματα.



Πίνακας 8.24

Έκταση των περιοχών κατάκλισης (km ²) και διαφορές μεταξύ σεναρίων (%)				
Σενάριο	Συνολική έκταση περιοχών κατάκλισης (km ²)	Διαφορά (%) μεταξύ αντίστοιχων σεναρίων (DWE-SWE/SWE)	Διαφορά από το σενάριο DWE-4	Διαφορά από το σενάριο SWE-4
DWE-1	2.63	-5.9%	-3.1	-
DWE-2	2.64	-3.0%	-2.8	-
DWE-3	2.72	-7.6%	0.2	-
DWE-4	2.72	-7.9%	0.0	-
SWE-1	2.80	5.9%	-	-5.2
SWE-2	2.72	3.0%	-	-4.5
SWE-3	2.95	7.6%	-	-0.1
SWE-4	2.95	7.9%	-	0.0

Χρόνοι άφιξης πλημμύρας

Υπολογίστηκαν οι χρόνοι άφιξης της πλημμύρας στις εννέα διατομές παρακολούθησης (L1 μέχρι L9) που φαίνονται στην Εικόνα 8.49.

Από τις τιμές των χρόνων άφιξης, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.25, διαπιστώνονται τα ακόλουθα:



Εικόνα 8.49: Θέσεις των εννέα διατομών παρακοιούθησης (L1 μέχρι L9)

- ▶ Στα σενάρια DWE η πλημμύρα φθάνει γρηγορότερα σε σχέση με τα σενάρια SWE, εξαιτίας των γενικά χαμηλότερων ταχυτήτων ροής και των μεγαλύτερων βαθών ροής που παρατηρούνται στα τελευταία. Οι καθυστερήσεις των σεναρίων SWE κυμαίνονται από 0 μέχρι 4 min στο ρ. Αγίας Αικατερίνης, και από 3 μέχρι 8 min στο ρ. Σούρες.
- ▶ Οι χρόνοι άφιξης της πλημμύρας δείχνουν γενικά μια ανεξαρτησία από το μέγεθος του πλέγματος για τα σενάρια με τα δυο λεπτότερα πλέγματα, εκτός από τα αδρά πλέγματα DWE-1 και SWE-1. Αυτά παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα καλύτερα πλέγματα, που κυμαίνονται από -9 min (γρηγορότερη άφιξη) μέχρι +5 min (αργότερη άφιξη - καθυστέρηση) για τα σενάρια SWE, και μέχρι 13 min (καθυστέρηση) για τα σενάρια DWE.

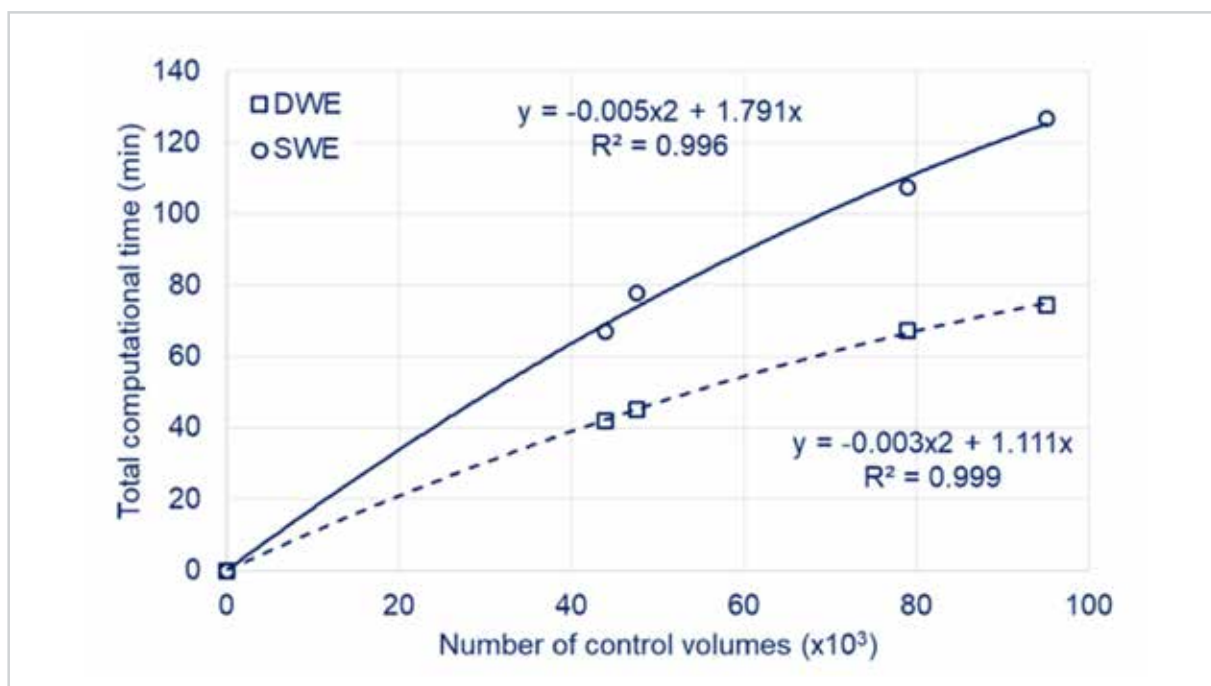
Πίνακας 8.25

Χρόνοι άφιξης πλημμύρας στις εννέα διατομές παρακοιούθησης									
Θέση παρακοιούθησης	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Σενάριο	ρ. Αγίας Αικατερίνης						ρ. Σούρες		
DWE-1	5:22	5:40	5:52	6:05	6:02	6:14	7:23	7:06	7:40
DWE-2	5:22	5:42	5:51	6:04	6:00	6:13	7:19	6:57	7:35
DWE-3	5:22	5:40	5:52	6:01	6:02	6:14	7:15	6:55	7:28

DWE-4	5:22	5:40	5:50	6:01	6:02	6:14	7:15	6:55	7:27
SWE-1	5:10	5:34	5:44	6:00	6:01	6:16	7:21	7:02	7:40
SWE-2	5:22	5:41	5:48	6:02	6:06	6:19	7:20	7:03	7:33
SWE-3	5:22	5:40	5:52	6:05	6:10	6:22	7:18	7:02	7:35
SWE-4	5:22	5:40	5:52	6:05	6:10	6:22	7:18	7:02	7:35

Χρόνοι υπολογισμών

Στην Εικόνα 8.50 φαίνεται η εξάρτηση του χρόνου υπολογισμών (y) από το συνολικό αριθμό των κελιών (x) με τις αντίστοιχες εξισώσεις παλινδρόμησης που χαρακτηρίζονται από ένα πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης (R). Γενικά, στα υπολογιστικά πλέγματα που εξετάστηκαν, οι συνολικοί χρόνοι υπολογισμού των σεναρίων που επιλύουν τις SWE είναι κατά 58.8-62.7% μεγαλύτεροι από τους υπολογισμούς που επιλύουν τις DWE.



Εικόνα 8.50: Εξάρτηση του χρόνου υπολογισμών από το συνολικό αριθμό των κελιών

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων των υπολογισμών βελτιστοποίησης

Από τους υπολογισμούς βελτιστοποίησης για τα οκτώ σενάρια διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- ▶ Τα υπολογισμένα μέγιστα βάθη ροής στους κεντρικούς δρόμους της Μάνδρας με επίλυση των DWE είναι ίσα με το 60-65 % των αντίστοιχων τιμών με επίλυση των SWE. Αυτή η υποεκτίμηση του βάθους ροής με τις DWE που οφείλεται στους όρους αδράνειας των εξισώσεων ποσότητας κίνησης (βλ. υποκεφάλαιο 4.5.2) παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές. Για παράδειγμα, οι Hunter et al. (2008) χρησιμοποίησαν διάφορα μοντέλα σε μια αστική λεκάνη απορροής 1.0 km x 0.4 km στην πόλη της Γλασκώβης στη Σκωτία για να προσομοιώσουν ένα συμβάν πλημμύρας στις 30 Ιουλίου 2002 και παρατήρησαν ότι με τις DWE υπολογίζονται τιμές βάθους νερού μέχρι 5 cm μικρότερες από αυτές με τις SWE.

Κατά συνέπεια, οι υπολογισμένες μέγιστες ταχύτητες νερού στους κεντρικούς δρόμους της Μάνδρας με επίλυση των DWE είναι σημαντικά μεγαλύτερες, περίπου 2 φορές (μέγιστο= 5 φορές) από τις αντίστοιχες ταχύτητες που υπολογίζονται με επίλυση των SWE. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην αγνόηση των δυο βασικών όρων της επιτάχυνσης, των οποίων ο ρόλος είναι εξαιρετικά σημαντικός για την ακριβή μοντελοποίηση των ταχέως εξελισσόμενων κυμάτων πλημμύρας (Brunner, 2020).

- ▶ Οι παραπάνω σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων, δηλ. της επίλυσης των εξισώσεων SWE ή DWE, παρατηρούνται στους κεντρικούς δρόμους της Μάνδρας, όπου οι τριβές είναι σχετικά μικρές ($n=0.02$) ή με άλλα λόγια η επίδραση των όρων συνεκτικότητας (δυνάμεις τριβής) δεν είναι πολύ έντονη. Όταν, όμως, το κύμα πλημμύρας διέρχεται από κατοικημένες περιοχές, με αρκετά υψηλούς συντελεστές τραχύτητας ($n=0.10-0.20$, όπως σε κήπους), τότε αυτές οι διαφορές γίνονται λιγότερο έντονες, εξαιτίας της ισχυρής επίδρασης των όρων τριβής, ενώ τα μέγιστα βάθη και οι ταχύτητες ροής παρουσιάζουν διαφορές που είναι μικρότερες από 3-8 %. Επομένως, εάν ο σκοπός των υπολογισμών είναι να υπολογιστούν με ακρίβεια τα βάθη και τις ταχύτητες ροής σε περιοχές με σχετικά μικρές τριβές, τότε δεν συνιστάται η επίλυση των DWE. Η σύσταση αυτή συμφωνεί με την επισήμανση των Liang et al. (2008), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι δεν είναι δυνατό να γίνουν ακριβείς υδροδυναμικοί υπολογισμοί επιλύοντας τις DWE.
- ▶ Εξαιτίας των μεγαλύτερων ταχυτήτων ροής που υπολογίζονται με τις DWE, το κύμα πλημμύρας φτάνει ταχύτερα στις θέσεις παρακολούθησης κατά 0-4 min στο ρ. Αγίας Αικατερίνης και κατά 3-8 min στο ρ. Σούρες σε σχέση με τους υπολογισμούς επιλύοντας τις SWE. Επιπλέον, οι υπολογισμένες συνολικές περιοχές πλημμύρας με τις DWE είναι μικρότερες μέχρι και 7.9% από αυτές που προκύπτουν επιλύοντας τις SWE, δηλ. οι υπολογισμοί με τις DWE υποεκτιμούν την έκταση της περιοχής κατάκλισης. Αυτό οφείλεται στην εκτεταμένη εξάπλωση του πλημμυρικού κύματος όταν επιλύονται οι SWE, στις οποίες λαμβάνονται υπόψη οι όροι επιτάχυνσης. Αυτή η μεγαλύτερη έκταση των περιοχών κατάκλισης παρατηρήθηκε επίσης από τους Hunter et al. (2008), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι εξαιτίας της επίδρασης των δυνάμεων αδράνειας στις SWE, η ροή έχει σημαντική ορμή για να υπερπηδήσει εμπόδια που υπάρχουν στο έδαφος και να συνεχίσει περαιτέρω επεκτείνοντας έτσι την έκταση της περιοχής κατάκλισης περισσότερο από τις DWE. Έτσι, από την άποψη της έγκαιρης προειδοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνολικοί υπολογιστικοί χρόνοι των σεναρίων DWE είναι 58.8-62.7% μικρότεροι από τους αντίστοιχους με τις SWE, η χρήση των DWE για την παροχή μιας υπηρεσίας τύπου ΥΠ4 (βλ. Πίνακα 2.2) σε ένα ΣΕΠΠ, μπορεί να είναι επαρκής για την πρόγνωση της έκτασης των περιοχών κατάκλισης, παρά την αναμενόμενη υποεκτίμησή τους. Επιπλέον, οι υπολογισμοί με τις DWE μπορούν να θεωρηθούν συντηρητικοί στον υπολογισμό των χρόνων άφιξης της πλημμύρας, αν και ανεπαρκείς για την ακριβή μοντελοποίηση των βαθών και των ταχυτήτων ροής. Σε κάθε περίπτωση, εάν υιοθετηθούν οι παραδοχές των DWE και χρησιμοποιηθούν σε ένα ΣΕΠΠ, θα πρέπει να εξασφαλιστεί οπωσδήποτε η ανεξαρτησία των υπολογισμών από τις διαστάσεις του πλέγματος. Στις περιπτώσεις που οι αναμενόμενοι χρόνοι προειδοποίησης είναι πολύ μικροί, ενδεχομένως να είναι επιβεβλημένη η επιλογή της επίλυσης των SWE.

8.3.5 Επίδραση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στη συμπεριφορά της πλημμύρας του 2017

Επίδραση των έργων στα χαρακτηριστικά ροής

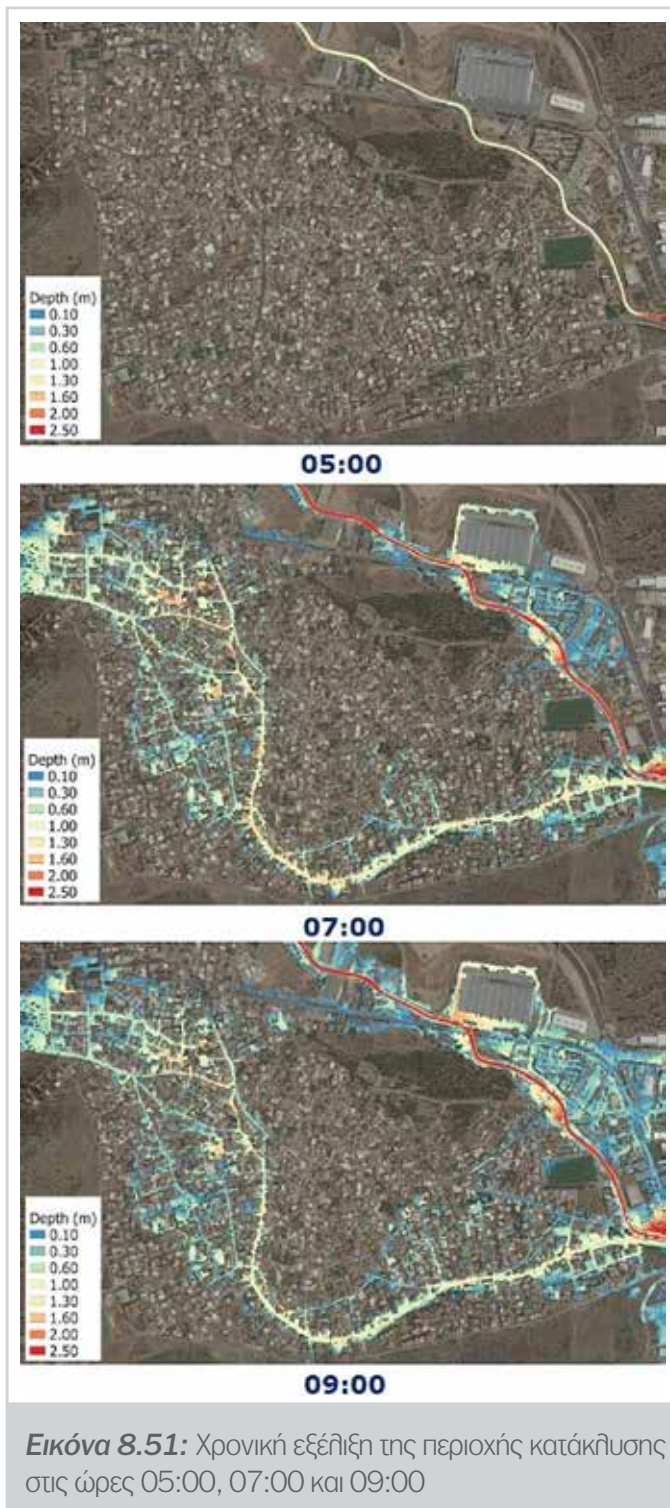
Στην Εικόνα 8.51 παρουσιάζεται η υποθετική χρονική εξέλιξη της περιοχής κατάκλισης τις ώρες 05:00, 07:00 και 09:00 με τα σχεδιαζόμενα αντιπλημμυρικά έργα (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.1). Στον Πί-

νακα 8.26 συγκρίνονται τα υπολογισμένα χαρακτηριστικά ροής με και χωρίς τα έργα. Σημειώνεται ότι τα βάθη και οι ταχύτητες ροής υπολογίζονται σε θέσεις των 2D περιοχών ροής (A1, A2, A3 και S3, SA1 και SA2) ή στους κύριους δρόμους της Μάνδρας που είναι η οδός Κοροπούλη (A4, A5, A6 και A7), η Εθνική Οδός ΠΕΟΑΘ και η οδός Ρόκα (S4 και S5) που φαίνονται στην Εικόνα 8.52

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, η υπερχειλίση του ρ. Αγίας Αικατερίνης με τα έργα αρχίζει στις 05:20 π.μ. Στη συνέχεια η ροή κατευθύνεται προς την πόλη της Μάνδρας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.51, και 20 min αργότερα (στις 05:40 π.μ.) τα βάθη ροής στους κύριους δρόμους της Μάνδρας φτάνουν το 0.30 m, ενώ μετά από περίπου 2 ώρες (στις 7:05 - 7:20 π.μ.) φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Στις 8:00-8:30 π.μ. παρατηρούνται τα μέγιστα βάθη ροής στη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας.

Οι κύριες επιπτώσεις της παρουσίας των αντιπλημμυρικών έργων στα χαρακτηριστικά ροής είναι οι ακόλουθες:

- ▶ Τα αντιπλημμυρικά έργα επηρεάζουν την κατανομή της πλημμυρικής παροχής στην περιοχή υπολογισμού. Οι μέγιστες παροχές στο κεντρικό τμήμα της Μάνδρας (διατομές A1 μέχρι A7) μειώνονται κατά περίπου 50 % εξαιτίας της παρουσίας του αγωγού εκτροπής, ο οποίος μεταφέρει $60.3 \text{ m}^3/\text{s}$ από τα $150.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (παροχή αιχμής της πλημμύρας του 2017 στο ρ. Αγίας Αικατερίνης) στο ρ. Σούρες, ενώ μόλις $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ απορρέουν επιφανειακά προς το ρ. Σούρες. Το κύριο τμήμα της ροής ($90.1 \text{ m}^3/\text{s}$) εισέρχεται στην πόλη της Μάνδρας και ρέει κατά μήκος των κύριων οδών της, με περίπου 15-25% μικρότερες ταχύτητες ροής και 19-29 % μικρότερα βάθη ροής από τις τιμές τους που παρατηρήθηκαν χωρίς τα έργα, εξαιτίας των μειωμένων κατά 48% παροχών.
- ▶ Οι μέγιστες παροχές στην περιοχή του ρ. Σούρες (διατομές S1 μέχρι S5) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές τους χωρίς τα έργα εξαιτίας του αγωγού εκτροπής. Η παροχή αιχμής των $172.5 \text{ m}^3/\text{s}$ του (ανάντη) υδρογραφήματος αυξάνεται στα $232.3 \text{ m}^3/\text{s}$ στη διατομή S3, ενώ η παροχή που κατευ-



θύνεται ανατολικά προς την περιοχή της Μαγούλας και της Αττικής Οδού (διατομές SA1 και SA2) είναι 33.3-34.0 m³/s που είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή χωρίς τα έργα (6.3-6.8 m³/s). Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται στα βάθη ροής. Η διαφορά είναι εντονότερη στην περιοχή της Αττικής Οδού, επηρεάζοντας την έκταση της περιοχής κατάκλισης.



Εικόνα 8.52: Θέσεις υπολογισμών των χαρακτηριστικών ροής

Πίνακας 8.26

Επίδραση των αντιπλημμυρικών έργων στις μέγιστες παροχές, βάθη και ταχύτητες ροής στις θέσεις παρακολούθησης						
Χαρακτηριστικό ροής	Μέγιστες παροχές (m ³ /s)		Μέγιστα βάθη ροής (m)		Μέγιστες ταχύτητες ροής (m/s)	
	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι
Αντιπλημμυρικά έργα						
A1	150.5	150.5	0.45	0.45	1.57	1.69
A2	150.4	147.2	0.49	0.24	1.47	1.11
A3	150.0	90.1	1.25	0.95	2.65	2.42
A4 (οδός Κοροπούλη)	146.7	76.1	1.64	1.30	9.54	7.70
A5 (οδός Κοροπούλη)	146.7	76.1	2.29	1.62	7.58	5.66
A6 (οδός Κοροπούλη)	146.6	75.9	1.82	1.48	6.76	5.22
A7 (οδός Κοροπούλη)	145.9	75.3	1.92	1.49	5.15	4.39
AS1 (ΕΟΑΘ)	319.2	288.7	0.90	0.63	7.05	5.53

AS2 (ΕΟΑΘ)	313.5	276.1	0.91	0.58	6.48	4.86
S1 (ΕΟΑΘ)	172.5	172.5	1.55	0.55	2.97	5.70
S2 (ΕΟΑΘ)	172.4	172.5	0.75	-	5.20	-
S3	173.2	232.3	1.41	0.68	1.70	1.01
S4 (οδός Ρόκα)	175.7	228.3	0.55	-	4.11	-
S5 (οδός Ρόκα)	153.0	175.1	0.29	0.29	2.94	2.79
SA1	6.3	33.3	0.69	0.81	0.47	1.11
SA2	5.8	34.0	0.25	0.48	1.12	1.35

Επίδραση των έργων στην έκταση της περιοχής κατάκλισης

Στην Εικόνα 8.53 φαίνεται η επίδραση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στην έκταση της περιοχής κατάκλισης, η οποία μειώνεται από 494 ha σε 409 ha (κατά 17%) με τα έργα.



Εικόνα 8.53: Υπολογισθείσα περιοχή κατάκλισης κατά την πλημμύρα του 2017 χωρίς τα έργα (με πράσινο χρώμα) και με τα έργα (με ροζ χρώμα)

Επίδραση των έργων στους χρόνους άφιξης της πλημμύρας

Οι χρόνοι άφιξης της πλημμύρας και του μέγιστου βάθους ροής φαίνονται στον Πίνακα 8.27. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, χωρίς τα έργα η πλημμύρα έφτασε στην οδό Αίαντος (O2) στις 4:30 και στην οδό Ρόκα (O4) στις 4:27, ενώ τα αντίστοιχα μέγιστα βάθη ροής έφτασαν στις 7:05, δηλ. περίπου 3.5 ώρες αργότερα. Με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας, η ροή παρέμεινε στον αγωγό εκτροπής για παροχές μικρότερες από τη μέγιστη υδραυλική ικανότητα του αγωγού εκτροπής ($62 \text{ m}^3/\text{s}$). Στη συνέ-

χεια, στις 5:20 υπερχειλίσε και έφτασε στην οδό Αίαντος στις 5:48 και στην οδό Ρόκα στις 6:06, δηλ. 1.3 – 1.7 ώρα αργότερα από την ώρα χωρίς τα έργα.

Πίνακας 8.27

Επίδραση των αντιπλημμυρικών έργων στους χρόνους άφιξης της πλημμύρας στις διατομές παρακολούθησης				
Διατομή παρακολούθησης	Χρόνοι άφιξης πλημμύρας		Χρόνοι παρατήρησης του μέγιστου βάθους ροής	
	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι
Αντιπλημμυρικά έργα				
Ο1 (ρ. Αγίας Αικατερίνης)	04:57	04:59	06:52	06:57
Ο2 (πόλη)	04:30	05.48	07:05	07:06
Ο3 (ρ. Σούρες)	05:51	03:20	08:03	07:40
Ο4 (οδός Ρόκα)	04:27	06:06	07:05	07:10
Ο5 (ρ. Σούρες)	03:54	03:15	07:53	07:59
Ο6 (ΕΟΑΘ)	06:00	06:34	08:25	08:28

Σύνοψη της επίδρασης των έργων

Με βάση τους υπολογισμούς, η επίδραση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας συνοψίζεται στα ακόλουθα:

- ▶ Κατά μήκος των κεντρικών οδών της Μάνδρας, η παρουσία των έργων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των χαρακτηριστικών της ροής, δηλ. των παροχών (48 %), των μέγιστων βαθών ροής (19-29 %) και των μέγιστων ταχυτήτων ροής (15-25 %). Παρά τις παραπάνω μειώσεις, οι επιπτώσεις ενός ακραίου συμβάντος πλημμύρας θα ήταν σημαντικές, ακόμη και με τα αντιπλημμυρικά έργα. Ειδικά, στην περίπτωση των υπόγειων κτιρίων, τα οποία χρειάζονται ένα πολύ μικρό βάθος ροής για να πλημμυρίσουν, οι διαφορές στις επιπτώσεις θα μπορούσαν να είναι ακόμη μικρότερες. Όμως, οι παραπάνω μειώσεις των χαρακτηριστικών της ροής μπορεί να περιορίσουν τις ζημιές της πλημμύρας σε διάφορους τομείς, όπως π.χ. στα κτίρια και τις υποδομές (Thieken et al., 2005· Kreibich et al., 2009). Είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογιστούν με ακρίβεια οι επιπτώσεις της μείωσης των χαρακτηριστικών αυτών στον περιορισμό των παραπάνω ζημιών, καθώς αυτές επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες της περιοχής κατάκλισης, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των κτιρίων και των υποδομών.
- ▶ Η παρουσία των έργων καθυστερεί την άφιξη της πλημμύρας στους κεντρικούς δρόμους της πόλης κατά 1.5 ώρα περίπου. Αυτή η αξιοσημείωτη διαφορά στους χρόνους άφιξης παρέχει ένα χρονικό παράθυρο που μπορεί να αξιοποιηθεί από τις αρχές και τον τοπικό πληθυσμό για τη διευκόλυνση των διαδικασιών εκκένωσης, ειδικά όταν πρόκειται για άτομα με αναπηρία ή άλλα προβλήματα κινητικότητας και άτομα που ζουν σε υπόγεια κτιρίων. Αυτό το χρονικό παράθυρο έχει επίσης τη δυνατότητα να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του ΣΕΠΠ, κάνοντας μια διαφορά που μπορεί να είναι ουσιαστική.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις, οι οποίες επαληθεύουν τη σημασία των αντιπλημμυρικών έργων ακόμη και για μια τέτοια ακραία πλημμύρα (T=150 έτη), είναι σύμφωνες με τα ευρήματα επιτόπιας έρευνας με τη χρήση ερωτηματολογίων (Καραμούστου και Στάμου, 2019), στην οποία σχεδόν ολόκληρος ο τοπικός πληθυσμός (98.8 %) θεωρεί «την έλλειψη αντιπλημμυρικών έργων» ως έναν από τους «σημαντικότερους λόγους της καταστροφής».

8.4 Βήμα 4: Εντοπισμός των Περιοχών Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

8.4.1 Καθορισμός σεναρίων υπολογισμών - Επίδραση κλιματικής αλλαγής

Για τον εντοπισμό των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας πραγματοποιήθηκαν αρχικά υπολογισμοί χωρίς τα αντιπλημμυρικά έργα για 15 συνδυασμούς τιμών της περιόδου επαναφοράς (T) και της διάρκειας βροχής χρησιμοποιώντας το συμβολισμό που φαίνεται στον Πίνακα 8.28.

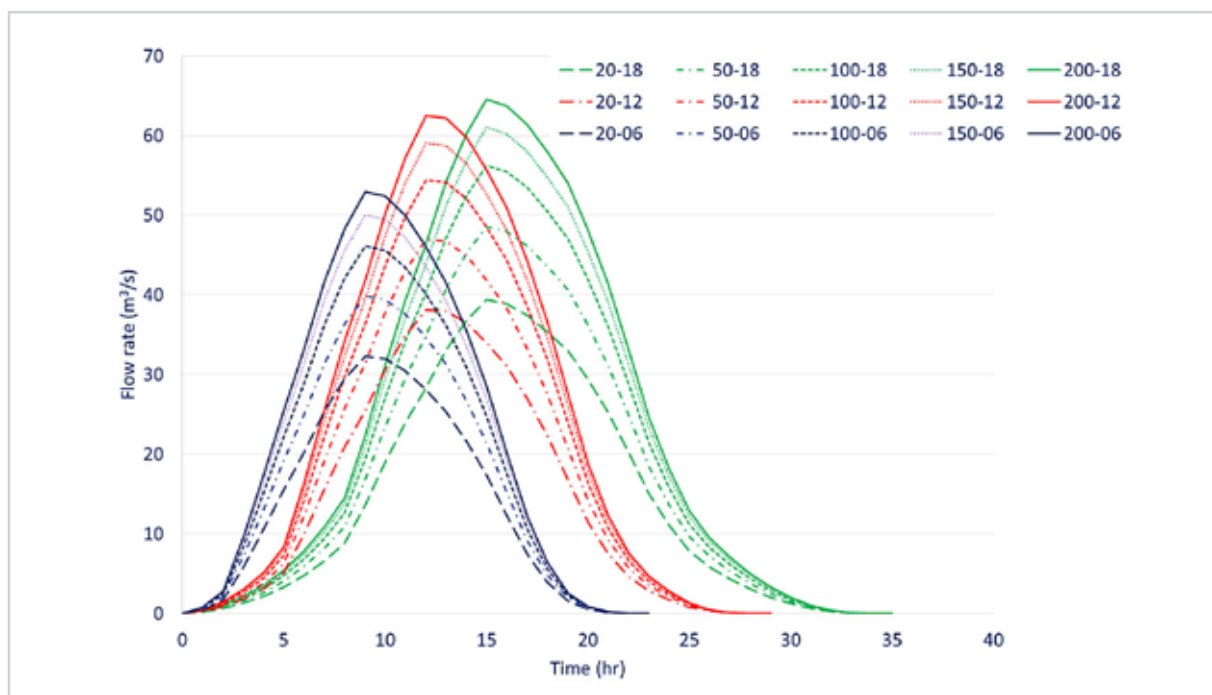
Στη συνέχεια, επαναλήφθηκαν οι υπολογισμοί των 15 σεναρίων με αντιπλημμυρικά έργα προσθέτοντας στο κάθε σύμβολο το W, δηλ. το σενάριο S100-06 με έργα αντιπλημμυρικής προστασίας σημειώνεται ως S100-06W. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για συνολικά 30 σεσάρια. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της ΚΑ εφαρμόστηκε η απλούστερη προσέγγιση που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 4.3.4 θεωρώντας μια αύξηση της ακραίας βροχόπτωσης ίση με 5 %.

Πίνακας 8.28

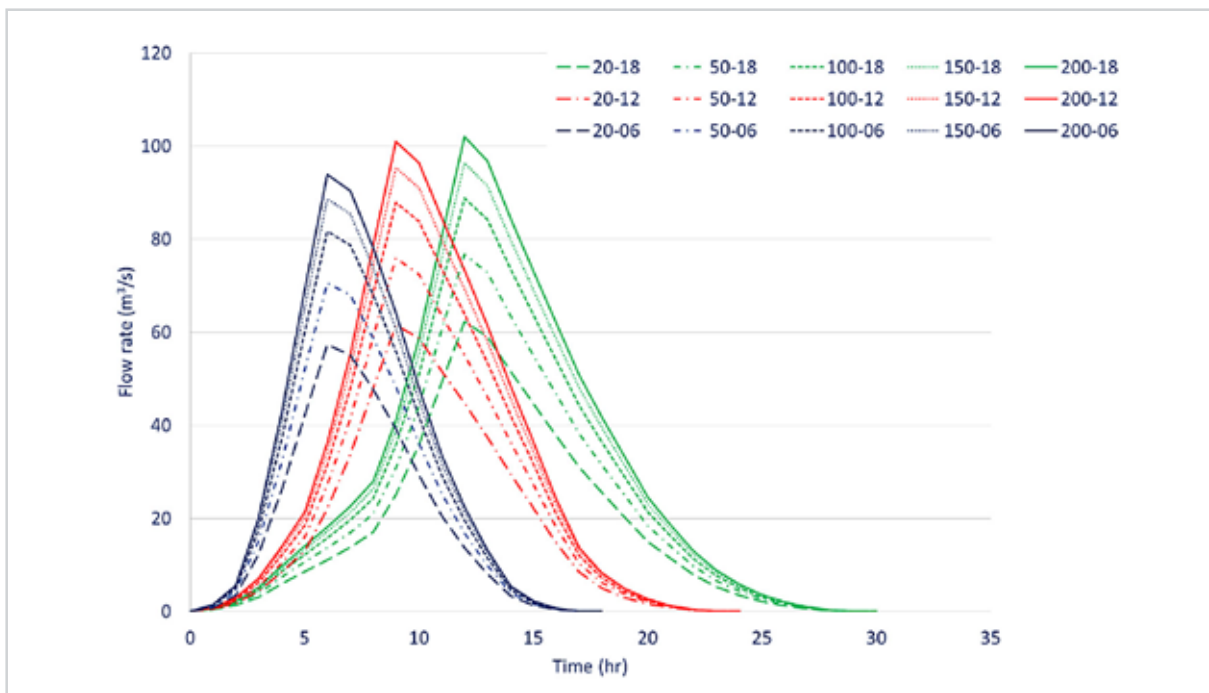
Σενάρια υπολογισμών περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας					
Διάρκεια (h)	T=20 έτη	T=50 έτη	T=100 έτη	T=150 έτη	T=200 έτη
6	S20-06	S50-06	S100-06	S150-06	S200-06
12	S20-12	S50-12	S100-12	S150-12	S200-12
18	S20-18	S50-18	S100-18	S150-18	S200-18

8.4.2 Υπολογισμοί υδρολογικού μοντέλου - Επίδραση κλιματικής αλλαγής

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με το υδρολογικό μοντέλο για τα τριάντα σεσάρια και προσδιορίστηκαν τα πλημμυρογραφήματα που φαίνονται στις Εικόνες 8.54 και 8.55 με τις μέγιστες παροχές αιχμής που φαίνονται στους Πίνακες 8.29 και 8.30.



Εικόνα 8.54: Πλημμυρογραφήματα για τα 15 σεσάρια υπολογισμών για το ρ. Σούρες



Εικόνα 8.55: Πλημμυρογραφήματα για τα 15 σενάρια υπολογισμών στο ρ. Αγίας Αικατερίνης

Πίνακας 8.29

Παροχές αιχμής του ρ. Σούρες					
	T (y)				
t (h)	20	50	100	150	200
6	32.31	39.82	46.11	50.04	52.96
12	38.13	46.99	54.41	59.05	62.49
18	39.39	48.55	56.21	61.00	64.56

Πίνακας 8.30

Παροχές αιχμής του ρ. Αγίας Αικατερίνης					
	T (y)				
t (h)	20	50	100	150	200
6	57.27	70.59	81.72	88.7	93.86
12	58.77	75.88	87.85	95.35	100.9
18	62.26	76.73	88.83	96.41	102.03

8.4.3 Υπολογισμοί έκτασης των περιοχών κατάκλισης

Υπολογίστηκε η έκταση των περιοχών κατάκλισης για τα τριάντα σενάρια, η οποία κυμάνθηκε από 0.10 μέχρι 2.14 km². Στην Εικόνα 8.56 φαίνεται η περιοχή κατάκλισης ενδεικτικά για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα). Στον Πίνακα 8.31 παρουσιάζεται η μείωση της έκτασης της περιοχής κατάκλισης εξαιτίας της παρουσίας των αντιπλημμυρικών έργων.



Εικόνα 8.56: Έκταση της περιοχής κατάκλισης για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)

Πίνακας 8.31

Μείωση (%) της έκτασης της περιοχής κατάκλισης εξαιτίας των πλημμυρικών έργων					
T(y)	20	50	100	150	200
20	93	77	69	61	56
t=12 h	89	73	62	56	54
t=18 h	89	73	62	55	53

Με βάση τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Η έκταση των περιοχών κατάκλισης κυμαίνεται από 1.45 μέχρι 2.4 km² χωρίς τα έργα για τα ακραία σενάρια S20-06 και S200-18 και από 0.10 μέχρι 1.0 km² με τα έργα για τα ακραία σενάρια W20-06 μέχρι W200-18. Η έκταση των περιοχών κατάκλισης αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και την αύξηση της διάρκειας της βροχής.
- ▶ Η επίδραση των έργων στην έκταση των περιοχών κατάκλισης είναι σημαντική. Η παρουσία των έργων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έκτασης αυτής από 53 μέχρι 89 %. Όπως αναμενόταν, αυτή η μείωση αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς, ενώ για την ίδια περίοδο επαναφοράς η επίδραση της διάρκειας της βροχής είναι πιο έντονη στις μικρότερες περιόδους επαναφοράς.

8.4.4 Υπολογισμοί των χαρακτηριστικών της ροής

Στις Εικόνες 8.57 και 8.58 φαίνονται τα μέγιστα βάθη και οι μέγιστες ταχύτητες ροής, αντίστοιχα, για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα).



Εικόνα 8.57: Μέγιστα βάθη ροής για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)



Εικόνα 8.58: Μέγιστες ταχύτητες ροής για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)

Με βάση τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Κατά μήκος της οδού Κοροπούλη, τα μέγιστα βάθη ροής κυμαίνονται από 1.58 μέχρι 1.98 m για τα ακραία σενάρια S20-06 μέχρι S200-18 (χωρίς τα έργα), αντίστοιχα, και από 0.60 μέχρι 1.18 m για τα ακραία σενάρια W20-06 μέχρι W200-18 (με τα έργα), αντίστοιχα. Οι μέγιστες ταχύτητες ροής κυμαίνονται από 8.66 μέχρι 10.21 m/s για τα σενάρια S20-06 έως S200-18 (χωρίς τα έργα), αντίστοιχα, και από 4.13 μέχρι 8.40 m/s για τα σενάρια W20-06 μέχρι W200-18 (με τα έργα), αντίστοιχα. Τα μέγιστα βάθη ροής και οι ταχύτητες ροής αυξάνονται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και την αύξηση της διάρκειας βροχής.

- ▶ Η επίδραση των αντιπλημμυρικών έργων στα μέγιστα βάθη του νερού είναι σημαντική. Η παρουσία των έργων μειώνει τα μέγιστα βάθη ροής κατά 38-62% και τις μέγιστες ταχύτητες ροής κατά 18-52%. Οι μεγαλύτερες μειώσεις παρατηρούνται για τις μικρές περιόδους επαναφοράς και τις μεγαλύτερες διάρκειες βροχής.

8.4.5 Υπολογισμοί πλημμυρικής επικινδυνότητας

Στις Εικόνες 8.59 και 8.60 φαίνεται η κατανομή της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην αστική περιοχή και τη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας, αντίστοιχα, για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα).



Εικόνα 8.59: Πλημμυρική επικινδυνότητα στην αστική περιοχή της Μάνδρας για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)



Εικόνα 8.60: Πλημμυρική επικινδυνότητα στη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)

Με βάση τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Οι μέγιστες τιμές της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην κατοικημένη περιοχή κυμαίνονται από 0.8 μέχρι 1.0 για τα ακραία σενάρια S20-06 έως S200-18 (χωρίς έργα), αντίστοιχα, και από 0.6 μέχρι 0.8 για τα ακραία σενάρια W20-06 μέχρι W200-1 (με τα έργα), αντίστοιχα. Η πλημμυρική επικινδυνότητα ακολουθεί τη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών ροής και αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και την αύξηση της διάρκειας της βροχής.
- ▶ Η επίδραση των αντιπλημμυρικών έργων στη μέση πλημμυρική επικινδυνότητα κατά μήκος της οδού Κοροπούλη είναι έντονη. Η μέση τιμή της πλημμυρικής επικινδυνότητας κυμαίνεται από 0.75 μέχρι 0.78 για τα ακραία σενάρια S20-06 μέχρι S200-18 και από 0.19 μέχρι 0.65 για τα ακραία σενάρια W20-06 μέχρι W200-18. Με άλλα λόγια, η παρουσία των έργων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πλημμυρικής επικινδυνότητας κατά 24-75% και όπως αναμενόταν, η μείωση αυτή μειώνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και τη μείωση της διάρκειας της βροχής. Σημειώνεται ότι αυτή η εξάρτηση από τη διάρκεια της βροχής μειώνεται σε βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας.

8.4.6 Υπολογισμοί πλημμυρικής τρωτότητας

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν δυο μέθοδοι υπολογισμού της πλημμυρικής τρωτότητας: (1) χρησιμοποιώντας το στοιχείο κινδύνου «κτίριο» και (2) εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία των ΣΔΚΠ. Τα απαιτούμενα δεδομένα συλλέχθηκαν και υπέστησαν επεξεργασία, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 8.1.9.

Υπολογισμός τρωτότητας με το στοιχείο κινδύνου «κτίριο»

Εφαρμόζονται τα πέντε βήματα της μεθοδολογίας που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 5.4.

- ▶ **Βήμα 1.** Καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων υπολογισμού της τρωτότητας και προετοιμασία των χαρτών δεδομένων υπολογισμού τρωτότητας. Περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 8.1.9.
- ▶ **Βήμα 2.** Προσδιορισμός των στατιστικά σημαντικών χαρακτηριστικών των κτιρίων. Πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος πολλαπλής παλινδρόμησης και διαπιστώθηκε ότι επτά από τα εννέα χαρακτηριστικά των κτιρίων, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 8.32 (βλ. επίσης Πίνακα 5.8) παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Αυτά είναι τα ακόλουθα: LW, UGR, PLT1, PLT2, BLO1, BLO2 και ADJ1.

Πίνακας 8.32

Χαρακτηριστικά των κτιρίων και αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισής τους				
Χαρακτηριστικά κτιρίου	Συνομογραφία	P-value	B	Exp (B)
Παράθυρο υπόγειου τύπου	LW	0.009	1.143	4.107
Ράμπα υπόγειου γκαράζ	UGR	0.000	1.124	3.079
Πυλωτή κάτω από το ύψος του εδάφους	PLT1	0.032	1.031	2.805
Πυλωτή στο ύψος του εδάφους	PLT2	0.003	0.900	2.460
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου κάτω από το ύψος του εδάφους	BLO1	0.000	1.231	3.425
Χαμηλότερο άνοιγμα κτιρίου στο ύψος του εδάφους	BLO2	0.000	1.155	3.175

Μια ανοικτή πλευρά	ADJ1	0.009	-0.838	0.433
Δυο ανοικτές πλευρές	ADJ2	0.142	0.387	1.473
Τρεις ανοικτές πλευρές	ADJ3	0.251	0.322	1.380

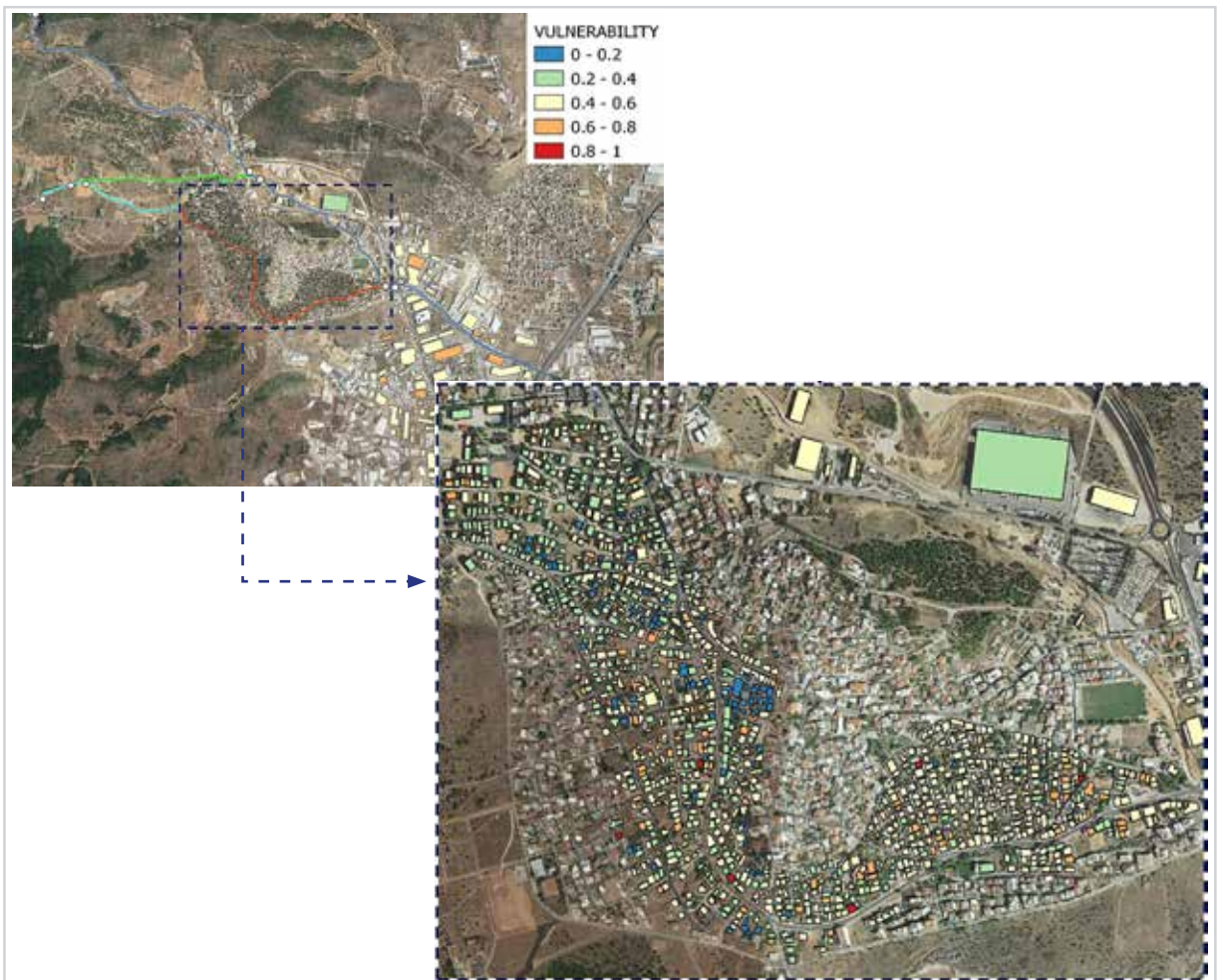
- ▶ **Βήμα 3.** Προσδιορισμός της εξίσωσης του εμπειρικού δείκτη τρωτότητας. Προσδιορίστηκε η εξίσωση (8.1).

$$Y = -1.372 + 1.143LW + 1.124UGR + 1.031PLT1 + 0.900PLT2 + 1.231BLO1 + 1.155BLO2 - 0.838ADJ1 \quad (8.1)$$

- ▶ **Βήμα 4.** Προσδιορισμός της πιθανότητας να πλημμυρίσει ένα κτίριο. Προσδιορίστηκε η εξίσωση (8.2).

$$p = \frac{e^{(-1.372 + 1.143LW + 1.124UGR + 1.031PLT1 + 0.900PLT2 + 1.231BLO1 + 1.155BLO2 - 0.838ADJ1)}}{e^{(-1.372 + 1.143LW + 1.124UGR + 1.031PLT1 + 0.900PLT2 + 1.231BLO1 + 1.155BLO2 - 0.838ADJ1)} + 1} \quad (8.2)$$

- ▶ **Βήμα 5.** Προσδιορισμός της κλάσης τρωτότητας κάθε κτιρίου και σύνταξη των χαρτών τρωτότητας της περιοχής ενδιαφέροντος. Με βάση τον Πίνακα 5.10 και με στοιχείο εισόδου τον δείκτη τρωτότητας προσδιορίστηκε η κλάση τρωτότητας για κάθε κτίριο και στη συνέχεια συντάχτηκε ο χάρτης τρωτότητας της περιοχής εφαρμογής που φαίνεται στην Εικόνα 8.61.



Εικόνα 8.61: Χάρτης με τις πέντε κλάσεις τρωτότητας κτιρίων

Υπολογισμός τρωτότητας σύμφωνα με τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας

Εφαρμόζεται η μεθοδολογία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 5.3 σε κάθε κελί των αρχείων δεδομένων, δηλ. των αρχείων raster που προσδιορίστηκαν στο υποκεφάλαιο 8.1.3.

- ▶ **Βήμα 1.** Για κάθε κατηγορία επιπτώσεων υπολογίστηκαν οι βαθμοί των δεικτών χρήσεων, οι οποίοι περιλαμβάνονται στα αρχεία raster, και προστέθηκαν με βάση τους Πίνακες 5.4 και 5.5.
- ▶ **Βήμα 2.** Για το σύνολο των κατηγοριών επιπτώσεων υπολογίστηκε ο ολικός βαθμός ως το άθροισμα των επιμέρους αθροισμάτων των τεσσάρων κατηγοριών επιπτώσεων, ο οποίος αποτελεί τη μέγιστη δυνατή επίπτωση.
- ▶ **Βήμα 3.** Με βάση την υπολογισθείσα μέγιστη δυνατή επίπτωση προσδιορίστηκε η κλίση τρωτότητας με βάση τον Πίνακα 5.6.

8.4.7 Υπολογισμοί του κινδύνου πλημμύρας

Στις Εικόνες 8.62 και 8.63 φαίνεται ο κίνδυνος πλημμύρας, ενδεικτικά, για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα), στην αστική και βιομηχανική περιοχή, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 8.63 παρουσιάζεται ο κίνδυνος πλημμύρας κατά μήκος της οδού Κοροπούλη για τα σενάρια S200-18 και W200-18, και στους Πίνακες 8.33 και 8.34 ο μέσος κίνδυνος πλημμύρας στην οδό Κοροπούλη και η μείωσή του (%) εξαιτίας των αντιπλημμυρικών έργων, αντίστοιχα.

Με βάση τους υπολογισμούς διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- ▶ Οι μέγιστες τιμές του κινδύνου πλημμύρας στην κατοικημένη περιοχή κυμαίνονται από 0.73 μέχρι 0.86 για τα σενάρια S20-06 μέχρι S200-18 (χωρίς τα έργα), αντίστοιχα, και από 0.46 μέχρι 0.59 για τα σενάρια W20-06 μέχρι W200-18 (με τα έργα), αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, ο κίνδυνος πλημμύρας αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και την αύξηση της διάρκειας της βροχής.
- ▶ Η επίδραση των αντιπλημμυρικών έργων στον μέσο κίνδυνο πλημμύρας κατά μήκος της οδού Κοροπούλη είναι σημαντική. Η μέση τιμή κινδύνου κυμαίνεται από 0.28 μέχρι 0.32 για τα σενάρια S20-06 μέχρι S200-18 και από 0.07 μέχρι 0.23 για τα σενάρια W20-06 μέχρι W200-18, δηλ. η

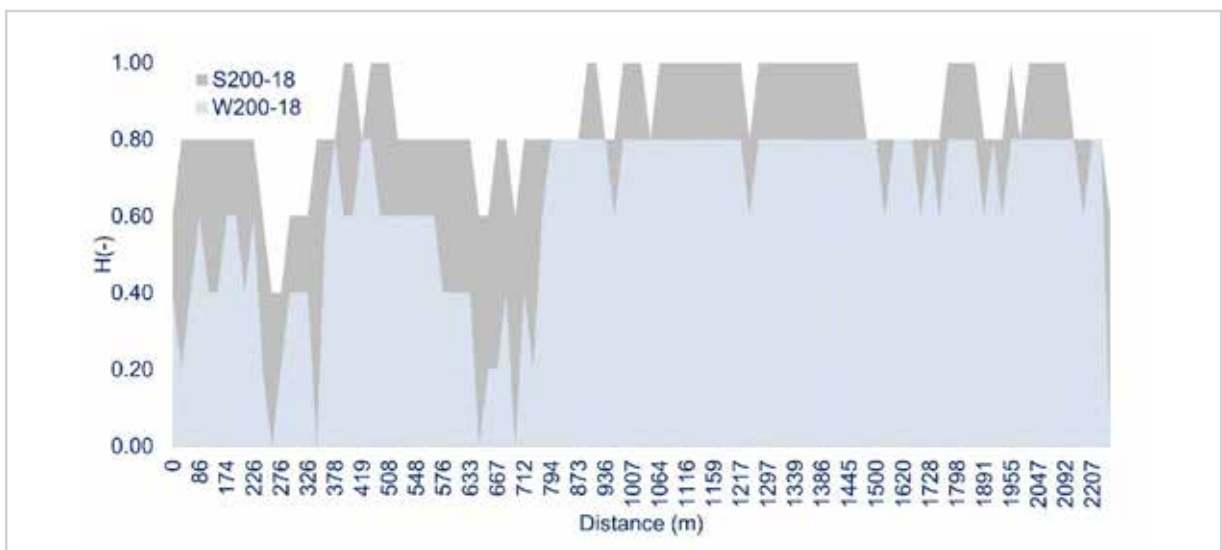


Εικόνα 8.62: Κίνδυνος πλημμύρας στην αστική περιοχή της Μάνδρας για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)

παρουσία των έργων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κίνδυνος πλημμύρας από 27 μέχρι 74%. Αυτή η μείωση μειώνεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς και τη μείωση της διάρκειας της βροχής. Επιπλέον, η εξάρτησή της από τη διάρκεια της βροχής γίνεται πολύ μικρή στις μεγάλες διάρκειες βροχής.



Εικόνα 8.63: Κίνδυνος πλημμύρας στη βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας για τα ακραία σενάρια S200-18 (αριστερά, χωρίς τα έργα) και W200-18 (δεξιά, με τα έργα)



Εικόνα 8.64: Κίνδυνος πλημμύρας κατά μήκος της οδού Κοροπούλη για τα σενάρια S200-18 και W200-18

Πίνακας 8.33

Μέσος κίνδυνος πλημμύρας στην οδό Κοροπούλη										
Έργα αντιπλημμυρικής προστασίας	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι
T(y)	20	20	50	50	100	100	150	150	200	200
t=6 h	0.28	0.07	0.28	0.12	0.29	0.16	0.30	0.19	0.31	0.21
t=12 h	0.28	0.10	0.29	0.13	0.30	0.19	0.31	0.22	0.31	0.23
t=18 h	0.28	0.10	0.29	0.13	0.30	0.19	0.31	0.22	0.32	0.23

Πίνακας 8.34

Μείωση του μέσου κινδύνου πλημμύρας (%) στην οδό Κοροπούλη εξαιτίας των αντιπλημμυρικών έργων					
T(y)	20	50	100	150	200
t=6 h	74	58	46	36	32
t=12 h	66	56	37	30	27
t=18 h	66	56	36	29	27

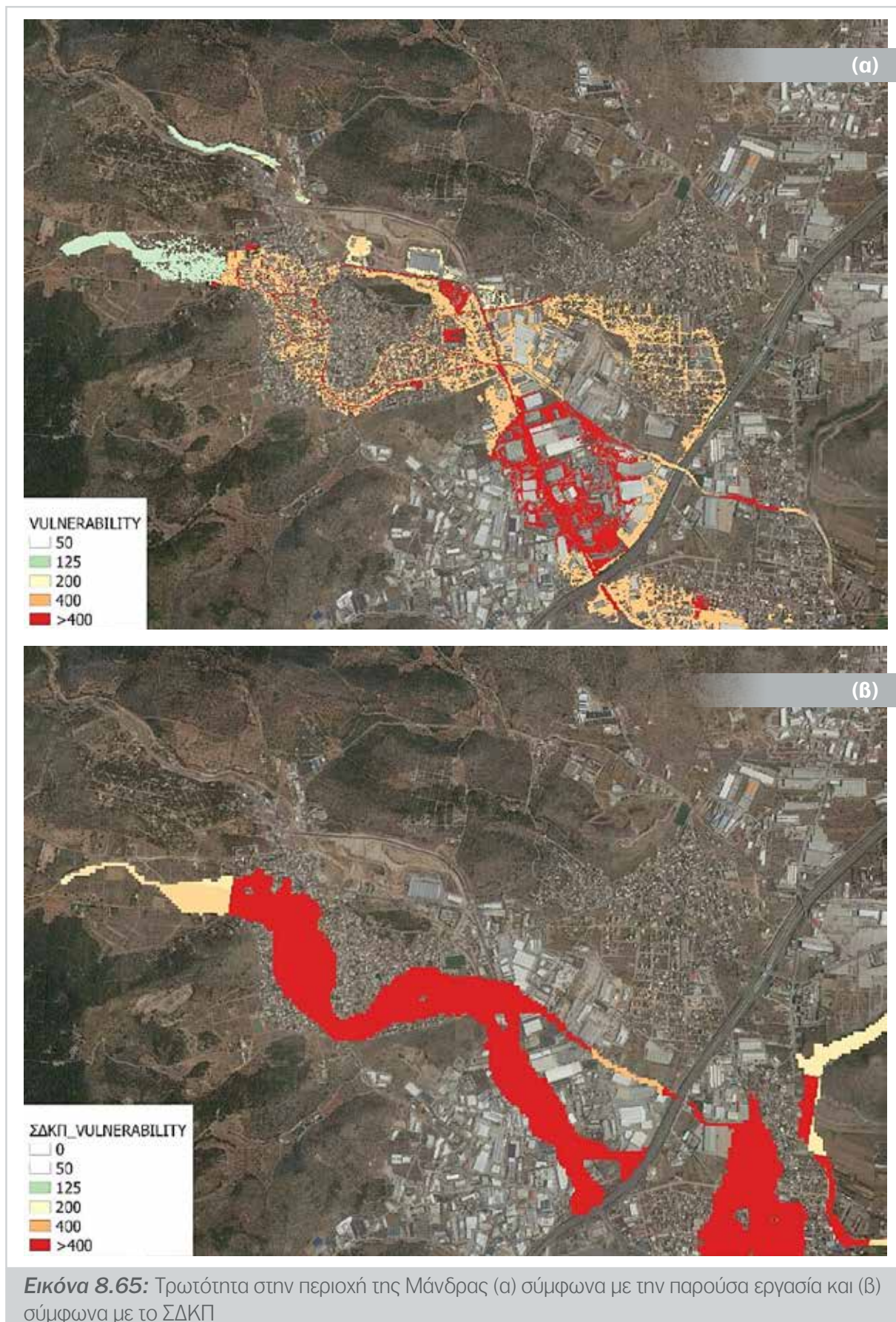
8.4.8 Υπολογισμοί κινδύνου πλημμύρας με τη μέθοδο των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας

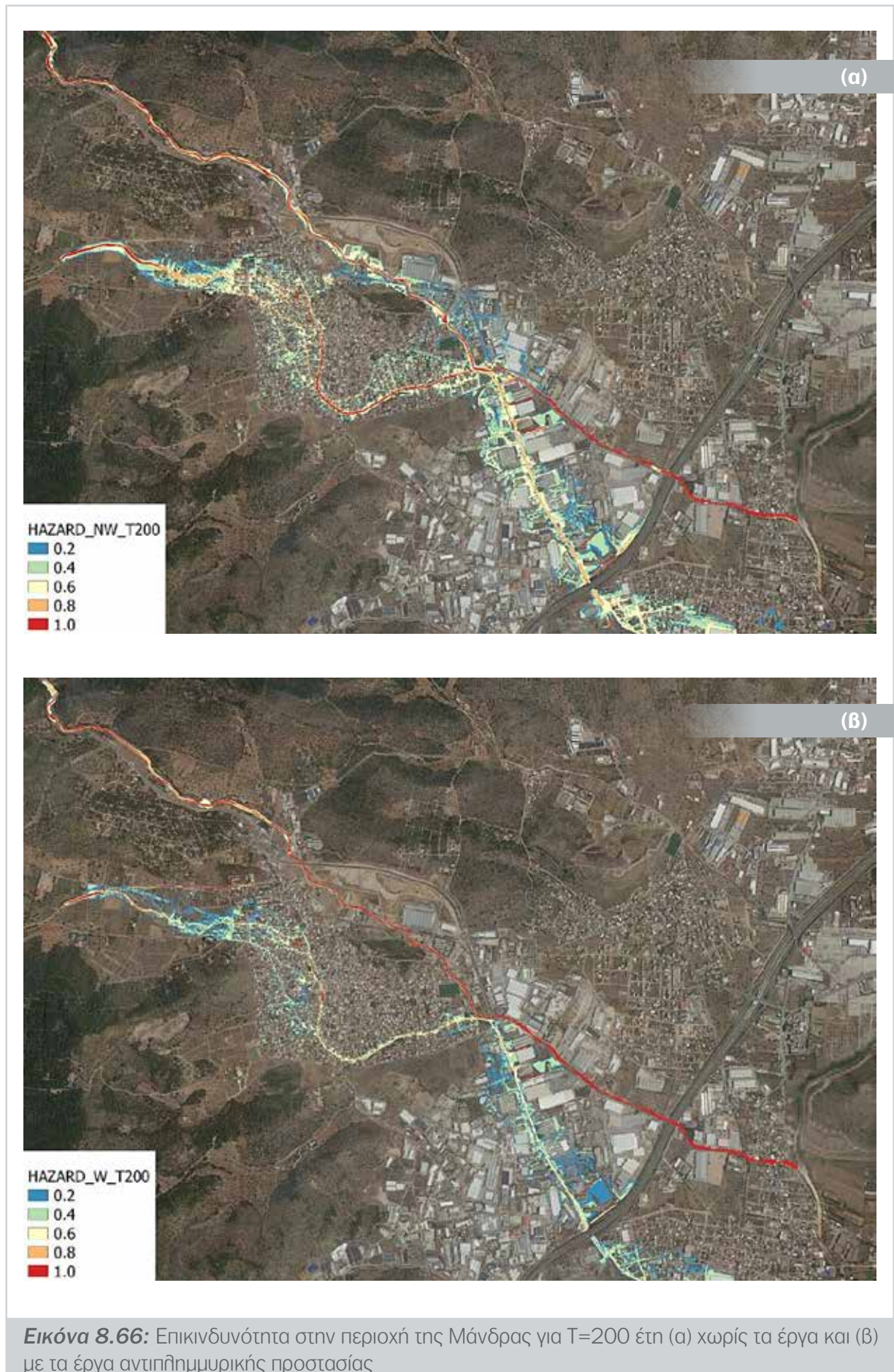
Στην Εικόνα 8.65 φαίνεται η τρωτότητα στην περιοχή της Μάνδρας (α) της παρούσας εργασίας και (β) του ΣΔΚΠ Αττικής. Στις Εικόνες 8.66 και 8.67 παρουσιάζεται η επικινδυνότητα και ο κίνδυνος πλημμύρας, αντίστοιχα, στην περιοχή της Μάνδρας για T=200 έτη (α) χωρίς τα έργα και (β) με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας. Στις Εικόνες 8.68 και 8.69 συγκρίνονται η επικινδυνότητα και ο κίνδυνος πλημμύρας, αντίστοιχα, χωρίς τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας (α) για T=200 έτη της παρούσας εργασίας και (β) για T=1000 έτη του ΣΔΚΠ. Στις Εικόνες 8.70 και 8.71 συγκρίνονται η επικινδυνότητα και ο κίνδυνος πλημμύρας, αντίστοιχα, στην περιοχή της Μάνδρας για την πλημμύρα του 2017 (α) χωρίς τα έργα και (β) με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας.

Από τις Εικόνες 8.65 μέχρι 8.71 και τους υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

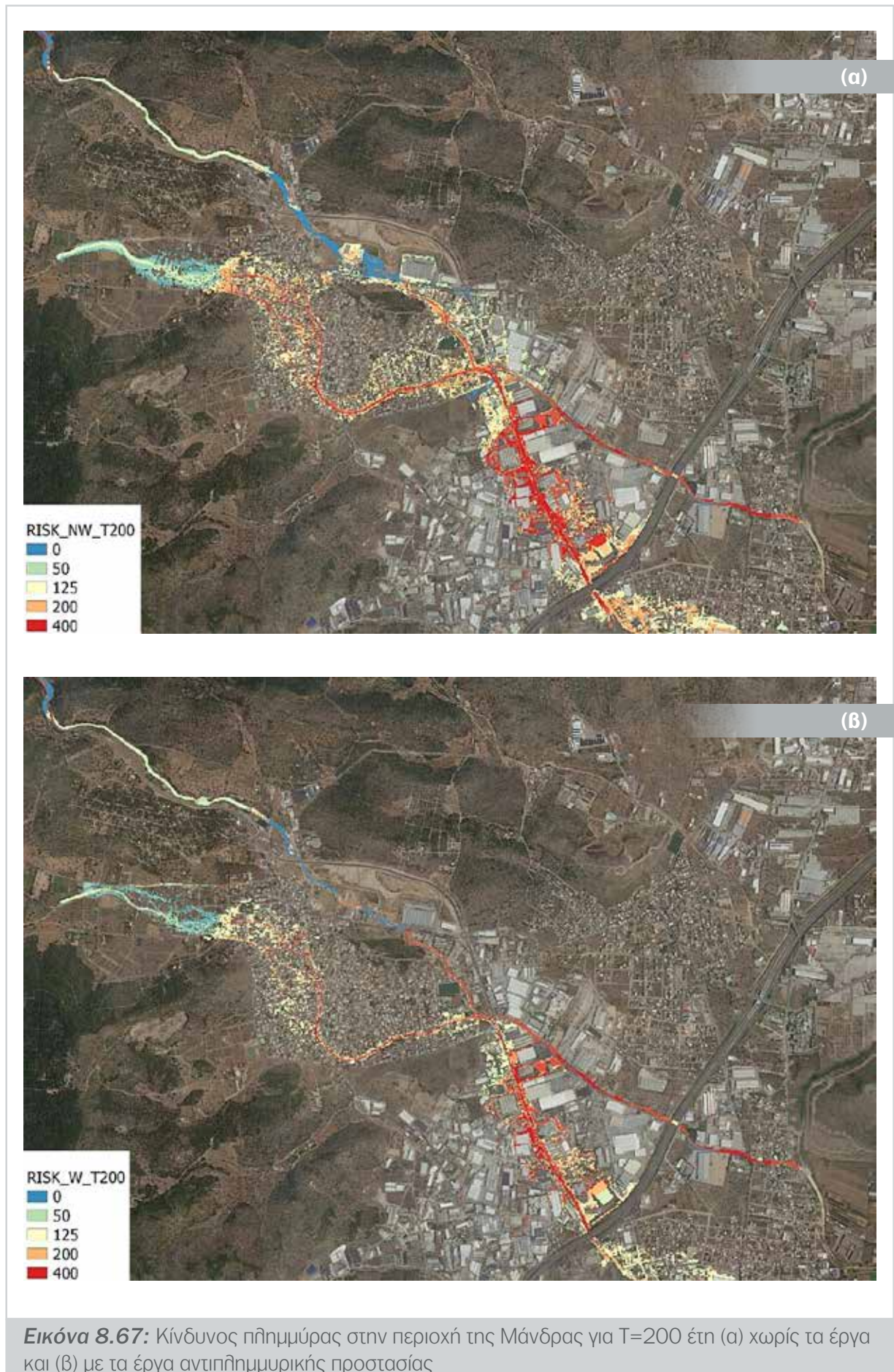
- ▶ Οι κύριες διαφορές που παρατηρούνται στην τρωτότητα σε σχέση με τα αποτελέσματα των ΣΔΚΠ οφείλονται (1) στη λεπτομερέστερη χωρική ανάλυση της παρούσας εργασίας και (2) στο ότι σύμφωνα με το ΣΔΚΠ δεν πλημμυρίζει η ΒΑ περιοχή στην οποία βρίσκεται το ρ. Σούρες, κάτι που δεν παρατηρήθηκε κατά την πλημμύρα του 2017. Η λεπτομερέστερη χωρική ανάλυση της παρούσας εργασίας επηρεάζει και τις κατανομές της επικινδυνότητας και του κινδύνου πλημμύρας.
- ▶ Η παρουσία των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας μειώνει σημαντικά την επικινδυνότητα και κατά συνέπεια τον κίνδυνο πλημμύρας. Η μείωση του κινδύνου πλημμύρας δεν φαίνεται ότι είναι τόσο μεγάλη όσο αυτή της επικινδυνότητας, εξαιτίας του πολλαπλασιασμού των μικρών τιμών της επικινδυνότητας με τις πολύ μεγάλες τιμές της τρωτότητας.

- ▶ Η παραπάνω επίδραση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας είναι μικρότερη στην πλημμύρα του 2017.

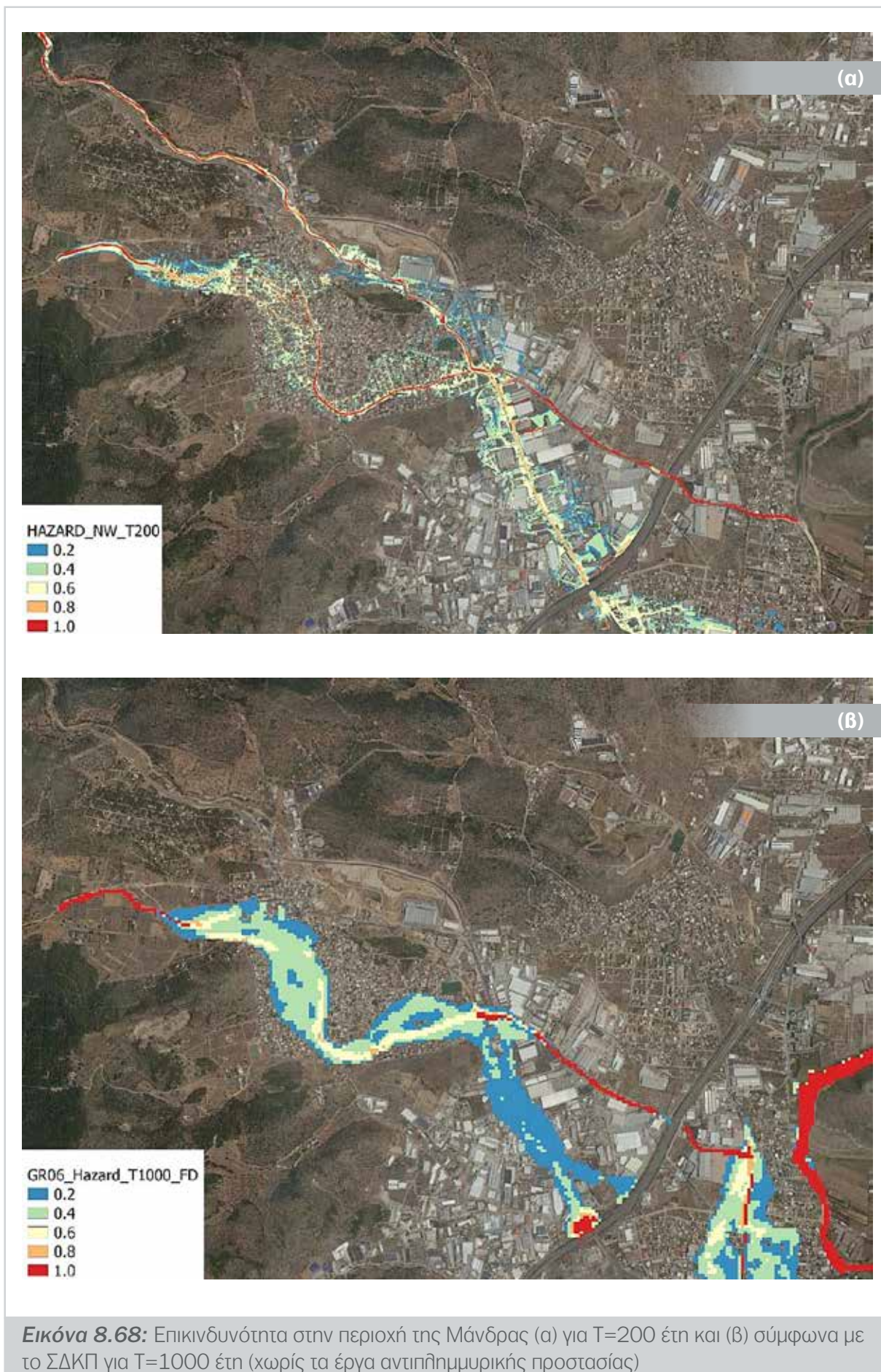


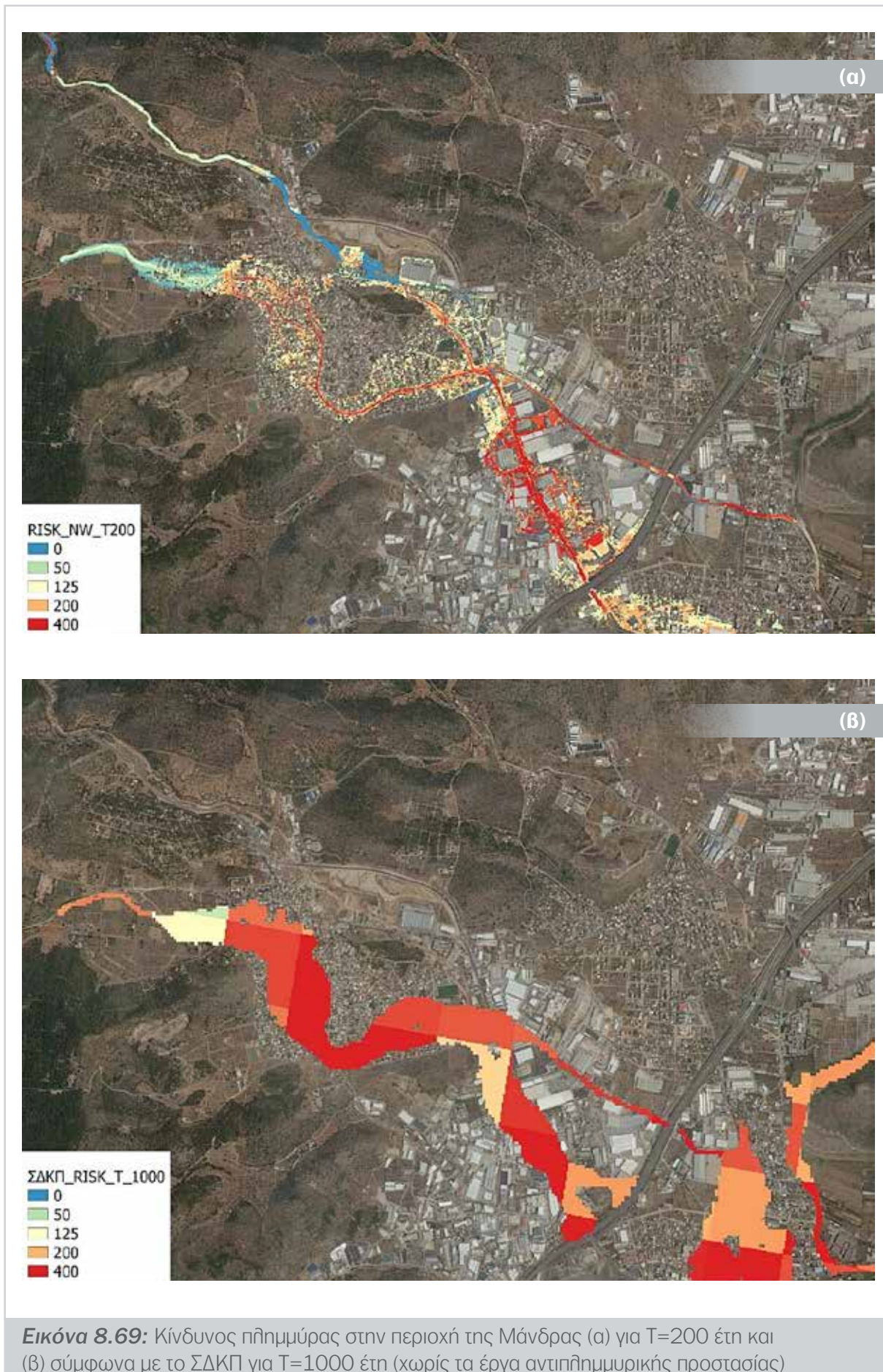


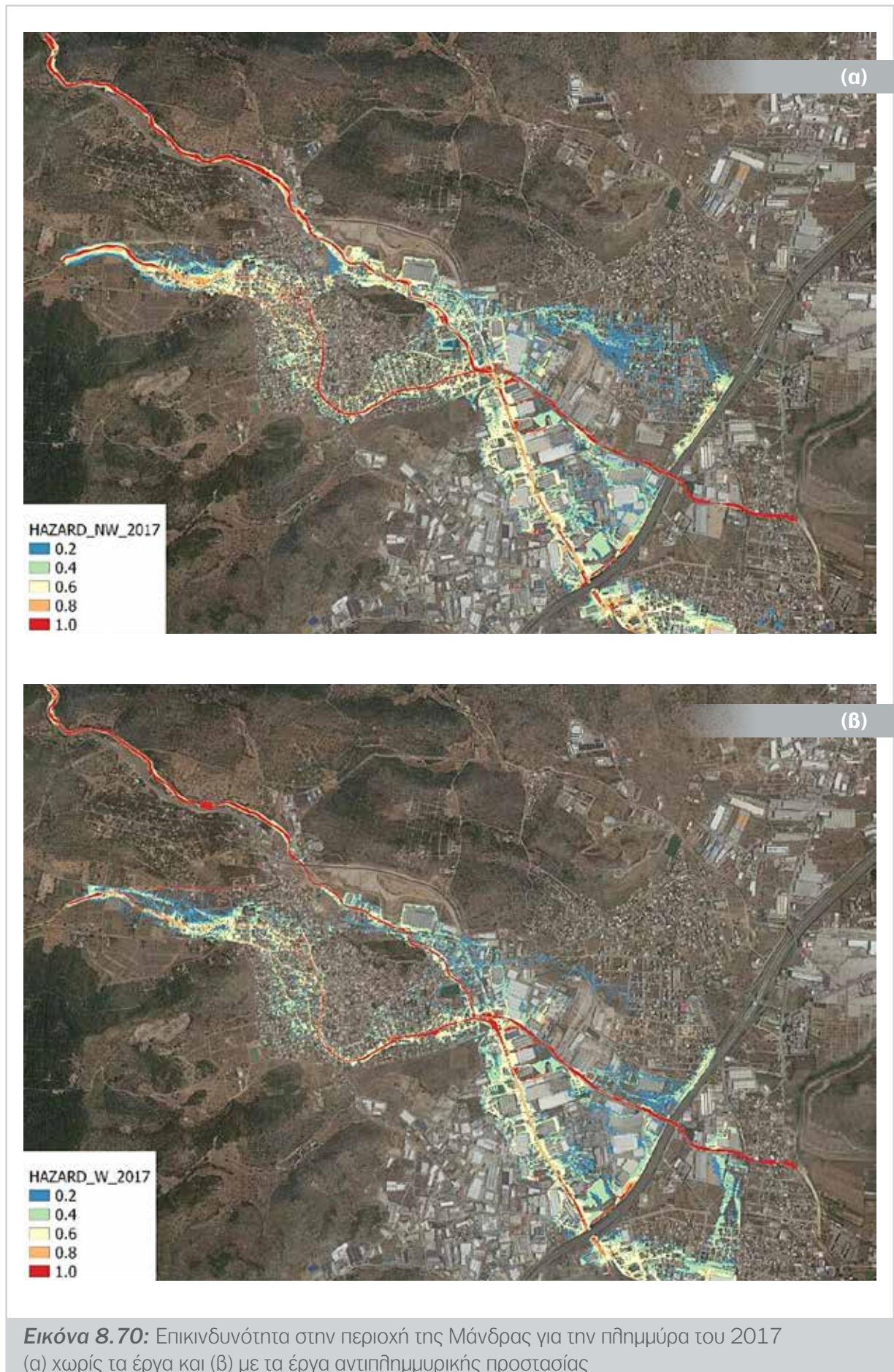
Εικόνα 8.66: Επικινδυνότητα στην περιοχή της Μάνδρας για T=200 έτη (α) χωρίς τα έργα και (β) με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας

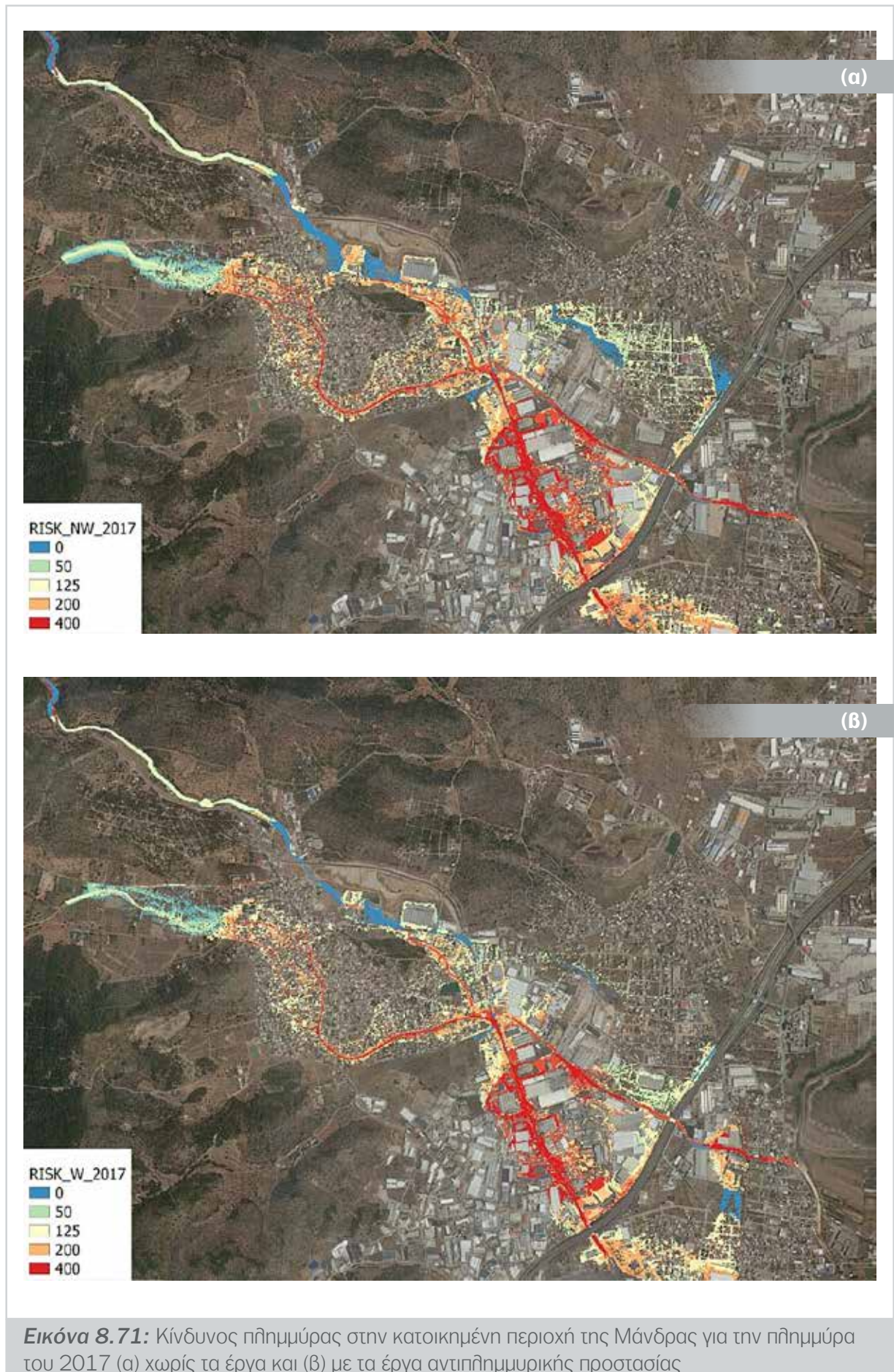


Εικόνα 8.67: Κίνδυνος πλημμύρας στην περιοχή της Μάνδρας για T=200 έτη (α) χωρίς τα έργα και (β) με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας





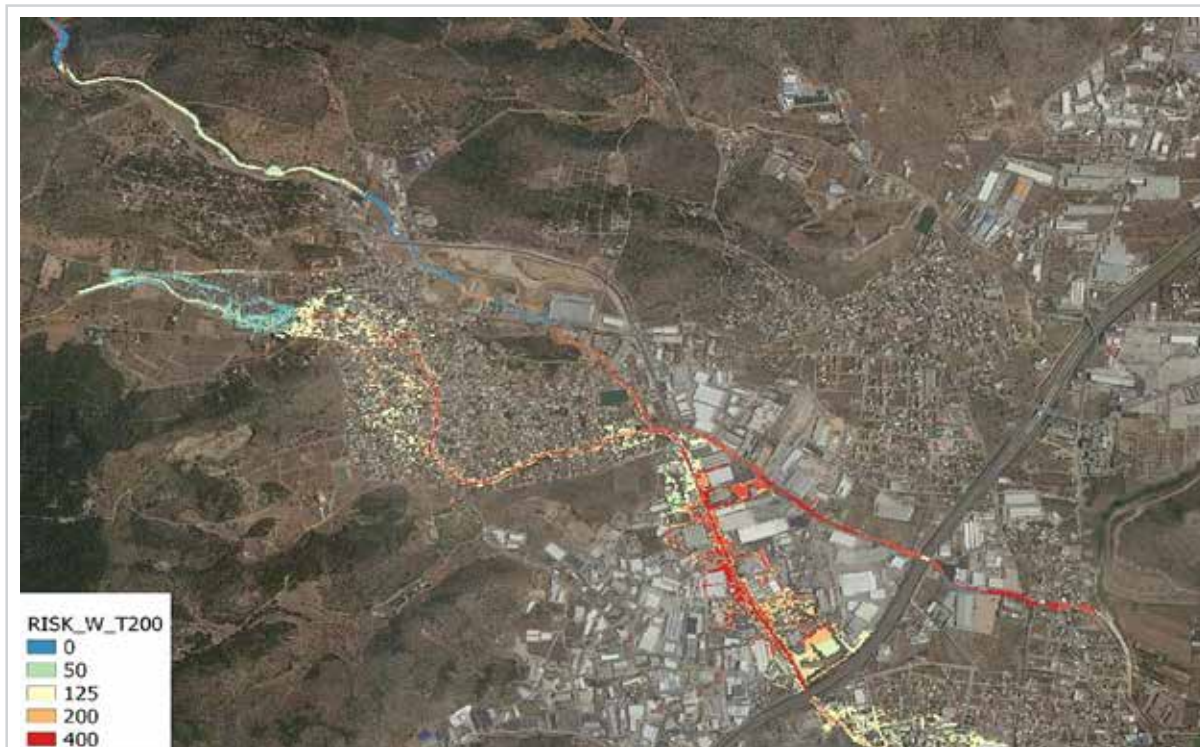




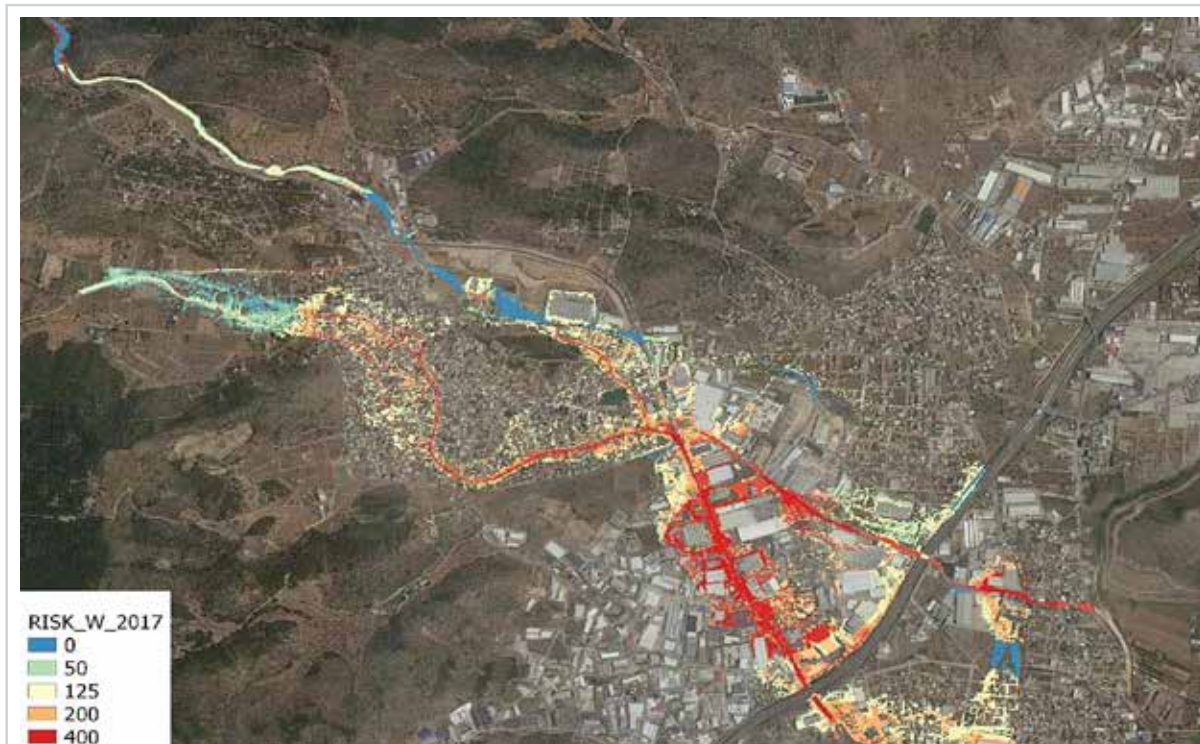
Εικόνα 8.71: Κίνδυνος πλημμύρας στην κατοικημένη περιοχή της Μάνδρας για την πλημμύρα του 2017 (α) χωρίς τα έργα και (β) με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας

8.4.9 Προσδιορισμός των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμύρας

Στην Εικόνα 8.72 παρουσιάζεται ο σημερινός κίνδυνος πλημμύρας με τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας στην περιοχή της Μάνδρας. Στο ΣΕΠΠ που σχεδιάζεται στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση της Εικόνας 8.72 που αφορά περίοδο επαναφοράς ίση με $T=200$ έτη. Εναλλακτικά, για λόγους ασφάλειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Εικόνα 8.73 που αφορά την πλημμύρα του 2017.



Εικόνα 8.72: Κίνδυνος πλημμύρας στην περιοχή της Μάνδρας για $T=200$ έτη



Εικόνα 8.73: Κίνδυνος πλημμύρας στην περιοχή της Μάνδρας για την πλημμύρα του 2017

8.5 Βήμα 5: Εκτίμηση των χαρακτηριστικών προειδοποίησης

8.5.1 Εισαγωγή

Στην εξεταζόμενη περίπτωση προσδιορίστηκαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά προειδοποίησης:

- ▶ Τιμές Flash Flood Guidance.
- ▶ Καμπύλες στάθμης - παροχής στις θέσεις του προτεινόμενου ΔΠ και στις κρίσιμες διατομές των υδατορεμάτων.

Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των παραπάνω χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε με μαθηματικά μοντέλα που βαθμονομήθηκαν με μετρήσεις πεδίου. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται στο παρόν χάριν πληρότητας της μεθοδολογίας σχεδιασμού του ΣΕΠΠ. Η εφαρμογή τους συνιστάται μετά την επιβεβαίωση και ενδεχόμενη τροποποίησή τους (εφόσον απαιτηθεί) με μετρήσεις πεδίου.

8.5.2 Εκτίμηση των τιμών Flash Flood Guidance

Εφαρμόζεται η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 2.5.4 για τρία σενάρια υδρολογικών συνθηκών: (I) ξηρές, (II) μέσες, και (III) κορεσμένες, που αντιστοιχούν σε συνθήκες εδαφικής υγρασίας (και αριθμών καμπύλης CN): ξηρές (CNI), μέσες (CNII) και υγρές συνθήκες (CNIII).

- ▶ **Βήμα 1. Διακριτοποίηση της περιοχής εφαρμογής.** Επιλέγεται μοντέλο κατανεμημένης μορφής με διαστάσεις κελιών 500 m x 500 m με βάση το μέγεθος των λεκανών απορροής. Σε περίπτωση ενός αδρότερου μοντέλου πρόγνωσης βροχόπτωσης, μπορεί να εφαρμοστεί μια μέθοδος μείωσης κλίμακας ή η ίδια τιμή βροχόπτωσης σε όλα τα κελιά που βρίσκονται εντός του αδρότερου κελιού του μοντέλου βροχόπτωσης.
- ▶ **Βήμα 2. Υπολογισμός του κατωφλίου απορροής.** Εφαρμόζεται η τρίτη μέθοδος, δηλ. με τη χρήση υδρολογικού μοντέλου βροχής-απορροής για βροχόπτωσης περιόδου επαναφοράς ήση με T=5 έτη. Εφαρμόζεται το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά τη Soil Conservation Service (SCS, 1972) και υπολογίζεται το ύψος της αθροιστικής βροχής με την εφαρμογή των εξισώσεων όμβριων καμπυλών του ΣΔΚΠ Αττικής στο μετεωρολογικό σταθμό της Μάνδρας (βλ. υποκεφάλαιο 8.1.3) για διάρκεια βροχής 3 ωρών.

Για κάθε υδρολογική μονάδα πραγματοποιούνται υπολογισμοί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (II) των ακόλουθων παραμέτρων με τις αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού:

Αριθμός καμπύλης CN σύμφωνα με τη μέθοδο του ΥΠΕΝ (2022B).

Αρχικές απώλειες	$S = \frac{1000}{CN} - 10$	(8.3)
------------------	----------------------------	-------

Χρόνος υστέρησης	$t_p = (I^{0.8} (S+1)^{0.7}) / 1900y^{0.5}$	(8.4)
------------------	---	-------

Χρόνος ανόδου	$T_R = \frac{D}{2} + t_p$	(8.5)
---------------	---------------------------	-------

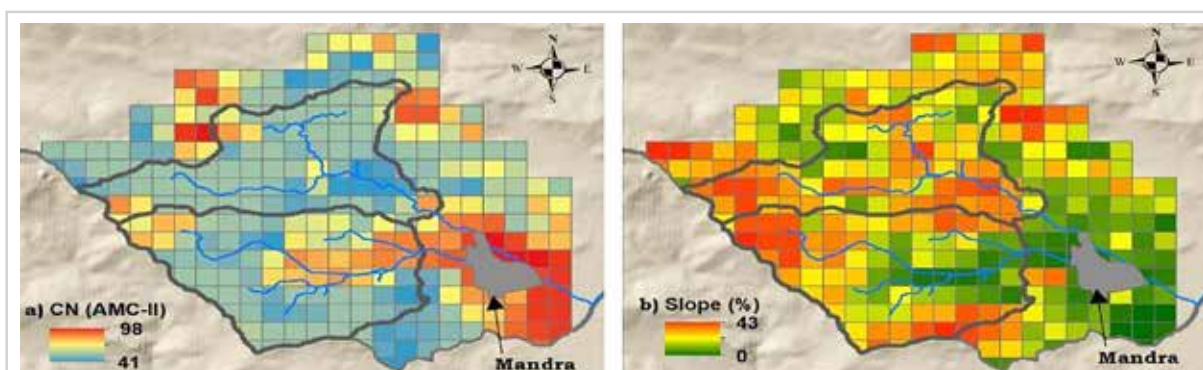
Παροχή αιχμής

$$Q=2.08 A h/T_R$$

(8.6)

όπου S είναι οι αρχικές απώλειες [mm], t_p είναι ο χρόνος υστέρησης [h], l είναι το μέγιστο μήκος του υδατορέματος [ft], γ είναι η μέση κλίση της λεκάνης [%], D είναι η διάρκεια βροχής [h], Q είναι η παροχή [m^3/s], A είναι η έκταση της υδρολογικής μονάδας (km^2), h είναι το ύψος βροχόπτωσης [h] και T_R είναι ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος [h].

Στην Εικόνα 8.74 φαίνεται η διακριτοποίηση της περιοχής εφαρμογής με τις υπολογιζόμενες τιμές των CN και των κλίσεων.



Εικόνα 8.74: Διακριτοποίηση περιοχής εφαρμογής σε κελιά και υπολογιζόμενες παράμετροι CN και κλίσεις

- ▶ **Βήμα 3. Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας.** Στην εξεταζόμενη περίπτωση, θεωρείται ότι πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με υδρολογικό μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης και υπολογίστηκαν τρεις τιμές ποσοστού εδαφικής υγρασίας ίσες με 0%, 50 % και 100 %, οι οποίες αντιστοιχούν σε ξηρές, μέσες και υγρές συνθήκες.
- ▶ **Βήμα 4. Προσδιορισμός καμπυλών αθροιστικής βροχόπτωσης – παροχής αιχμής.** Προσδιορίζονται για κάθε υδρολογική μονάδα και δεδομένη διάρκεια βροχόπτωσης οι καμπύλες αθροιστικής βροχόπτωσης – παροχής αιχμής για τις τιμές εδαφικής υγρασίας του βήματος 3. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με το μοντέλο βροχής - απορροής της Soil Conservation Service (SCS, 1972), βλ. εξίσωση (8.7).

$$Q_x = \frac{(P_x - 0.2S)^2}{P_x + 0.8S}$$

(8.7)

όπου x είναι η διάρκεια βροχής [h], Q_x είναι η αθροιστική απορροή που παράγεται στο χρονικό διάστημα x [mm], P_x είναι το αθροιστικό ύψος βροχής [mm], και S είναι η μέγιστη δυνητική κατακράτηση του εδάφους [mm] που υπολογίζεται από την εξίσωση (8.3).

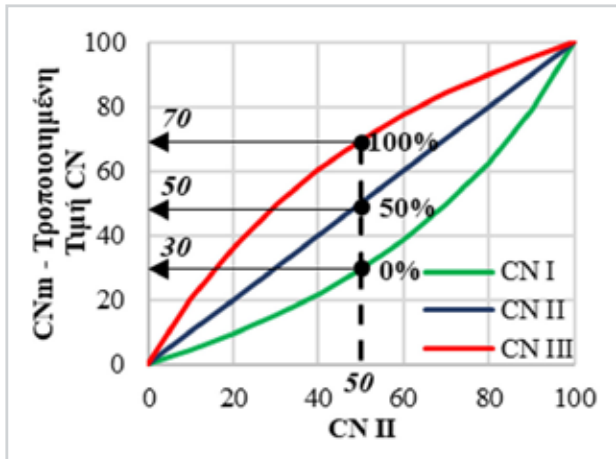
Για να ληφθεί υπόψη το ποσοστό υγρασίας, η τιμή του S προσαρμόζεται μέσω του CN με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών CN_{II} και των CN_I και CN_{III} εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (4.13) και (4.14).

$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}}$$

(4.13)

$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}}$$

(4.14)



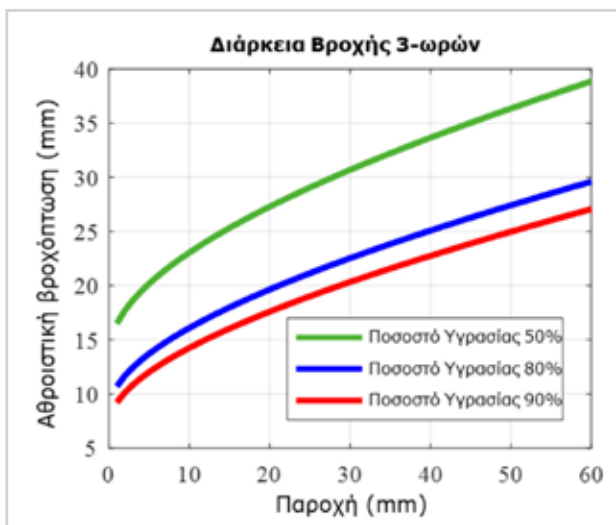
Εικόνα 8.75: Παράδειγμα προσαρμογής του CN ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας

Στην Εικόνα 8.75 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της προσαρμογής αυτής για μια ενδεικτική τιμή του CN_{II} ίση με 50. Η τροποποιημένη (προσαρμοσμένη) τιμή για συνθήκες ξηρές (CN_I), μέσες (CN_{II}) και υγρές συνθήκες (CN_{III}) προκύπτει ίση με 30 %, 50 % και 70 %, αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, η τιμή του CN για μέσες συνθήκες παραμένει αμετάβλητη (CN_m = 50).

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την εφαρμογή οποιοδήποτε ποσοστού υγρασίας. Έτσι, οι εξισώσεις (8.3) και (8.7) μετατρέπονται σε:

$$S_m = \frac{1000}{CN_m} - 10 \quad (8.8)$$

$$Q_x = \frac{(P_x - 0.2S_m)^2}{P_x + 0.8S_m} \quad (8.9)$$



Με εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων προσδιορίζονται οι καμπύλες αθροιστικής βροχόπτωσης - παροχής για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, εφαρμόζοντας αυξανόμενες τιμές βροχόπτωσης P_x και υπολογίζοντας την παροχή αιχμής Q_x . Στην Εικόνα 8.76 παρουσιάζονται τρεις ενδεικτικές καμπύλες που αντιστοιχούν σε ποσοστά υγρασίας 50%, 80% και 90%, για διάρκεια βροχής τριών ωρών.

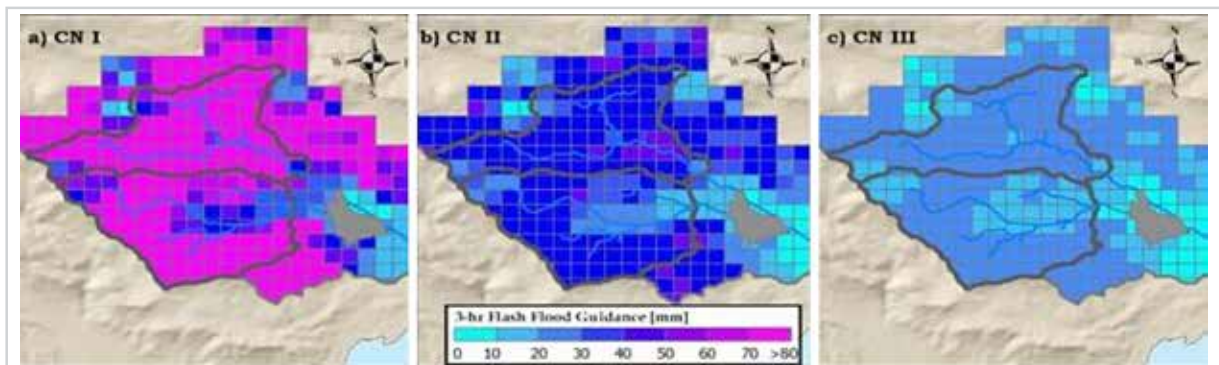
Εικόνα 8.76: Καμπύλες αθροιστικής βροχόπτωσης - απορροής για ποσοστά εδαφικής υγρασίας 50%, 80%, και 90%

- **Βήμα 5. Υπολογισμός της FFG.** Όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.5.4, υπολογίζεται η τιμή της FFG σε πραγματικό χρόνο κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε κελί με δεδομένα (α) το κατώφλιο παροχής (βλ. βήμα 2), (β) την εδαφική υγρασία (βλ. βήμα 3), και (γ) τις καμπύλες αθροιστικής βροχόπτωσης - απορροής (βλ. βήμα 4). Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται και για τις τρεις υδρολογικές συνθήκες του βήματος 3.

Εναλλακτικά, αν δεν πραγματοποιηθεί το βήμα 4, εφαρμόζεται απευθείας το μοντέλο βροχής-απορροής σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα τα παραπάνω (α) και (β) και πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί με βάση την εξίσωση (8.10).

$$FFG_x = P_x = \frac{0.2S_m + Q_x + \sqrt{2Q_x S_m + Q_x^2}}{2} \quad (8.10)$$

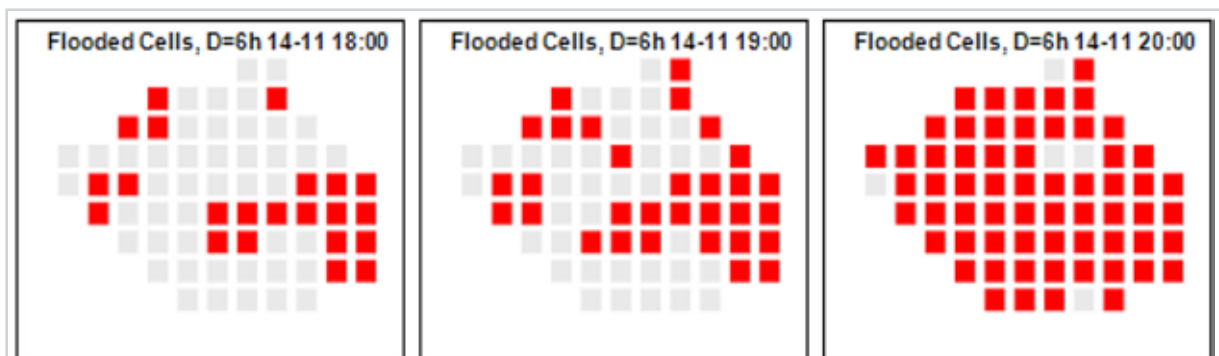
Οι υπολογιζόμενες τιμές FFG διάρκειας 3 ωρών στην περιοχή εφαρμογής για τις τρεις υδρολογικές συνθήκες φαίνονται στην Εικόνα 8.77.



Εικόνα 8.77: Τιμές FFG διάρκειας 3 ωρών για τρεις διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες

Από την Εικόνα 8.77 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Σε ξηρές συνθήκες η τιμή της FFG είναι μεγάλη, οπότε η πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας είναι μικρή. Σε υγρές συνθήκες η τιμή της FFG είναι μικρή και η πιθανότητα πλημμύρας είναι σημαντική, ακόμα και για μικρές βροχοπτώσεις.
 - Στις αστικές περιοχές, π.χ. κοντά στον οικισμό της Μάνδρας, οι τιμές του CN είναι μεγάλες και της FFG είναι μικρές, όπως αναμενόταν, εξαιτίας των αδιαπέρατων επιφανειών. Σημειώνεται, πάντως, ότι στους υπολογισμούς δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα έργα αποχέτευσης όμβριων υδάτων.
- **Βήματα 6 και 7. Σύγκριση της τιμής FFG με την προγνωσθείσα βροχόπτωση – Έκδοση μηνύματος προειδοποίησης.** Η εφαρμογή της μεθοδολογίας απαιτεί δεδομένα πρόγνωσης της βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο. Στην εξεταζόμενη περίπτωση της Μάνδρας αξιοποιούνται τα δεδομένα του επεισοδίου βροχόπτωσης στις 15 Σεπτεμβρίου 2017 θεωρώντας το παρατηρημένο βροχογράφημα ως βροχογράφημα πρόγνωσης και υπολογίζοντας τις αθροιστικές βροχοπτώσεις διάρκειας 1, 3 και 6 ωρών (Bournas & Baltas, 2022a, b). Με βάση τη θεώρηση αυτή, τη στιγμή της πρόγνωσης t_i θα είναι γνωστές οι τιμές της αθροιστικής βροχόπτωσης P_{1h} , P_{3h} και P_{6h} στις χρονικές στιγμές t_{i+1h} , t_{i+3h} και t_{i+6h} , αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές της FFG_{x-h} που υπολογίζονται την χρονική στιγμή t_i και στην Εικόνα 8.78 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης για τρεις χρονικές στιγμές 18:00, 19:00 και 20:00, χρησιμοποιώντας εξάωρη πρόγνωση ($D=6h$).



Εικόνα 8.78: Αποτέλεσμα συστήματος FFG για τρεις χρονικές στιγμές πρόγνωσης 6 ωρών (με κόκκινο φαίνονται τα κελιά με κίνδυνο πλημμύρας)

Τη χρονική στιγμή 18:00 θα είναι η γνωστή η τιμή P_{6h} που αποτελεί την αθροιστική βροχόπτωση από τις 18:00 έως τις 18:00+6h. Στην Εικόνα 8.78 φαίνονται με κόκκινο χρώμα τα κελιά στα οποία η τιμή της αθροιστικής βροχόπτωσης P_{6h} της πρόγνωσης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της FFG_{6h} , οπότε στις περιοχές των κελιών αυτών υπάρχει κίνδυνος πλημμύρας.

Τις χρονικές στιγμές 18:00+6h και 19:00+6h ωρών οι περιοχές που εμφανίζουν κίνδυνο πλημμύρας είναι αυτές που αποτελούν τον οικισμό της Μάνδρας και τα περίχωρα της. Οι περιοχές αυτές αποτελούνται από σχετικά αδιαπέρατες επιφάνειες, όπου η απορροή σχηματίζεται άμεσα και οι τιμές FFG είναι μικρές.

Τη χρονική στιγμή 20:00+6h, ολόκληρη η περιοχή εμφανίζει κίνδυνο πλημμύρας και θα πρέπει να εκτιμηθεί αν θα εκδοθεί μήνυμα προειδοποίησης.

8.5.3 Εντοπισμός των κρίσιμων διατομών

Γενικά

Εντοπίστηκαν οι κρίσιμες διατομές σε κάθε τμήμα των δυο ρεμάτων, δηλ. οι διατομές που υπερχειλίζουν πρώτες και κατακλύζουν τις γειτονικές περιοχές με σημαντικές επιπτώσεις. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί μόνιμης 1D ροής για διάφορες τιμές παροχών, και προσδιορίστηκαν σε κάθε τμήμα των ρεμάτων (α) το ποσοστό πλήρωσης, (β) η διατομή που υπερχειλίζει (δηλ. όταν το ποσοστό πλήρωσης είναι μεγαλύτερο από 100%) και (γ) η οριακή παροχή υπερχειλίσις, δηλ. η παροχή του ρέματος για την οποία πραγματοποιείται υπερχείλιση του. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί μη-μόνιμης 1D



Εικόνα 8.79: Οι θέσεις των κρίσιμων διατομών στο ρ. Σούρες

ροής, οι οποίοι πρακτικά επιβεβαίωσαν τις θέσεις των (κρίσιμων) διατομών υπερχειλίσης και τις παροχές υπερχειλίσης.

Κρίσιμες διατομές

Οι κρίσιμες διατομές του ρ. Σούρες φαίνονται στην Εικόνα 8.79 και τα χαρακτηριστικά των υπολογισμών στους Πίνακες 8.35, 8.36 και 8.37. Σύμφωνα με τους Πίνακες 8.35, 8.36 και 8.37 και τους υπολογισμούς, ιδιαίτερη βαρύτητα στο ρ. Σούρες έχει το τμήμα VI. Το τμήμα αυτό ξεκινά κατάντη του ΤΕ2 στην οδό Λουκά και τελειώνει κατάντη του 1^{ου} δημοτικού κλειστού γυμναστηρίου. Το τμήμα αυτό βρίσκεται μέσα στον αστικό ιστό της Μάνδρας με κατοικίες δίπλα στο ρέμα, κυρίως στα δεξιά της ροής. Η κρίσιμη διατομή εντοπίστηκε στη θέση 2596 m και η διατομή αυτή υπερχειλίζει για παροχή ίση με 128 m³/s.

Στο ρ. Αγίας Αικατερίνης η κρίσιμη διατομή είναι η διατομή του υπερχειλιστή στη θέση 1533 m όπου, η παροχή υπερχειλίσης είναι ίση με 47 m³/s. Τα νερά που υπερχειλίζουν ακολουθούν την παλαιά κοίτη του ρ. Αγίας Αικατερίνης και καταλήγουν στο ΒΔ τμήμα της πόλης της Μάνδρας.

Πίνακας 8.35

Οι κρίσιμες διατομές στα οκτώ τμήματα του ρ. Σούρες			
ΤΜΗΜΑ	Θέση διατομής υπερχειλίσης	Παροχή υπερχειλίσης (m ³ /s)	Ώρα υπερχειλίσης για την πλημμύρα του 2017
I	3771	138	6:30
II	3521	137	6:38
III	3471	140	6:34
IV	3092	290	-
V	3050	200	7:17
VI	2596	128	6:28
VII	2487	280	7:15
VIII	2365	240	7:15

Πίνακας 8.36

Ποσοστό μέγιστης πλήρωσης για διάφορες παροχές Q (m ³ /s) στα οκτώ τμήματα του ρ. Σούρες									
ΤΜΗΜΑ	Παροχή (m ³ /s)								
	90	100	110	120	130	140	150	160	170
I	74	80	87	91	97	101	104	108	112
II	70	74	80	85	91	102	109	113	116
III	72	77	83	88	94	100	106	111	116

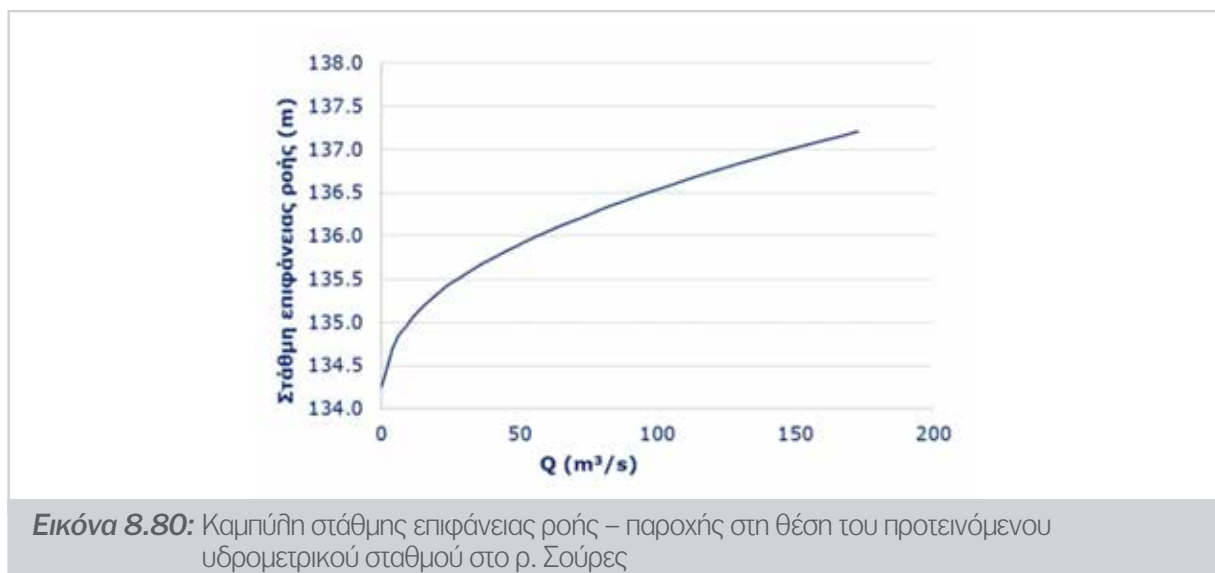
IV	46	49	52	54	56	59	61	63	65
V	70	74	77	80	83	85	88	90	93
VI	84	89	94	98	103	107	111	115	119
VII	49	53	55	58	61	63	66	68	70
VIII	48	53	57	60	64	67	71	74	78

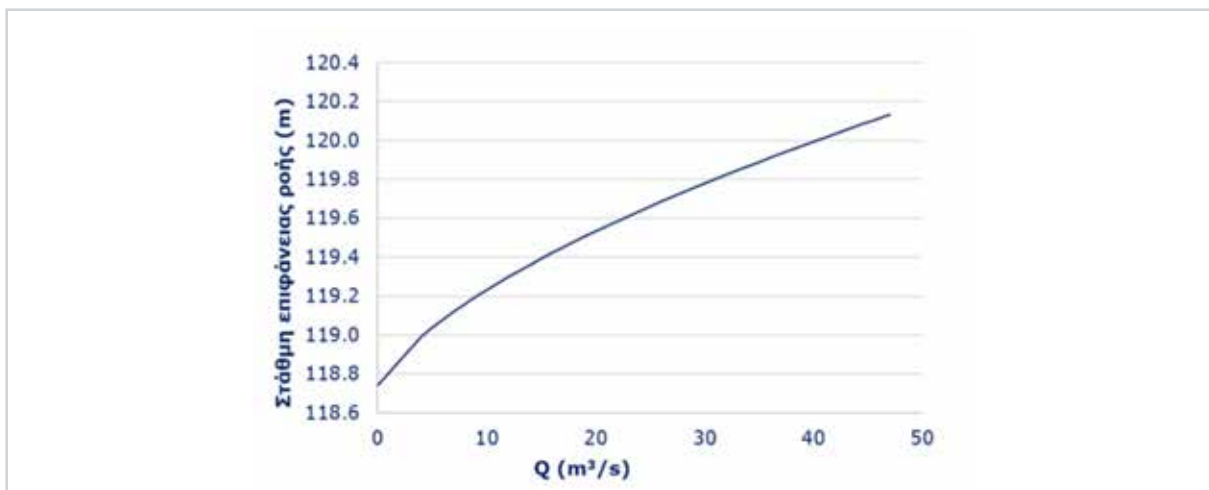
Πίνακας 8.37

Ποσοστό μέγιστης πλήρωσης για διάφορες παροχές Q (m ³ /s) στα πέντε τμήματα του ρ. Αγίας Αικατερίνης						
ΤΜΗΜΑ	Παροχή (m ³ /s)					
	20	30	40	50	60	70
IA	66	75	83	90	98	104
IIA	80	88	95	102	107	112
IIIA	18	26	34	42	50	64
IVA	27	36	44	51	59	74
VA	37	50	62	74	91	(υπό πίεση)

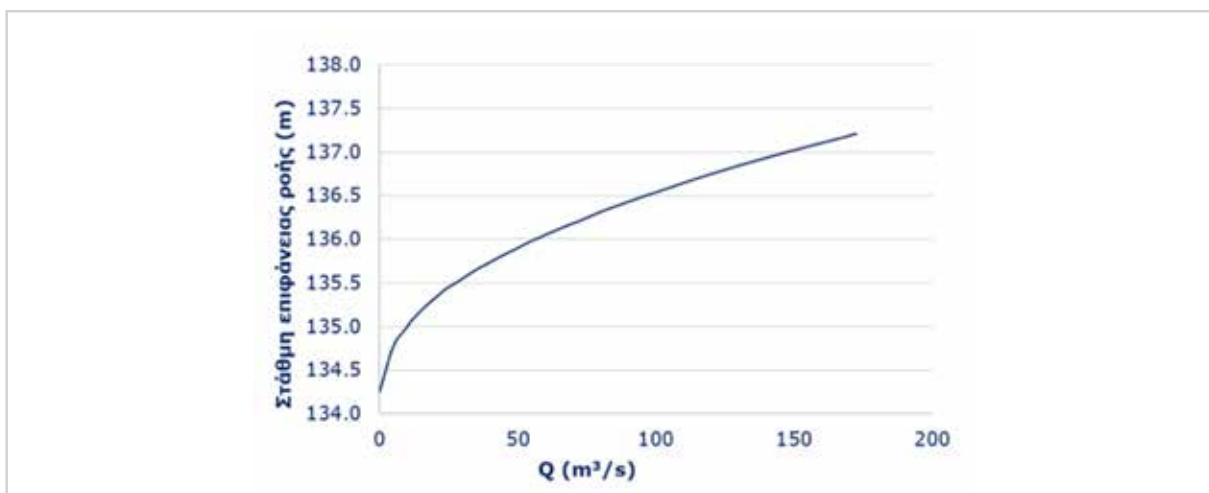
8.5.4 Καμπύλες στάθμης επιφάνειας ροής - παροχής

Στις Εικόνες 8.80 και 8.81 φαίνονται οι καμπύλες στάθμης επιφάνειας ροής – παροχής, που προσδιορίστηκαν με το υδροδυναμικό μοντέλο στον υδρομετρικό σταθμό του ρ. Σούρες και στον υδρομετρικό σταθμό του ρ. Αγίας Αικατερίνης (που βρίσκεται στην κρίσιμη διατομή του ρέματος. Στην Εικόνα 8.82 φαίνεται η καμπύλη στάθμης επιφάνειας ροής – παροχής στην κρίσιμη διατομή του ρ. Σούρες.





Εικόνα 8.81: Καμπύλη στάθμης επιφάνειας ροής – παροχής στη θέση του προτεινόμενου υδρομετρικού σταθμού στο ρ. Αγίας Αικατερίνης



Εικόνα 8.82: Καμπύλη στάθμης επιφάνειας ροής – παροχής στην κρίσιμη διατομή του ρ. Σούρες

8.6 Βήμα 6: Σχεδιασμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών

8.6.1 Εισαγωγή

Το Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών (ΚΠΠ) της Μάνδρας μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο του Δήμου. Όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 6.3.1, στον εξοπλισμό του ΚΠΠ περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- ▶ Μετρητικός εξοπλισμός του ΔΠ που αποτελείται από τους επτά σταθμούς που εγκαθίστανται στις θέσεις που φαίνονται στο χάρτη της Εικόνας 8.19 και στις Εικόνες 8.20 μέχρι 8.26. Όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 8.2.2, οι σταθμοί του ΔΠ του FLOODHUB μπορούν να θεωρηθούν προς το παρόν ως εφεδρικοί.
- ▶ Επικοινωνιακές υποδομές του ΔΠ μέσω των οποίων οι καταγραφές του μετρητικού εξοπλισμού των σταθμών μεταδίδονται στο ΚΠΠ.

- ▶ Υποδομές ενεργειακής τροφοδοσίας του ΔΠ.
- ▶ Διακομιστές και σταθμοί εργασίας, με το απαραίτητο υλισμικό.

Προτείνεται η λειτουργία του ΚΠΠ της Μάνδρας σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 6.5.2. Η περιγραφή των μεθόδων μετάδοσης των δεδομένων από τους μετρητές-αισθητήρες πραγματοποιείται στο υποκεφάλαιο 8.2.4.

8.6.2 Σχεδιασμός του Κέντρου Πρόγνωσης Πλημμυρών σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους

Υπολογιστικοί πόροι

Σε ένα ΚΠΠ που λειτουργεί σε υποδομές του υπολογιστικού νέφους, οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους δηλώνονται στον πάροχο υπηρεσιών του νέφους, ο οποίος τις κάνει διαθέσιμες στο ΚΠΠ. Ο πάροχος που επιλέγεται είναι το Amazon Web Services. Στο υπολογιστικό νέφος δημιουργούνται πέντε εικονικά μηχανήματα (Virtual Machines – VM), ως εξής:

- ▶ Ένα VM που χρησιμοποιείται για τις εργασίες κατανομής φορτίου (Load Balance).
- ▶ Δύο VM που χρησιμοποιούνται για τις εργασίες υπολογισμών με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 8vCPU, 32 GB RAM και 100 GB ROM.
- ▶ Δύο VM στα οποία εγκαθίστανται οι βάσεις δεδομένων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 4vCPU, 16GB RAM και 1 TB ROM.

Λογισμικό και βάσεις δεδομένων

Στο προτεινόμενο ΚΠΠ προβλέπεται η χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα (Open Source) Linux ως λειτουργικό σύστημα για τα παραπάνω VM και διανομή Ubuntu. Στα VM που εγκαθίστανται οι βάσεις δεδομένων επιλέγεται η έκδοση Ubuntu Server και σε αυτά που χρησιμοποιούνται για τις εργασίες υπολογισμών επιλέγεται η έκδοση Ubuntu Desktop.

Προτείνεται η χρησιμοποίηση της βάσης δεδομένων Timescale. Αυτή η βάση προτιμάται γιατί ειδικεύεται στη διαχείριση δεδομένων χρονοσειρών όπως των μετρήσεων του ΔΠ. Η προτεινόμενη βάση είναι γνωστής αξίας με λογισμικό ανοικτού κώδικα, οπότε δεν απαιτείται η αγορά άδειας χρήσης.

Το λογισμικό που αναπτύσσεται στο πλαίσιο του ΚΠΠ βασίζεται στην αρχιτεκτονική των μικροϋπηρεσιών και τα απομονωμένα περιβάλλοντα (Containers), με κύριο σκοπό την εφαρμογή τεχνικών που διασφαλίζουν την απροβλημάτιστη λειτουργία του (π.χ. Self-Healing Kubernetes). Το λογισμικό αυτό αφορά στην αυτοματοποίηση των παρακάτω:

- ▶ των υπολογισμών με το ΜΠΠ,
- ▶ της διάδοσης των προϊόντων του ΚΠΠ,
- ▶ της έκδοσης μηνύματος προειδοποίησης σε περίπτωση υπέρβασης προκαθορισμένων ορίων, και
- ▶ των διεργασιών εξαγωγής, μετασχηματισμού και φόρτωσης δεδομένων (ETL).

Μια τυπική διαδικασία ETL για την προετοιμασία του αρχείου εισόδου που απαιτεί ένα ΜΠΠ, περιλαμβάνει ενδεικτικά τα ακόλουθα:

- ▶ Το στάδιο εξαγωγής των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό, οι μετρήσεις που προέρχονται από το ΔΠ εξάγονται από τη βάση δεδομένων και φορτώνονται στη μνήμη RAM του υπολογιστή.

- ▶ Το στάδιο ελέγχου και μετασχηματισμού των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό, εντοπίζονται οι μη αποδεκτές μετρήσεις με την εφαρμογή της μεθοδολογίας Tukey, οι οποίες στη συνέχεια αντικαθίστανται.
- ▶ Το στάδιο φόρτωσης των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό, δημιουργείται ένα νέο αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται τα μετασχηματισμένα δεδομένα. Το αρχείο αυτό έχει την κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορεί να εισαχθεί ως αρχείο εισόδου στο ΜΠΠ.

Με την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας ETL, το αρχείο εισόδου του ΜΠΠ ανανεώνεται με τα πλέον πρόσφατα δεδομένα.

Εφεδρικές υποδομές και Σχέδιο Ανάκαμψης από Καταστροφή

Το ΚΠΠ δεν λειτουργεί σε ιδιόκτητες εγκαταστάσεις, αλλά σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους. Κατά συνέπεια, δεν απαιτείται η δημιουργία εφεδρικών υπολογιστικών υποδομών. Ωστόσο, απαιτείται η κατάρτιση ΣΑΚ, και για το σκοπό αυτό προτείνεται η εγκατάσταση του λογισμικού ανοικτού κώδικα DRLM.

Με το λογισμικό αυτό δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας του λογισμικού του ΚΠΠ κάθε ημέρα και η αποθήκευσή τους σε κάποιο διαφορετικό VM. Επιπλέον, με το λογισμικό DRLM δίνεται η δυνατότητα άμεσης επαναφοράς του λογισμικού του ΚΠΠ σε κάποιο αντίγραφο ασφαλείας.

8.7 Βήμα 7: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των μηνυμάτων προειδοποιήσεων και της ετοιμότητας του κοινού

8.7.1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα δεν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες σχετικά με τις αντιλήψεις του τοπικού πληθυσμού σε περίπτωση πλημμυρών. Τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2018 πραγματοποιήθηκε στη Μάνδρα η πρώτη σχετική έρευνα σε προκαταρκτικό επίπεδο. Η έρευνα περιλάμβανε τη χρήση ερωτηματολογίου που συμπληρωνόταν με συνέντευξη. Το ερωτηματολόγιο διαμορφώθηκε με βάση τη διεθνή εμπειρία, ώστε να είναι κατανοητό και ενδιαφέρον και να πείθει τους ερωτώμενους να το συμπληρώσουν.

Προτείνεται η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας με τη σχετική επιφύλαξη που επιβάλλει ο προκαταρκτικός χαρακτήρας της, και η επέκτασή της σε λεπτομερέστερο επίπεδο από τους αρμοδίους φορείς. Περισσότερα στοιχεία μπορεί να βρεθούν στις εργασίες των Καραμούστου (2018) και Καραμούστου και Στάμου (2019).

8.7.2 Μεθοδολογία

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με τα ακόλουθα τέσσερα βήματα:

- ▶ **Βήμα 1. Δοκιμαστική χρήση και οριστικοποίηση του ερωτηματολογίου.** Χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά το ερωτηματολόγιο σε 10 άτομα διαφορετικών ηλικιών για να εξεταστεί αν αυτό είναι κατάλληλο για τους ερευνητικούς σκοπούς, οι ερωτήσεις είναι κατανοητές και ο χρόνος συνέντευξης είναι αποδεκτός (Antronico et al., 2017). Με βάση τις παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στο ερωτηματολόγιο. Τελικά, αυτό διαμορφώθηκε με 29 ερωτήσεις, κυρίως κλειστού τύπου, πίνακα ή κλίμακας Likert του τύπου ναι/όχι/δεν γνωρίζω, κλίμακα πέντε επιλογών, πολλαπλών επιλογών, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σε έξι ενότητες.

- ▶ **Βήμα 2. Δειγματοληψία.** Εφαρμόστηκε η ευρέως χρησιμοποιούμενη και απλή μέθοδος της τυχαίας δειγματοληψίας για να επιλεγεί το δείγμα των ερωτώμενων. Τα ερωτηματολόγια διανεμήθηκαν στις περιοχές της πόλης που επηρεάστηκαν από τη ξαφνική πλημμύρα του 2017 και κινδυνεύουν να πλημμυρίσουν ξανά, αλλά και σε άτομα που δεν είχαν πληγεί άμεσα από την πλημμύρα.
- ▶ **Βήμα 3. Διανομή και συνεντεύξεις.** Πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις που διήρκεσαν είκοσι λεπτά κατά μέσο όρο η καθεμιά. Πριν τη συνέντευξη, κάθε συμμετέχων έλαβε ένα έντυπο που εξηγούσε τους επιστημονικούς σκοπούς του ερωτηματολογίου και διαβεβαίωνε ότι κανένας από τους ερωτηθέντες δεν θα μπορούσε να αναγνωριστεί με τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων. Οι περισσότεροι από τους ερωτηθέντες, αν και εκδήλωσαν κάποια δυσπιστία προς τον ερευνητή στην αρχή, ήταν πιο πρόθυμοι στη συνέχεια και συνεργάστηκαν στη συμπλήρωση του ερωτηματολογίου. Μερικοί ήταν πρόθυμοι από την αρχή.
- ▶ **Βήμα 4. Συλλογή και επεξεργασία ερωτηματολογίων.** Δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με τις ερωτήσεις και τις απαντήσεις. Τα δεδομένα υπέστησαν επεξεργασία στη πλατφόρμα SPSS για τη στατιστική τους ανάλυση.

Διανεμήθηκαν 200 ερωτηματολόγια, 82 από τα οποία (ποσοστό=41%) συμπληρώθηκαν. Οι αριθμοί αυτοί θεωρούνται ως ικανοποιητικοί για τους σκοπούς μιας προκαταρκτικής εργασίας.

8.7.3 Χαρακτηριστικά των ερωτώμενων

Από τον Πίνακα 8.38, που περιλαμβάνει την ηλικία και το μορφωτικό επίπεδο των ερωτώμενων, διαπιστώνεται ομοιομορφία στο φύλλο των ερωτώμενων (53% άντρες και 47% γυναίκες) και στη ηλικιακή διάρθρωσή τους, γεγονός που ενισχύει την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος. Γενικά, οι ερωτώμενοι είχαν σχετικά υψηλό μορφωτικό επίπεδο και μένουν (ή εργάζονται) στη Μάνδρα περίπου 30 έτη.

Πίνακας 8.38

Ηλικία και μορφωτικό επίπεδο ερωτώμενων			
Ηλικία (έτη)	Ποσοστό (%)	Μορφωτικό επίπεδο	Ποσοστό (%)
15 - 17	6.3	Κανένα	0.0
18 - 25	15.0	Δημοτικό	3.8
26 - 35	20.0	Γυμνάσιο	18.8
36 - 45	16.3	Λύκειο	33.8
46 - 55	17.5	ΙΕΚ	10.0
56 - 65	12.5	ΑΕΙ - ΤΕΙ	30.0
>65	12.5	Μεταπτυχιακό – Διδακτορικό δίπλωμα	3.8
Σύνολο	100.0	Σύνολο	100.0

8.7.4 Εμπειρία κατοίκων από πλημμύρες

Ποσοστό ίσο με 97.6% των ερωτώμενων έχει βιώσει πλημμύρα στη Μάνδρα. Από αυτούς, 56% δήλωσε ότι «τα νερά της πλημμύρας έφτασαν στο σπίτι (ή στο χώρο εργασίας μου) και προκάλεσαν ζημιές», 15% ότι «τα νερά της πλημμύρας έφτασαν στο σπίτι (ή στο χώρο εργασίας μου), αλλά δεν προκάλεσαν ζημιές» και σχεδόν 29% ότι «η πλημμύρα δεν επηρέασε το σπίτι (ή το χώρο εργασίας) μου». Τα ποσοστά αυτά είναι αντίστοιχα με αυτά της απάντησης στο ερώτημα «πιστεύετε ότι το σπίτι σας (ή ο χώρος εργασίας σας) κινδυνεύει από μια πλημμύρα;», καθόσον 61% απάντησε καταφατικά, 26% αρνητικά και 11% απάντησε «ίσως».

Στην ερώτηση «τι νομίζετε ότι προκαλεί την εκδήλωση μιας πλημμύρας;» 53% του συνόλου των ερωτώμενων απάντησε «η έλλειψη τεχνικών έργων αντιπλημμυρικής προστασίας», 33% «η έντονη βροχόπτωση» και το 11% απάντησε «άλλιος λόγος». Οι περισσότεροι από όσους απάντησαν «άλλιος λόγος» ανέφεραν την αυθαίρετη δόμηση και το συνδυασμό της έλλειψης τεχνικών έργων και της έντονης βροχόπτωσης.

Επιπλέον, οι ερωτώμενοι δήλωσαν ότι σε μια πλημμύρα ανησυχούν περισσότερο για τους ίδιους ή τα μέλη της οικογένειάς τους και το σπίτι τους.

8.7.5 Επίγνωση πλημμυρών

Είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι το σύνολο των ερωτώμενων χαρακτήρισαν τα αντιπλημμυρικά – τεχνικά έργα ως «πολύ σημαντικά» έως «σημαντικά» για την αντιμετώπιση μιας πλημμύρας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.39. Τα αντίστοιχα ποσοστά για την ύπαρξη ΣΕΠΠ και την ενημέρωση/εκπαίδευση των κατοίκων είναι επίσης πολύ υψηλά, 89.6% και 93.0%, αντίστοιχα. Το αντίστοιχο ποσοστό της σημαντικότητας των ατομικών τους ενεργειών για να αντιμετωπίσουν μια πλημμύρα είναι υψηλό (79.4%), αλλά μικρότερο των υπολοίπων τριών.

Πίνακας 8.39

Σημαντικότητα των διάφορων μέτρων αντιμετώπισης μιας πλημμύρας				
	Ατομικές ενέργειες	Ενημέρωση/εκπαίδευση	Αντιπλημμυρικά έργα	ΣΕΠΠ
Πολύ σημαντικό	43.8%	61.1%	97.5%	77.9%
Σημαντικό	35.6%	31.9%	2.5%	11.7%
Όχι και τόσο σημαντικό	13.7%	2.8%	0.0%	7.8%
Καθόλου σημαντικό	5.5%	4.2%	0.0%	0.0%
Δεν ξέρω	1.4%	0.0%	0.0%	2.6%
Σύνολο	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Οι απαντήσεις στο ερώτημα της σημαντικότητας των βασικών αιτιών της πλημμύρας του 2017 που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.40 βρίσκονται σε συμφωνία με τις απαντήσεις του προηγούμενου ερωτήματος (βλ. Πίνακα 8.39). Σχεδόν το σύνολο των ερωτώμενων (98.8%) χαρακτήρισε ως «πολύ σημαντικό» έως «σημαντικό» παράγοντα το ότι «τα αντιπλημμυρικά- τεχνικά έργα δεν ήταν επαρκή», ενώ

και το αντίστοιχο ποσοστό για το λόγο «οι κοίτες των ρεμάτων δεν ήταν αρκετά μεγάλες για να περάσει η πλημμύρα» ήταν πολύ υψηλό (93,4%). Μεγάλη είναι και τα αντίστοιχα ποσοστά που χαρακτηρίζουν την έλλειψη ενημέρωσης και προειδοποίησης (δηλ. του ΣΕΠΠ) των κατοίκων ως «πολύ σημαντικά» έως «σημαντικά» για την αντιμετώπιση μιας πλημμύρας που είναι ίσα με 80.8% και 89.5%, αντίστοιχα, και βρίσκονται σε αντιστοιχία με τα ποσοστά της ενημέρωσης (93.0%) και ΣΕΠΠ (89.6%) του Πίνακα 8.39.

Οι απαντήσεις δείχνουν ότι οι ερωτώμενοι αναγνωρίζουν τη σημαντικότητα των αντιπλημμυρικών έργων, της ενημέρωσης /εκπαίδευσής τους, και του ΣΕΠΠ, αλλά ενδεχομένως υποτιμούν τη σημαντικότητα των ατομικών τους ενεργειών. Τα παραπάνω δείχνουν την ανάγκη, επιθυμία και προθυμία συμμετοχής των κατοίκων της Μάνδρας στην ανάπτυξη ενός ΣΕΠΠ και σε σχετικά προγράμματα εκπαίδευσης που περιλαμβάνουν και τις βέλτιστες πρακτικές που θα πρέπει να εφαρμόσουν σε περίπτωση πλημμύρας.

Πίνακας 8.40

Αξιολόγηση σημαντικότητας των βασικών αιτιών της πλημμύρας του 2017				
Σημαντικότητα	Περιορισμένες Κοίτες ρεμάτων	Ανεπαρκή αντιπλημμυρικά έργα	Οι κάτοικοι δεν γνώριζαν τι να κάνουν	Οι κάτοικοι δεν είχαν προειδοποιηθεί
Πολύ σημαντικό	70.7%	88.8%	61.6%	72.4%
Σημαντικό	22.7%	10.0%	19.2%	17.1%
Όχι και τόσο σημαντικό	4.0%	0.0%	12.3%	3.9%
Καθόλου σημαντικό	0.0%	0.0%	4.1%	2.6%
Δεν ξέρω	2.7%	1.3%	2.7%	3.9%
Σύνολο	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

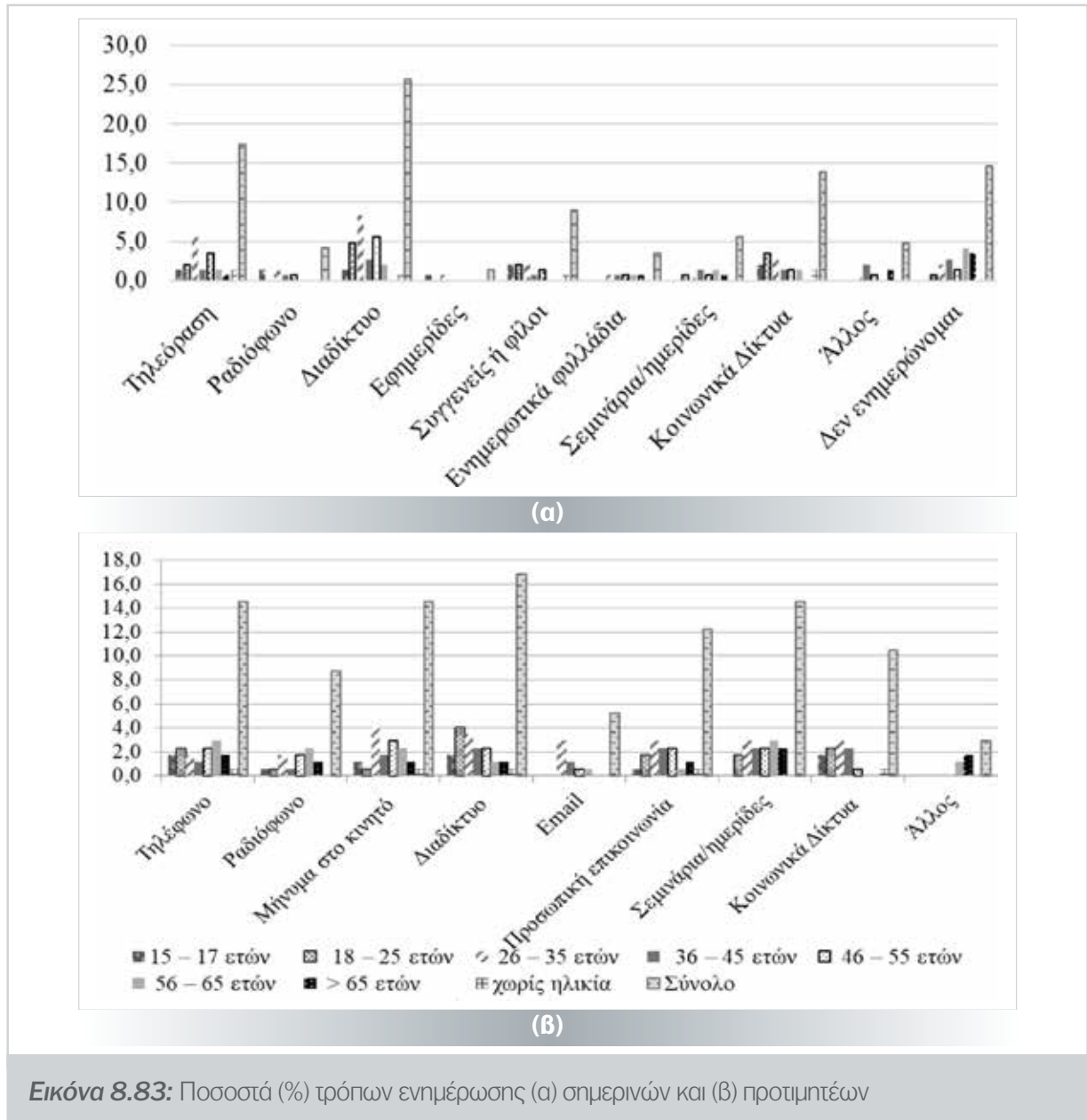
8.7.6 Εμπειρία των κατοίκων από την πλημμύρα του 2017

Εννέα στους 10 κατοίκους που έζησαν την πλημμύρα του 2017 δεν ήταν προετοιμασμένοι για αυτή. Στο ερώτημα «τι κάνατε ο ίδιος/ η ίδια στην πλημμύρα του 2017;» οι επικρατέστερες απαντήσεις ήταν «δεν πρόλαβα να κάνω τίποτα γιατί δεν υπήρχε χρόνος» (28.7%) και «πήγα μαζί με τα μέλη της οικογένειάς μου σε ασφαλέστερα σημεία» (19.7%), ενώ σημαντικά ήταν και τα ποσοστά αυτών που πανικοβλήθηκαν (10.7%) ή δεν ήξεραν τι να κάνουν (4.1%).

8.7.7 Ενημέρωση κατοίκων για τις πλημμύρες

Στην Εικόνα 8.83 (α) φαίνεται ότι το 15% των κατοίκων δεν ενημερώνεται σήμερα για το τι πρέπει να κάνουν όταν συμβεί μια πλημμύρα, 25.7% επιλέγουν το διαδίκτυο και 13.9% τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης για να ενημερωθούν, ενώ σημαντικό είναι και το ποσοστό ενημέρωσης από την τηλεόραση (17.4%). Οι κάτοικοι που ενημερώνονται περισσότερο ανήκουν στις ηλικίες 18-35 και 46-55 ετών, ενώ λιγότερο έως καθόλου ενημερώνονται οι κάτοικοι με ηλικία μεγαλύτερη των 56 ετών.

Σχεδόν οι μισοί κάτοικοι (48.2%) χαρακτηρίζουν την ενημέρωσή τους για τις πλημμύρες ως «κακή» μέχρι «πολύ κακή». Είναι αξιοπρόσεκτο ότι και το ποσοστό των κατοίκων που χαρακτηρίζουν την ενημέρωσή τους ως «καλή» μέχρι «πολύ καλή» είναι υψηλό (44.5%), γεγονός που δείχνει ότι σημαντικό τμήμα του τοπικού πληθυσμού αναζητεί και επιτυγχάνει μόνο του την ενημέρωσή του για το κίνδυνο πλημμύρας. Σημειώνεται, ότι τα ποσοστά των ατόμων ηλικίας 26-35 ετών που χαρακτηρίζουν την ενημέρωσή τους ως «καλή» είναι τα μεγαλύτερα από όλες τις κλάσεις ηλικιών.

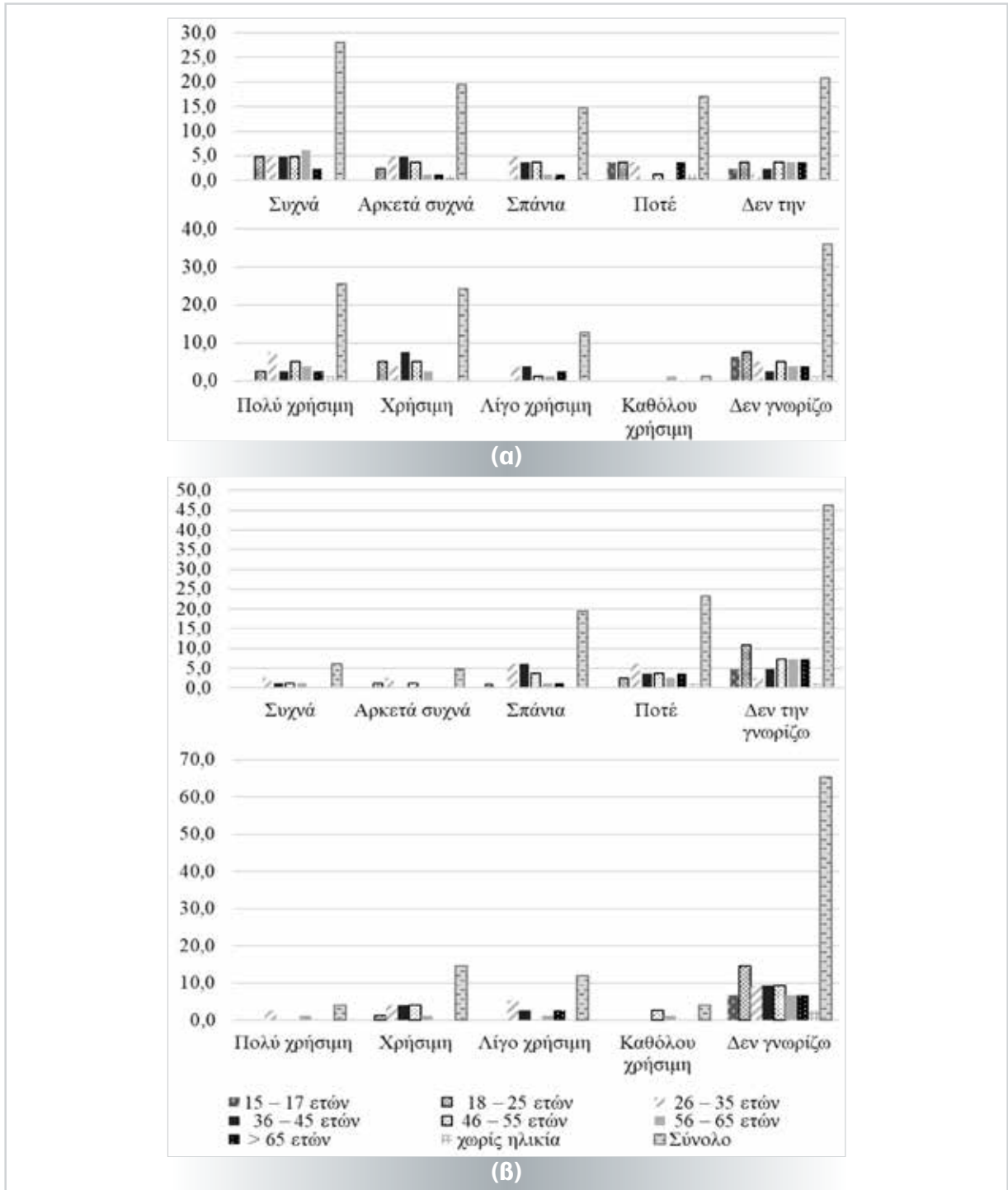


Εικόνα 8.83: Ποσοστά (%) τρόπων ενημέρωσης (α) σημερινών και (β) προτιμητέων

Όσον αφορά τον προτιμητέο τρόπο ενημέρωσης, η Εικόνα 8.84 (β) δείχνει ότι προηγείται το διαδίκτυο (16.9%), στη δεύτερη θέση ισοβαθμούν το τηλέφωνο, το μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο και τα σεμινάρια/ημερίδες (14.5% το καθένα), ακολουθούν η προσωπική επικοινωνία (12.2%) και τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης (10.5%), ενώ το ραδιόφωνο και το email βρίσκονται στις χαμηλότερες θέσεις προτίμησης με ποσοστά 8.7% και 5.2%, αντίστοιχα. Το διαδίκτυο επιλέχθηκε από μεγάλο εύρος ηλικιών (18-55 ετών), το τηλέφωνο προτιμήθηκε κυρίως από τις ηλικίες 18-25 και 46-65 ετών, με τη μεγαλύτερη προτίμηση να δείχνουν οι ηλικίες 56-65 ετών. Το μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο επιλέχθηκε επίσης από ένα μεγάλο εύρος ηλικιών (26-65 ετών) κάτι που δείχνει τη μεγάλη απήχηση που έχει ως μέθοδος και δικαιολογεί τη διαδεδομένη χρήση που έχει σε αρκετές χώρες για πολλαπλά είδη φυσικών καταστροφών.

Η διοργάνωση σεμιναρίων και ημερίδων επιλέχθηκε με σχεδόν ίδια ποσοστά απόκρισης από όλες τις ηλικιακές ομάδες. Τα χαμηλότερα ποσοστά απόκρισης σε όλες τις επιλογές παρατηρήθηκαν για την ηλικιακή ομάδα άνω των 65 ετών, γεγονός που ενδεχομένως δείχνει κάποιο αίσθημα απογοήτευσης των ατόμων αυτών για το θέμα των πλημμυρών που έχουν συμβεί στη Μάνδρα.

Οι απαντήσεις στο διττό ερώτημα «επισκέπτεστε τις ιστοσελίδες της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) και της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας (ΓΓΠΠ) για να ενημερωθείτε για προβλέψεις για άσχημο καιρό με έντονες βροχές και για να ενημερωθείτε για το τι πρέπει να κάνετε όταν συμβεί μια πλημμύρα αντίστοιχα; Πόσο χρήσιμες τις βρίσκετε;» παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.84. Είναι



Εικόνα 8.84: Ποσοστά (%) επίσκεψης και αξιολόγησης ιστοσελίδων (α) ΕΜΥ και (β) ΓΓΠΠ

αξιοσημείωτο ότι οι μισοί από τους ερωτώμενους επισκέπτονται «συχνά» (28.0%) ή «αρκετά συχνά» (19.5%) την ιστοσελίδα της ΕΜΥ, την οποία χαρακτηρίζουν ως «πολύ χρήσιμη» (25.6%) ή «χρήσιμη» (24.4%), ενώ το αντίστοιχα ποσοστά επίσκεψης για την ιστοσελίδα της ΓΓΠΠ είναι εξαιρετικά χαμηλά (6.1% και 4.9%), περίπου 1 στους 10.

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των προσωπικών συνεντεύξεων, αρκετοί άνθρωποι ηλικίας μεγαλύτερης των 50 ετών ανέφεραν ότι παρακολουθούν τα δελτία καιρού στην τηλεόραση, με σκοπό να ενημερωθούν για τις προβλέψεις που αφορούν άσχημες καιρικές συνθήκες, οπότε δεν γνωρίζουν την ιστοσελίδα. Σε κάθε περίπτωση, τα παραπάνω συμπεράσματα μπορεί να αξιοποιηθούν από τις σημαντικές για τις πλημμύρες υπηρεσίες της ΕΜΥ και της ΓΓΠΠ.

8.7.8 Ετοιμότητα κατοίκων για την αντιμετώπιση μιας πλημμύρας

Στην ερώτηση εάν γνωρίζουν οι κάτοικοι της Μάνδρας τι να κάνουν για να αντιμετωπίσουν μια πλημμύρα στη περιοχή, 60% των ερωτώμενων απάντησε αρνητικά, 21% θετικά και 19% απάντησε «δεν ξέρω». Επιπλέον, 9 στους 10 κατοίκους θεωρούν ότι τα υφιστάμενα αντιπλημμυρικά έργα στη Μάνδρα είναι ανεπαρκή και 7 στους 10 ότι δεν υπάρχει οργανωμένο σχέδιο αντιμετώπισης για πλημμύρες (2 στους 10 απάντησαν ότι υπάρχει). Ικανοποιητικό φαίνεται ότι είναι το κλίμα συνεργασίας μεταξύ των κατοίκων της Μάνδρας, μιας και 5 στους 10 θεωρούν ότι θα συνεργαζόντουσαν για να προετοιμαστούν για να αντιμετωπίσουν μια πλημμύρα και 7 στους 10 ότι θα συνεργαστούν όταν αυτή συμβεί, γεγονός που δείχνει ότι σημαντικό τμήμα της τοπικής κοινωνίας συνειδητοποιεί την ανάγκη για την από κοινού αντιμετώπιση του κινδύνου πλημμύρας στην περιοχή.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 8.41, μόνο 3 στους 10 κατοίκους της Μάνδρας νοιώθουν σήμερα ότι είναι «άριστα» ή «πολύ» έτοιμοι να αντιμετωπίσουν μια πλημμύρα και μόνο 2 θεωρούν ότι είναι το ίδιο έτοιμος ο γείτονάς τους. Η διαπίστωση αυτή καθιστά επιτακτική την ανάγκη ενημέρωσης των κατοίκων από τη μεριά της Πολιτείας για να αυξήσει την αίσθηση της ετοιμότητας και της ασφάλειας τους. Αυτό μπορεί να γίνει με ασκήσεις ετοιμότητας αντιμετώπισης πλημμύρας, τις οποίες το 93.6% των κατοίκων της Μάνδρας θεωρεί «πολύ χρήσιμες» (71.6%) μέχρι «χρήσιμες» (21.0%), ενώ το 2.5% των ερωτώμενων κρίνει ότι δεν χρειάζονται.

Πίνακας 8.41

Βαθμός ετοιμότητας αντιμετώπισης (%) μιας πλημμύρας το 2018 στη Μάνδρα		
Βαθμός ετοιμότητας	Πόσο έτοιμη/ έτοιμος νιώθετε να αντιμετωπίσετε μια πλημμύρα σήμερα;	Πόσο έτοιμη / έτοιμος νιώθετε ότι είναι ο γείτονας σας για να αντιμετωπίσει μια πλημμύρα σήμερα;
Άριστα	8.4	4.9
Πολύ	20.5	12.3
Λίγο	36.1	40.7
Καθόλου	30.1	25.9
Δεν ξέρω	4.8	16.0
Σύνολο	100.0	100.0

8.7.9 Προειδοποίηση κατοίκων για επικείμενη πλημμύρα

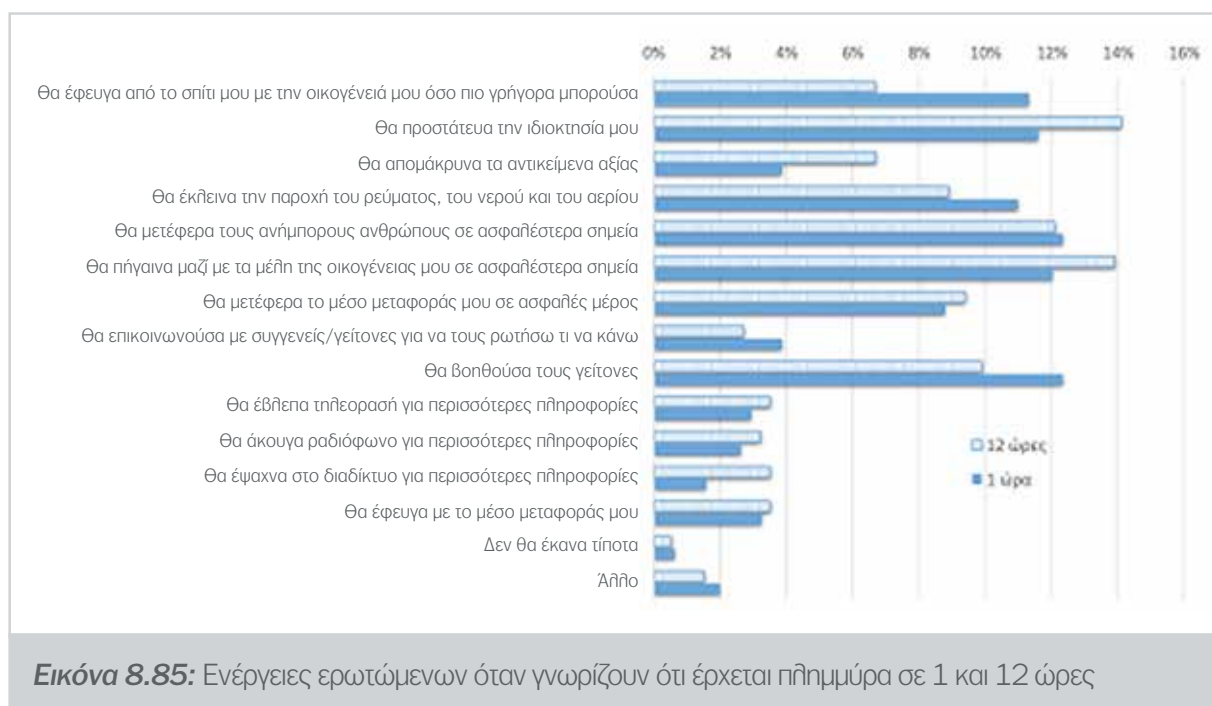
Ο προτιμτέος τρόπος προειδοποίησης είναι η «δημόσια ανακοίνωση με megάφωνο ή/και σειρήνα» (32.6%), ακολουθούν το «μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο» (15.8%), το «διαδίκτυο» (12.2%) και «τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης» (10.9%). Οι υπόλοιποι τρόποι προειδοποίησης που είναι το τηλέφωνο, η προσωπική επικοινωνία, το ραδιόφωνο και το email, συγκεντρώνουν ποσοστό μικρότερο από 10% ο καθένας.

Η μέθοδος με τη χρήση σειρήνων ή/και megάφωνων είναι αυτή που εφαρμοζόταν τουλάχιστον έως το 2018 στη περιοχή. Στις προσωπικές συνεντεύξεις αναφέρθηκε ότι μετά και τη πλημμύρα που έγινε τον Ιούνιο του 2018 γίνεται άσκοπη χρήση της, γεγονός που τους έχει κουράσει ψυχολογικά. Αυτό είναι αρνητικό γιατί αφού περάσει κάποιο διάστημα, οι κάτοικοι δε θα εμπιστεύονται πλέον τις προειδοποιήσεις που εκδίδονται.

Η επιλογή της μεθόδου «μήνυμα στο κινητό» είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά σήμερα για σεισμούς και πλημμύρες. Όσον αφορά την απάντηση στην ερώτηση «ποιος φορέας προτιμάτε να σας προειδοποιήσει ότι θα συμβεί μια πλημμύρα στη Μάνδρα;», τα παρατηρούμενα ποσοστά που είναι 30.6% για το Δήμο, 18% την ΕΜΥ, 15.0% την Αστυνομία, 14.6% την Πυροσβεστική Υπηρεσία, 12.6% την ΓΓΠΠ και 9.2% την Περιφέρεια, επιβεβαιώνουν την προτίμηση των κατοίκων να λαμβάνουν πληροφορίες από κάποιον που έχει γνώση της περιοχής.

Στην Εικόνα 8.85 συγκρίνονται οι ενέργειες των κατοίκων όταν λάβουν προειδοποίηση 12 ώρες πριν την πλημμύρα και 1 ώρα πριν από αυτή, ώστε να εξεταστεί η επίδραση του διαθέσιμου χρόνου προειδοποίησης στην αντίδραση-ενέργειες των κατοίκων. Και στις δύο περιπτώσεις οι ερωτώμενοι δεν έδωσαν ιδιαίτερη σημασία στη προστασία της περιουσίας τους, αφού μικρά ήταν τα ποσοστά επιλογής του «να κλείσουν την παροχή του ρεύματος, του νερού ή/και του αερίου» και του να «απομακρύνουν τα αντικείμενα αξίας» τόσο στη περίπτωση που έχουν διαθέσιμο χρόνο 1 ώρα, όσο και στη περίπτωση διαθέσιμου χρόνου 12 ωρών.

Επιπλέον, γίνεται αντιληπτή η αλληλεγγύη μεταξύ των κατοίκων της Μάνδρας. Τα αποτελέσματα αυτά, δείχνουν ότι, οι κάτοικοι έχουν επηρεαστεί, σε μεγάλο βαθμό, ψυχολογικά από τα προηγούμενα συμ-



Εικόνα 8.85: Ενέργειες ερωτώμενων όταν γνωρίζουν ότι έρχεται πλημμύρα σε 1 και 12 ώρες

βάντα πλημμύρας στη περιοχή και ότι κυριαρχεί ο φόβος. Πρέπει λοιπόν, εκτός από το σχεδιασμό ενός ΣΕΠΠ, που θα εξάγει έγκαιρες προειδοποιήσεις, να σχεδιαστεί ταυτόχρονα και να επαναλαμβάνεται ένα πρόγραμμα «εκπαίδευσης» των κατοίκων, για το πώς πρέπει να αντιλαμβάνεται τη πληροφόρηση που δέχεται και τι μπορεί να κάνει με αυτή, για να μετριάσει το κίνδυνο της ανθρώπινης ζωής και της περιουσίας τους.

8.8 Βιβλιογραφία

1. Andreadakis, E., Diakakis, M., Vassilakis, E., Deligiannakis, G., Antoniadis, A., Andriopoulos, P., Spyrou, N. I., & Nikolopoulos, E. I. (2020). Unmanned Aerial Systems-Aided Post-Flood Peak Discharge Estimation in Ephemeral Streams. *Remote Sensing*, 12(24), 4183. <https://doi.org/10.3390/rs12244183>
2. Antronico, L., Coscarelli, R., De Pascale, F., & Muto, F. (2017). Geo-hydrological risk perception: A case study in Calabria (Southern Italy). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.022>
3. Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., & Chousianitis, K. G. (2010). Soil erosion assesment in southern Evia Island using USLE and GIS. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Patras, May 2010.
4. Bournas, A., & Baltas, E. (2022a). Investigation of the gridded flash flood guidance in a peri-urban basin in Greater Athens area, Greece. *Journal of Hydrology*, 610, 127820. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127820>
5. Bournas, A., Baltas, E., & Stamou, A. (2022b). Implementation of the Gridded Flash Flood Guidance Method in the Mandra Basin in west Attica, Greece. *Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress*. Athens, Greece.
6. Brunner, G. (2020). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User’s Manual, Version 6.0; USACE CEC: Davis, CA, USA, 2020.
7. CLC (2018). CORINE Land Cover. Copernicus Land Monitoring Service. European Environment Agency (EEA). http://mapsportal.yopen.gr/layers/geonode:gr_clc2018
8. Diakakis, M., Andreadakis, E., Nikolopoulos, E. I., Spyrou, N. I., Gogou, M. E., Deligiannakis, G., Katsetsiadou, N. K., Antoniadis, Z., Melaki, M., Georgakopoulos, A., Tsaprouni, K., Kalogiros, J., & Lekkas, E. (2019). An integrated approach of ground and aerial observations in flash flood disaster investigations. The case of the 2017 Mandra Flash Flood in Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 290–309. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.015>
9. Diakakis, M., Deligiannakis, G., Antoniadis, Z., Melaki, M., Katsetsiadou, N. K., Andreadakis, E., Spyrou, N. I., & Gogou, M. (2020a). Proposal of a flash flood impact severity scale for the classification and mapping of Flash Flood Impacts. *Journal of Hydrology*, 590, 125452. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125452>
10. Diakakis, M., Deligiannakis, G., Andreadakis, E., Katsetsiadou, K. N., Spyrou, N. I., & Gogou, M. E. (2020b). How different surrounding environments influence the characteristics of flash flood mortality: The case of the 2017 extreme flood in Mandra, Greece. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12613>
11. Diakakis, M., Boufidis, N., Salanova, J., Andreadakis, E., & Stamos, I. (2020c). A systematic assessment of the effects of extreme flash floods on transportation infrastructure and circulation: The example of the 2017 Mandra flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 101542. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101542>

12. Feloni, E., Theochari, A.-P., Skroufouta, S., Bournas, A. and Baltas, E. (2021). Analysis of the hydrologic conditions during the flood event occurred in Mandra, Greece, on November 2017. In Proceedings of the 17th International Conference on Environmental Science and Technology, Athens, Greece, 1–4 September 2021, CEST: Athens, Greece, 2021.
13. FloodHub (2022). <https://floodhub.beyond-eocenter.eu/floodHub/#/pages/floods>
14. Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215–239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
15. Google (2022). Google Distance Matrix API. <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>.
16. Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., Liang, D., Falconer, R. A., Lin, B., Waller, S., Crossley, A. J., & Mason, D. C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 161(1), 13–30. <https://doi.org/10.1680/wama.2008.161.1.13>
17. IFRC (2017). Greece: Floods Emergency Plan of Action (EPoA) DREF n° MDRGR002; <https://reliefweb.int/report/greece/greece-floods-emergency-plan-action-epoa-dref-n-mdrgr002>
18. Koenig, T. A., Bruce, J. L., O'Connor, J., McGee, B. D., Holmes, R. R., Hollins, R., Forbes, B. T., Kohn, M. S., Schellekens, M., Martin, Z. W., & Pepler, M. C. (2016). Identifying and preserving high-water mark data. *Techniques and Methods*. <https://doi.org/10.3133/tm3a24>
19. Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B., & Thieken, A. H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1679–1692. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1679-2009>
20. Liang, Q., Du, G., Hall, J. W., & Borthwick, A. G. (2008). Flood inundation modeling with an adaptive quadtree grid shallow water equation solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(11), 1603–1610. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:11\(1603\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:11(1603))
21. Mamassis, N., Mazi, K., Dimitriou, E., Kalogeras, D., Malamos, N., Lykoudis, S., Koukouvinos, A., Tsirogiannis, I., Papageorgaki, I., Papadopoulos, A., Panagopoulos, Y., Koutsoyiannis, D., Christofides, A., Efstratiadis, A., Vitantzakis, G., Kappos, N., Katsanos, D., Psiloglou, B., Rozos, E., Kopania, T., Koletsis, I., & Koussis, A.D. (2021). OpenHi.net: A Synergistically Built, National-Scale Infrastructure for Monitoring the Surface Waters of Greece. *Water*, 13, 2779. <https://doi.org/10.3390/w13192779>
22. METEO (2023a). <https://penteli.meteo.gr/stations/elefsina/>
23. METEO (2023b). <http://penteli.meteo.gr/stations/mandra/>
24. Mitsopoulos, G., Bloutsos, A., Diakakis, M., Lekkas, E., Panagiotatou, E., Baltas, E., & Stamou, A. (2021a). Comparison of 2D with combined 1D/2D modeling: the case of the 2017 flash flood in Mandra, Greece. *Proceedings of 17th International Conference on Environmental Science and Technology*, 1 - 4 September 2021, Athens, Greece.
25. Mitsopoulos, G., Bloutsos, A., Diakakis, M., Panagiotatou, E., Lekkas, E., Baltas, E. and Stamou, A.I. (2021b). Flood modelling using a combined 1D/2D model: the case of the 2017 flash flood in Mandra, Greece. *Proceedings of 17th International Conference on Environmental Science and Technology*, 1 - 4 September 2021, Athens, Greece.
26. Mitsopoulos, G., Diakakis, M., Panagiotatou, E., Sant, V., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E., & Stamou, A. I. (2022a). ‘How would an extreme flood have behaved if flood protection works were built?’ the case of the disastrous Flash Flood of november 2017 in Mandra, Attica, Greece. *Urban Water Journal*, 19(9), 911–921. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2022.2103002>

27. Mitsopoulos, G., Panagiotatou, E., Sant, V., Baltas, E., Diakakis, M., Lekkas, E., & Stamou, A. (2022b). Optimizing the Performance of Coupled 1D/2D Hydrodynamic Models for Early Warning of Flash Floods. *Water*, 14(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/w14152356>
28. Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294–1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
29. Moore, I. D., Turner, A. K., Wilson, J. P., Jenson, S. K., & Band, L. E. (1993). GIS and land-surface-subsurface process modeling. In Goodchild, M.F.R., Parks, B.O. & Steyaert, L.T. (Eds), *Environmental modeling with GIS*, p. 196-230.
30. Nagurney, A., & Qiang, Q. (2008). A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks. *Journal of Global Optimization*, 40(1-3), 261-275. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9198-1>
31. NPERF (2023). <https://www.nperf.com/el/map/GR/-/7814.Cosmote-Mobile/signal/?ll=38.059986139487975&lg=23.535118103027347&zoom=12>
32. OpenHi (2022). Open Hydrosystem Information Network. <https://openhi.net/>
33. OSM (2022). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/node/357915480#map=16/38.0725/23.5017>
34. Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
35. Papadonikolaki, G., Mitsopoulos, G., Mavrogeorgos, C., Bloutsos, A., & Stamou, A. (2020). Modelling the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). *Proceedings of the 6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland.*
36. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No.703, 404 pp.
37. Rozos, D., Skilodimou, H. D., Loupasakis, C., & Bathrellos, G. D. (2013). Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. an example from N. Euboea (EVIA) island, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 70(7), 3255–3266. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2390-3>
38. Sigalos, G., Loukaidi, V., Dasaklis, S., & Alexouli-Livaditi, A. (2010). Assessment of the quantity of the material transported downstream of Sperchios river, central Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(2), 737-745.
39. Smith, G.P., E. K. Davey, and R.J. Cox. (2014). *Flood Hazard*. Water Research Laboratory. Technical Report 2014/07. June 17 2014.
40. Soil Conservation Service - SCS (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. Department of Agriculture, Washington DC, 762 p.
41. Stamou, A. (2018). The Disastrous Flash Flood of Mandra in Attica-Greece and now what? *Civil Engineering Research Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.19080/cerj.2018.05.555677>
42. Theochari, A.-P., Feloni, E., Bournas, A., & Baltas, E. (2021). Hydrometeorological - hydrometric station network design using multicriteria decision analysis and GIS Techniques. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-278188/v1>
43. Theochari, A. P., Feloni, E., Bournas, A., Karpouzou, D., & Baltas, E. (2019). Multi-criteria decision making and GIS techniques in the design of a stream gauging network. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 15(4), 358. <https://doi.org/10.1504/wrstd.2019.104097>

44. Thielen, A. H., Müller, M., Kreibich, H., & Merz, B. (2005). Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. *Water Resources Research*, 41(12). <https://doi.org/10.1029/2005wr004177>
45. Tsai, F., Lai, J.-S., Nguyen, K. A., & Chen, W. (2021). Determining cover management factor with Remote Sensing and spatial analysis for improving long-term soil loss estimation in watersheds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.3390/ijgi10010019>
46. Tsokanis, K., Mitsopoulos, G., Bloutsos, A. & Stamou, A. (2021). Modelling the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15041. <https://doi.org/10.5194/EYE, 2021>
47. Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (1999). Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau. EUR 19044 EN, 52pp.
48. Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (2000). Soil Erosion Risk Assessment in Europe. European Commission, Directorate General JRC, Space Applications Institute, European Soil Bureau.
49. ΕΚ (2020). Ελληνικό Κτηματολόγιο. e-ktimatologio. Ηλεκτρονικές Υπηρεσίες. Όπως ανακτήθηκε από τον ιστότοπο: https://www.ktimanet.gr/CitizenWebApp/Orthophotographs_Page.aspx
50. ΕΜΣΥ (2022). Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας. http://lmt.ypeka.gr/public_view.html
51. ΕΜΥ (2023). http://www.emy.gr/emv/el/observation/sa_teleytaies_paratiriseis_stathmu?perifereia=Attiki&poli=Elefsina
52. ΕΤΜΕ Πέππας & Συνεργάτες ΕΕ (2014). Οριστική Μελέτη εκτροπής χειμάρρου Αγ. Αικατερίνης & Διευθέτησης χειμάρρου Σούρες Θριασίου πεδίου, Φορέας Ανάθεσης: Περιφέρεια Αττικής – Διεύθυνση Υδραυλικών Έργων (Δ10), Αθήνα.
53. Καραμούστου, Π. (2018). Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για ξαφνικές πλημμύρες – Η περίπτωση της Μάνδρας, Αττικής [Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.]. ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
54. Καραμούστου, Π., & Στάμου, Α. (2019). Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Ξαφνικών Πλημμυρών και η Τοπική Κοινωνία – Η Περίπτωση της Μάνδρας Αττικής. Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.
55. Λέκκας, Ε., Λόζιος, Σ., Διακάκης, Μ., Κώτσι, Ε., Γκούτσης, Δ., Νάστος, Π., Δελακουρίδης, Ι., & Γράμπα, Α. (2018). Επιχειρησιακός σχεδιασμός για την μείωση των επιπτώσεων από πλημμυρικά φαινόμενα στους δήμους της περιφερειακής ένωσης δήμων Αττικής (πεδα). Η περίπτωση της Μάνδρας ως οδηγός αναφοράς και βελτίωσης της απόκρισης σε έκτακτες ανάγκες. Περιφερειακή ένωση δήμων Αττικής & Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. <https://www.pedattikis.gr/wrdp/wp-content/uploads/2018/10/1analysis-compressed.pdf>
56. Μαριοθιάκος, Η. (2008). Εκπόνηση ειδικών γεωλογικών χαρτών για την θέση Μελετάνι (Τρικέρατο) Δ. Αττικής και παροχή άλλων συναφών υπηρεσιών για την αξιολόγηση του υπεδάφους της περιοχής. Ερευνητικό Πρόγραμμα Δήμου Μάνδρας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος.
57. Μαρκόπουλος-Σαρίκας, Γ. (2018). Μαθηματική προσομοίωση της πλημμύρας στη Μάνδρα με χρήση μοντέλου TELEMAC [Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.]. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
58. Μαρκόπουλος-Σαρίκας, Γ., Ζέρβα, Ι., Μαυρογεώργος, Κ., & Στάμου, Α. (2019). Προσομοίωση της ξαφνικής πλημμύρας στη Μάνδρα Αττικής το 2017 με το διδιάστατο μοντέλο TELEMAC-2D. Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.

59. Ξανθάκης, Μ., Μινέτος, Π., Λυσίτσα, Γ., & Καμάρη, Γ. (2017). Εξέλιξη της εδαφικής διάβρωσης στην Κεφαλονιά με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της τροποποιημένης εξίσωσης εδαφικής απώλειας. 18ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο & International Workshop / Έδεσσα 8-11/10/2017.
60. Στάμου, Α. (2018). Η καταστροφική πλημμύρα της Μάνδρας. Ενέργειες για την αποφυγή παρόμοιας καταστροφής στο μέλλον. Προμηθέας, 9: 6-7, Μάιος - Ιούνιος 2018.
61. ΥΠΕΝ (2018). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής (ΦΕΚ Τεύχος Β' 2693/06.07.2018). Ειδική Γραμματεία Υδάτων.
62. ΥΠΕΝ (2022α). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Εδαφολογικός Χάρτης - Βάθος εδάφους (Επικράτεια). http://mapsportal.ypen.gr/layers/geonode:edafmap_1997#more
63. ΥΠΕΝ (2022β). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων της Χώρας. Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής CN με τη μεθοδολογία SCS. https://floods.ypeka.gr/egyfloods/reports/lpologismos_CN.pdf
64. ΥΠΕΝ (2022γ). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Γεωχωρική Πύλη, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Χρήσεις Γης, Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια. <http://msa.ypeka.gr/>



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

