

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



Νεκτάριος Ν. Κουργιαλάς
Γεωπόνος, M.Sc. Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
Ολοκληρωμένη Διαχείριση - Πρόβλεψη &
Αντιμετώπιση Πλημμυρικών Φαινομένων σε
Σύνθετες Γεωμορφολογικά Περιοχές με Χρήση
Μαθηματικών Μοντέλων και GIS

Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Π. Καρατζάς

ΧΑΝΙΑ 2010

**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
LABORATORY OF GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING**



**Nektarios N. Kourgialas
Agricultural Engineer,
M.Sc. Environmental Engineering**

**DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
Integrated Management - Forecast & Mitigation of
Floods in Complex Geomorphological Regions with
use of Mathematical Models and GIS**

**Supervisor Professor
George P. Karatzas**

CHANIA 2010

Νεκτάριος Ν. Κουργιαλάς
Ολοκληρωμένη Διαχείριση - Πρόβλεψη & Αντιμετώπιση
Πλημμυρικών Φαινομένων σε Σύνθετες Γεωμορφολογικά
Περιοχές με Χρήση Μαθηματικών Μοντέλων και GIS

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης.
Εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης, Τομέας Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής.

Ημερομηνία Προφορικής εξέτασης: 18 / 6 / 2010

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Γ. Π. Καρατζάς, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Επιβλέπων.*
2. Ν. Π. Νικολαΐδης, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.*
3. Ν. Καλογεράκης, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.*
4. Α. Λουκάς, Αν. Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών - Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Εξεταστής.*
5. Ε. Παλαιολόγος, Αν. Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Εξεταστής.*
6. Ν. Παρναυχιανάκης, Λέκτορας Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Εξεταστής.*
7. Α. Τσουκλαράκη, Λέκτορας Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος - Π.Κ, *Εξετάστρια.*

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής:

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ - ΠΡΟΒΛΕΨΗ & ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ
ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ GIS**

**«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα
Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει
αποδοχή των γνώμων του συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202,
παρ.2)**

**Στους γονείς μου
&
στην αδερφή μου**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πραγματοποίηση της παρούσας Διδακτορικής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς τη βοήθεια και συμβολή ορισμένων ανθρώπων.

Συγκεκριμένα, πρώτα από όλους:

Επιθυμώ να αναγνωρίσω την ιδιαίτερα ακούραστη, επιστημονική και ηθική υποστήριξη, καθώς και την αποφασιστική συμβολή του επιβλέποντος της εργασίας, Καθηγητή και Προέδρου του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Γεωργίου Καρατζά. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω θερμά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω στο Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα FLOODMED, μέσω του οποίου μου δόθηκε η δυνατότητα να αποκτήσω την απαραίτητη επιστημονική κατάρτιση για την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη, μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, για τις υποδείξεις του, την καθοδήγηση, τις διορθώσεις του και το χρόνο που διέθεσε. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή Νικόλαο Καλογεράκη, μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, για τις υποδείξεις του, καθώς και τις διορθώσεις του στη σύνταξη του κειμένου.

Εκφράζω τις ευχαριστίες μου επίσης στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: α) τον Αν. Καθηγητή Αθανάσιο Λουκά, β) τον Αν. Καθηγητή Ευάγγελο Παλαιολόγο, γ) το Λέκτορα Νικόλαο Παρανυχιανάκη και δ) τη Λέκτορα Ανδρονίκη Τσουκλαράκη, για τις διορθώσεις και τις υποδείξεις τους καθώς και για το χρόνο που διέθεσαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο προσωπικό του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής: Dr. Δόκου Ζωή, Βαρουχάκη Εμμανουήλ και Τριχάκη Ιωάννη, για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους καθόλη τη διάρκεια της διατριβής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την Dr. Τζωράκη Ουρανία, για την πολύτιμη βοήθειά της στα αρχικά στάδια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τέλος θα ήθελα πολύ να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου, για την ηθική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια!

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
EXTENDED ABSTRACT	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.	
ΓΕΝΙΚΑ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ .	8
1.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ – ΓΕΝΙΚΑ	9
1.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΤΑΜΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	10
1.2.1. Διάρθρωση Χειμαρρικών Ρευμάτων.....	12
1.3. ΠΟΤΑΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΟΗΣ.....	13
1.4. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	14
1.4.1. Ορισμός της πλημμύρας.....	14
1.5. ΟΙ ΑΙΤΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΚΑΙ Η ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΥΤΩΝ.....	15
1.6. ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ (FLASH FLOOD).....	18
1.6.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των στιγμιαίων πλημμυρών.	18
1.7. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	18
1.8. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΑΙΑ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	19
1.8.1. Κλιματικές αλλαγές και επίδραση τους στον Ελλαδικό χώρο	26
1.9. ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	27
1.9.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	28
1.9.2. Οικονομικές επιπτώσεις.....	29
1.9.3. Κοινωνικές επιπτώσεις	31
1.10. ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ	32
1.10.1. Καταστροφικές πλημμύρες και απώλειες ανθρώπινων ζώων	34
1.10.2. Καταστροφικές πλημμύρες και αριθμός πλημμυροπαθών.....	36
1.10.3. Το οικονομικό κόστος των πλημμυρών στην Ευρώπη	38

1.11. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ.....	41
1.11.1. Χρονική εμφάνιση των πλημμυρών.....	44
1.11.2. Πλημμύρες στην Κρήτη	46
1.12. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΟΔΗΓΙΕΣ 2000/60/ΕΚ ΚΑΙ 2007/60/ΕΚ.	47
1.12.1. Το Βασικό περιεχόμενο της οδηγίας για την αξιολόγηση των πλημμυρών	48
1.12.2. Προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας	49
1.12.3. Χάρτες πλημμυρικού κινδύνου	51
1.12.4. Εφαρμογή της Οδηγίας (2007/60/ΕΚ) για της πλημμύρες στην Ελλάδα.....	52
1.13. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2007/60/ΕΚ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ.....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ & ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΥ

ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	56
2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	57
2.1.1. Τρόπος επιλογής	57
2.1.2. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη	57
2.1.3. Γεωλογικά Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	61
2.1.4. Υδρογεωλογία λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	63
2.1.5. Χρήσεις Γης.	67
2.1.6. Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά	68
2.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ	71

2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΔΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	76
2.3.1. Γενικά	76
2.3.2. Παρακολούθηση του επιπέδου νερού σε ποτάμια	76
2.3.3. Μέτρηση της ταχύτητας και της παροχής των υδάτων στον ποταμό Κοιλιάρη και στον παραπόταμο Κεραμιώτη	78
2.4. ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS

3.1. ΓΕΝΙΚΑ	89
3.2. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ.....	92
3.2.1. Πλημμυρικά φαινόμενα.....	92
3.2.2. Προτεινόμενα Προ-Πλημμυρικά Μέτρα	92
3.2.3. Προτεινόμενο σύστημα πρόβλεψης - προειδοποίησης πλημμυρών. 103	
3.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS	115
3.4.1. Γενικά	115
3.4.2. Ορισμός και γενική περιγραφή του GIS	116
3.4.3. Μεθοδολογία χωρικής εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου	122
3.4.4. Αποτελέσματα μεθοδολογίας εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου....	129
3.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....

4.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	140
4.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	141
4.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	143
4.4. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ.....	144
4.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	151
4.5.1. Γενικές πληροφορίες	151
4.5.2. Ενεργειακό μοντέλο τήξης χιονιού (Energy Budget Snow Melt Model)	154
4.6. ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΩΡΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ – (GIS SNOW MELT RATE MODEL)	162
4.7. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ (MATLAB) ..	177
4.8. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HSPF	178
4.8.1. Υδρολογικές εξισώσεις του μοντέλου HSPF.....	181
4.8.2. Εφαρμογή του μοντέλου HSPF στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη	185
4.9. ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	188
4.10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ –ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	192
4.10.1. Μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου ρυθμού τήξης χιονιού - GIS και καρστικό μοντέλο	192
4.10.2. HSPF - Εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκους καρστικού καναλιού.....	194
4.10.3. Τελικά αποτελέσματα και αξιοπιστία του εννοιολογικού μοντέλου (Final results and the reliability of the conceptual model).....	202
4.11. ΣΥΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	208

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	210
5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ.....	211
5.2. ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΙΧΜΕΣ ΣΕ ΕΦΗΜΕΡΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	212
5.2.1. Γενικά	212
5.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΜΕΝΕΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΙΧΜΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	216
5.4. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΩΝ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ.	219
5.4.1. Ενέργεια Ποταμού - Stream Power.....	220
5.4.2. Ανάλυση φορτίου φερτών υλών - Εφαρμογή του μοντέλου HEM	224
5.5. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	232
5.6. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ	235
5.7. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ	250
5.8. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΡΟΠΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	251
5.8.1. Προσδιορισμός πλημμυρικής παροχής (Flooding flow)	252
5.8.2. Δημιουργία καμπυλών μέγιστης επιτρεπτής έντασης βροχής για την αποτροπή πλημμυρικού κινδύνου.....	257
5.8.3. Η εδαφική υγρασία σε σχέση με το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των γεγονότων βροχής.....	266
5.8.4. Συνδυασμός των επιμέρους συνιστωσών του μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών και τελικά αποτελέσματα	270
5.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	276

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	278
6.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE SHE & MIKE 11	279
6.1.1. Γενικά.....	279
6.1.2. Χαρακτηριστικά - πεδία εφαρμογών υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE & υδραυλικού μοντέλου MIKE 11	281
6.1.3. Τεχνικές επίλυσης Αριθμητικών μοντέλων MIKE SHE & MIKE 11 ..	284
6.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ - FLOOD IMPACT (RISK) ANALYSIS.....	291
6.2.1. Γενικά	291
6.2.2. Ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης επικινδυνότητας πλημμυρών...	293
6.3. ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE SHE & MIKE 11 ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ	301
6.4. ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	305
6.4.1. Προσομοίωση διδιάστατου πλημμυρικού κύματος, σε τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, με τη χρήση του Υδραυλικού μοντέλου MIKE 11	305
6.4.2. Εκτίμηση ζημιών κατά τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος (10') στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη.	321
6.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	329

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ..... 331

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 342

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Α 359

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 366

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Πίνακας 1. 1. Οι δέκα σημαντικότερες πλημμυρικές καταστροφές για την περίοδο (1900 – 2010), όσον αφορά την οικονομική ζημιά.	22
Πίνακας 1. 2. Οι δέκα σημαντικότερες πλημμυρικές καταστροφές για την περίοδο (1900 – 2010), όσον αφορά τον αριθμό νεκρών.	23
Πίνακας 1. 3. Οι επιπτώσεις των πλημμυρών σε αριθμούς, σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης (EM-DAT).	30
Πίνακας 1. 4. Αριθμός πλημμυρών και ανθρώπινες απώλειες τα τελευταία χρόνια, στην Ελλάδα.	42
Πίνακας 1. 5. Καταστροφές πλημμύρες στην Ελλάδα την περίοδο 2000 - 2010.	43
Πίνακας 1. 6. Έντονες βροχοπτώσεις 20ετίας στην Ελλάδα με έντονη πλημμυρογένεση	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Πίνακας 3. 1. Προβολικό σύστημα HATT.	121
Πίνακας 3. 2. Προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87.	121
Πίνακας 3. 3. Μετατροπή συντεταγμένων περιοχής μελέτης από HATT σε ΕΓΣΑ 87.	122
Πίνακας 3. 4. Βροχομετρικά δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη, [Στοιχεία Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ) & Εργ. Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής Π.Κ.].	126
Πίνακας 3. 5. Μέσος όρος μηνιαίας θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με το υψόμετρο για την περιοχή της λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη.	127
Πίνακας 3. 6. Βαθμονόμηση παραγόντων που συμβάλλουν στην πλημμυρική επικινδυνότητα.	136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Πίνακας 4. 1. Κατάταξη κλάσεων του ρυθμού τήξεως του χιονιού.....	164
Πίνακας 4. 2. Κατηγοριοποίηση και βαθμονόμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης χιονιού, (εκτεταμένος καρστικός ορεινός όγκος)...	175
Πίνακας 4. 3. Σταθμισμένη εκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης χιονιού.....	176
Πίνακας 4. 4. Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης.....	186
Πίνακας 4. 5. Χαρακτηριστικά των έξι καρστικών ζωνών.	192
Πίνακας 4. 6. Διακύμανση τιμών παραμέτρων βαθμονόμησης του μοντέλου HSPF στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη [SWS 1 - SWS 6].	198

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Πίνακας 5. 1. Παράμετροι για τον προσδιορισμό του «Gross Stream Power»...	223
Πίνακας 5. 2. Η τιμή του σύνθετου παράγοντα CN ανά υπολεκάνη.	228
Πίνακας 5. 3. Παράμετροι για τον προσδιορισμό του ολικού φορτίου φερτών υλών και της μέσης συγκέντρωσης ιζήματος σε κάθε υπολεκάνη, πλημμυρικό γεγονός (7).....	229
Πίνακας 5. 4. Σύσταση εδάφους και συντελεστής διαβρωσιμότητας. (Wilson et al., 2001).	230
Πίνακας 5. 5. Βροχομετρικά χαρακτηριστικά των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών (9), (10) και (11).....	237
Πίνακας 5. 6. Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός 24-25/1/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (9).....	246
Πίνακας 5. 7. Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός 10/2/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (10).....	247
Πίνακας 5. 8. Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός 16-17/2/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (11).....	248
Πίνακας 5. 9. Γεωμετρία - Πλημμυρική παροχή, υδρομετρικός σταθμός H1...	254
Πίνακας 5. 10. Συνολικό ύψος βροχής (σταθμός M1) σε σχέση με το χρόνο και την εποχή ικανή να προκαλέσει πλημμυρικό γεγονός στο σταθμό H1.....	264

Πίνακας 5. 11. Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, αρχικές εδαφικές συνθήκες και εποχή που λαμβάνει χώρα το κάθε στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός.....273

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Πίνακας 6. 1. Οικονομικά χαρακτηριστικά των γεωργικών καλλιεργειών – συνολικές γεωργικές ζημιές στην πλημμυρική περιοχή328

Πίνακας 6. 2. Οικονομικά χαρακτηριστικά κτιριακών εγκαταστάσεων - συνολικές κτιριακές ζημιές στην πλημμυρική περιοχή.....328

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Εικόνα 1. 1. Αποτελέσματα της αστικοποίησης στον όγκο και το ποσό της απορροής.	17
Εικόνα 1. 2. Παγκόσμια κατανομή τύπου φυσικών καταστροφών κατά την περίοδο 1963-2003..	21
Εικόνα 1. 3. Παγκόσμια κατανομή καταστροφικών πλημμυρών κατά την περίοδο 1974-2003..	22
Εικόνα 1. 4. Τα μεγαλύτερα πλημμυρικά γεγονότα που έγιναν στην Ευρώπη την περίοδο 1985-2002 (http://www.espon.eu/main/).	24
Εικόνα 1. 5. Πλημμυρικά φαινόμενα στα ιστορικά κέντρα της Πράγας και της Δρέσδης (Αύγουστος του 2002).	24
Εικόνα 1. 6. Ετήσιες, χειμερινές και καλοκαιρινές αποκλίσεις θερμοκρασίας στην Ευρώπη 1850–2000.	25
Εικόνα 1. 7. Δορυφορική εικόνα του πλημμυρικό γεγονός που έλαβε χώρα στις 22/2/2005 στον ποταμό Έβρο-Enros (http://earthobservatory.nasa.gov/).	27
Εικόνα 1. 8. Συνολικός αριθμός πλημμυρών στην Ευρώπη (1973-2002).	33
Εικόνα 1. 9. Συνολικός αριθμός πλημμυρών κατά Ευρωπαϊκό διαμέρισμα, ανά δεκαετία.	34
Εικόνα 1. 10. Συνολικός αριθμός Θανάτων από πλημμύρες, στην Ευρώπη.	35
Εικόνα 1. 11. Συνολικός αριθμός Θανάτων από πλημμύρες κατά Ευρωπαϊκό διαμέρισμα, ανά δεκαετία.	36
Εικόνα 1. 12. Συνολικός Ευρωπαϊκός πληθυσμός που επλήγη από πλημμύρες.	37
Εικόνα 1. 13. Συνολικός πληθυσμός που επλήγη από πλημμύρες κατά Ευρωπαϊκό γεωγραφικό διαμέρισμα, ανά δεκαετία.	37
Εικόνα 1. 14. Συνολική οικονομική ζημιά που προκάλεσαν οι πλημμύρες στην Ευρώπη.	39
Εικόνα 1. 15. Συνολική οικονομική ζημιά που προκάλεσαν οι πλημμύρες στην Ευρώπη κατά γεωγραφικό διαμέρισμα, ανά δεκαετία.	40

Εικόνα 1. 16. Αριθμός πλημμυρών στον Ελλαδικό χώρο.	42
Εικόνα 1. 17. Γεωγραφική κατανομή της πλημμυρικής επικινδυνότητας στον Ελλαδικό χώρο.	44
Εικόνα 1. 18. Μηνιαία κατανομή της συχνότητας των πλημμυρών στην Ελλάδα.	45
Εικόνα 1. 19. Χάρτης ημερήσιας βροχόπτωσης εκατονταετίας στην Κρήτη.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Εικόνα 2. 1. Γεωγραφική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, στο Ν. Χανίων.....	58
Εικόνα 2. 2. Υδρογραφικό δίκτυο και οι παραπόταμοι του ποταμού Κοιλιάρη. .	59
Εικόνα 2. 3. Χωρική απεικόνιση των Οικισμών και του Οδικού Δικτύου της Λεκάνης Απορροής του Κοιλιάρη.	60
Εικόνα 2. 4. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	60
Εικόνα 2. 5. Περιοχές Natura εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	61
Εικόνα 2. 6. Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	62
Εικόνα 2. 7. Σκαριφηματική γεωλογική τομή ανάντη των πηγών Στύλου.	63
Εικόνα 2. 8. Κατεύθυνση υπογείων υδάτων και πηγές εκφόρτισης.....	65
Εικόνα 2. 9. Γεωλογικά ρήγματα στη λεκάνη απορροής και οι πηγές στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	66
Εικόνα 2. 10. Χρήσεις γης της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	67
Εικόνα 2. 11. Οριακές και Μέσες τιμές θερμοκρασίας από το 1958 έως 1997. .	69
Εικόνα 2. 12. Οριακές και Μέσες τιμές θερμοκρασίας το 2007.....	69
Εικόνα 2. 13. Μέσες Τιμές Βροχόπτωσης από το 1958 έως 1997.....	70
Εικόνα 2. 14. Μέσες Τιμές Βροχόπτωσης το 2007.....	70
Εικόνα 2. 15. Σημείο ένωσης όλων των παραπόταμων της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	71

Εικόνα 2. 16. Υδρομετεωρολογικό δίκτυο στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	73
Εικόνα 2. 17. Ο παραπόταμος Κεραμιάωτης στο σημείο εξόδου από το φαράγγι του Δικτάμου.	73
Εικόνα 2. 18. Μετεωρολογικός σταθμός M2 (Υψόμετρο 385 m).....	74
Εικόνα 2. 19. Μετεωρολογικός σταθμός M1 (Υψόμετρο 1000 m).....	75
Εικόνα 2. 20. Ειδική σήμανση που τοποθετήθηκε στους τηλεμετρικούς σταθμούς.	76
Εικόνα 2. 21.Ο μηλίσκος FP101.	78
Εικόνα 2. 22. Ο μηλίσκος H-S OSS-B1.	79
Εικόνα 2. 23. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός H1 (Άγιος Γεώργιος) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του ποταμού, [Σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη].....	80
Εικόνα 2. 24. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός H2 (Στύλος) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του.....	81
Εικόνα 2. 25. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός H3 (Φαράγγι) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του.....	81
Εικόνα 2. 26. Υποσύστημα επικοινωνίας πλατφόρμας – βάσης. (http://www.koiliaris.tuc.gr/).	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Εικόνα 3. 1. Υψομετρική διακύμανση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη και το υδρογραφικό δίκτυο αυτής.	93
Εικόνα 3. 2. Διευθετήσεις στις κοίτες χειμάρρων, α) μικρά φράγματα κατά μήκος, β) αυλάκια (κατά Todd).(www.geo.auth.gr).....	95
Εικόνα 3. 3. Αποκατάσταση παρόχθιας ζώνης από τη διάβρωση και δημιουργία παρόχθιου δάσους από λεύκες για φυτο-εξυγίανση.(www.EnviFriendly.tuc.gr). 96	
Εικόνα 3. 4. Λιθοδομή κατά μήκος της όχθης του ποταμού Κοιλιάρη, σημείο εκδήλωσης παλαιότερου πλημμυρικού γεγονότος.....	97
Εικόνα 3. 5. Συνιστώσες - Μεθοδολογία πρόβλεψης πλημμυρών.....	104

Εικόνα 3. 6. Κατηγοριοποίηση του διαθέσιμου χρόνου μέχρι την εκδήλωση του πλημμυρικού γεγονότος (Flood timeline).....	107
Εικόνα 3. 7. Καμπύλη Day's.	112
Εικόνα 3. 8. Χωρική απεικόνιση της συγκέντρωσης και της διεύθυνσης ροής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, χρήση του αλγορίθμου ArcHydro σε περιβάλλον GIS.	124
Εικόνα 3. 9. Χωρική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών εντός και εκτός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	125
Εικόνα 3. 10. Εξίσωση μεταβολής της βροχόπτωσης σε σχέση με τη μεταβολή του υψομέτρου, για το βόριο-ανατολικό τμήμα του νομού Χανίων.	128
Εικόνα 3. 11. Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων που επηρεάζουν την πλημμυρική επικινδυνότητα.....	130
Εικόνα 3. 12. Χωρική πλημμυρική επικινδυνότητα για κάθε ένα παράγοντα – θεματικό χάρτη.....	131
Εικόνα 3. 13. Σχηματική απεικόνιση (διάγραμμα εργασίας) της μεθόδου της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων, (Model Builder GIS).	133
Εικόνα 3. 14. Τελικός χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας στη λεκάνη απορροής το ποταμού Κοιλιάρη.	133
Εικόνα 3. 15. Απεικόνιση των περιοχών με Πολύ Υψηλό δείκτη πλημμυρικής επικινδυνότητας, ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα στην περιοχή μελέτης.	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Εικόνα 4. 1. Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης της υδρολογίας πολύπλοκων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής.....	144
Εικόνα 4. 2. Σχηματική διάταξη του καρστικού μοντέλου των δυο ταμιευτήρων.	147
Εικόνα 4. 3. Οι πηγές του Στύλου και η εκτεταμένη καρστική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	150
Εικόνα 4. 4. Ιδεατή τομή χιονοκάλυψης.....	153
Εικόνα 4. 5 Α, Β. Ποσοστά Βροχόπτωσης - Χιονόπτωσης σε διάφορες θερμοκρασίες και σχέση Χιονόπτωσης – Υψομέτρου.....	153

Εικόνα 4. 6. Σχηματική απεικόνιση των συνιστωσών που επιδρούν στην τήξη του χιονιού.....	156
Εικόνα 4. 7. Η χωρική διαίρεση της εκτεταμένης καρστική περιοχής.	163
Εικόνα 4. 8. 2-D και 3-D ψηφιακό εδαφικό μοντέλο (TIN, DEM).	165
Εικόνα 4. 9. 2-D και 3-D αναπαράσταση των κλίσεων του εδάφους.....	166
Εικόνα 4. 10. 2-D και 3-D απεικόνιση της έκθεση του εδάφους.	166
Εικόνα 4. 11. Χρήσεις γης στο ορεινό όγκο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	168
Εικόνα 4. 12. 2-D και 3-D αναπαράσταση της φωτεινότητας του εδάφους.	169
Εικόνα 4. 13. Σχηματική απεικόνιση τις αλληλεπίδρασης των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης του χιονιού.	172
Εικόνα 4. 14. Πλατφόρμα προσομοίωσης μορφής GUI, της συνένωσης του καρστικού μοντέλου και του μοντέλου ρυθμού τήξης χιονιού.....	177
Εικόνα 4. 15. Σχηματική απεικόνιση του ποταμιού και ο πίνακας FTABLE. ..	179
Εικόνα 4. 16. Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου στο μοντέλο HSPF..	180
Εικόνα 4. 17. Σχηματική απεικόνιση των βασικών υδρολογικών διαδικασιών σε τμήμα τομής ποταμού.....	182
Εικόνα 4. 18. Οι έξι υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	186
Εικόνα 4. 19. Υπομοντέλο WDM και οι μετεωρολογικές χρονοσειρές.....	187
Εικόνα 4. 20. Το καρστικό κανάλι (Φαράγγι Δίκταμος – SWS4).	189
Εικόνα 4. 21. 2-D αναπαράσταση του υδρολογικού ισοζυγίου στο καρστικό κανάλι - υδατόρευμα (Φαράγγι Δίκταμος).	190
Εικόνα 4. 22. Χάρτες ρυθμού τήξης χιονιού για κάθε παράγοντα και ο τελικός 2-D - 3-D χωρικός χάρτης ρυθμού τήξης χιονιού.	193
Εικόνα 4. 23. Ημερήσια εκφόρτιση από τις πηγές του Στύλου και ο αντίστοιχος συνολικός ρυθμός τήξης του χιονιού.	194
Εικόνα 4. 24. Διαίρεση της λεκάνης σε 6 υπολεκάνες και προσομοίωση με το μοντέλο HSPF.	195

Εικόνα 4. 25. Υπομοντέλο (GenScn) και ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου HSPF.	195
Εικόνα 4. 26. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου (SWS 5 – SWS 4) και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 5).....	199
Εικόνα 4. 27. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 4).....	200
Εικόνα 4. 28. Αποτελέσματα ημερήσιας παροχής μοντέλου (Είσοδος – Έξοδος SWS 4).....	201
Εικόνα 4. 29. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 1).....	204

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Εικόνα 5. 1. Στάδια γένεσης των καρστικών στιγμιαίων πλημμυρών.	215
Εικόνα 5. 2. Τηλεμετρικοί υδρομετρικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών.....	217
Εικόνα 5. 3. Δεδομένα ημερήσιας και ωριαίας χρονικής παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό H1 για τα 11 στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα.....	219
Εικόνα 5. 4. Οι 6 Υπό-λεκάνες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, και τα αντίστοιχα τμήματα των παραποτάμων.	222
Εικόνα 5. 5. Τιμές των «Specific Stream Power» και «Gross Stream Power» για τους παραποτάμους (Κεραμιώτη και Αναβρετή), πλημμυρικό γεγονός (7).	223
Εικόνα 5. 6 Α και Β. Ολικό φορτίο φερτών υλών (Kg/m) και Μέση συγκέντρωση ιζήματος (%) για τους παραποτάμους Κεραμιώτη και Αναβρετή, πλημμυρικό γεγονός (7).....	231
Εικόνα 5. 7. Στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (9, 10, 11) και τα αντίστοιχα ημερήσια υδρομετεωρολογικά δεδομένα από όλους τους σταθμούς.	236
Εικόνα 5. 8. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα 24-25/1/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H3, H2.....	239
Εικόνα 5. 9. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα 10-11/2/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H3, H2.	240

Εικόνα 5. 10. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα τη 16/2/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H3, H2.	241
Εικόνα 5. 11. Γεωμετρία διατομής του ποταμού Κοιλιάρη στο σημείο που έχει εγκατασταθεί ο υδρομετρικός σταθμός H1.	255
Εικόνα 5. 12. Ωριαία γραμμική συσχέτιση μεταξύ υψηλών παροχών (υδρομετρικός σταθμός H2 και υδρομετρικός σταθμός H1).	256
Εικόνα 5. 13 A, B και Γ. Γραμμικές σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή P_0 , για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου.	260
Εικόνα 5. 14. Σύστημα αρίθμησης Strahler, για το ποτάμιο σύστημα, του παραπόταμου Κεραμιώτη.	263
Εικόνα 5. 15. Καμπύλες μέγιστης επιτρεπτής έντασης βροχής (σταθμός M1), ανά εποχή, προκειμένου να αποφευχθεί πλημμυρικό γεγονός στο σταθμό H1.	265
Εικόνα 5. 16. Καμπύλες συσχέτισης συσσωρευμένης βροχόπτωσης (σταθμός M1) και των αντίστοιχων υψηλών παροχών - αιχμών (σταθμός H1), ανάλογα με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε σε σχέση με το προηγούμενο γεγονός βροχής.	269
Εικόνα 5. 17. Γραφική απεικόνιση των δύο συνιστωσών του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών.	271
Εικόνα 5. 18. Επαλήθευση του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρών, μέσω των πλημμυρικών αιχμών (1-11).	273
Εικόνα 5. 19. Πλημμυρική αιχμή (12), ωριαία καταγραφόμενη παροχή και βροχόπτωση (σταθμοί H1 - M1).	275
Εικόνα 5. 20. Επαλήθευση του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών με την πλημμυρική αιχμή (12).	276

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Εικόνα 6. 1. Αλληλουχία υδρολογικών διεργασιών που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE SHE.	283
Εικόνα 6. 2. Ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης κινδύνου – επιπτώσεων των πλημμυρών (IFRAS).	294

Εικόνα 6. 3. Οι υποκατηγορίες των ζημιών από τις πλημμύρες.	295
Εικόνα 6. 4. Τυπική καμπύλη βάθους πλημμυρικού νερού και ποσοστού ζημιάς σε κατοικίες.....	296
Εικόνα 6. 5. Τυπικές δυναμικές καμπύλες βάθους πλημμυρικού νερού και ποσοστού ζημιάς σε γεωργικές καλλιέργειες.....	297
Εικόνα 6. 6 A, B. Περιοχή μελέτης – διακριτικότητα μοντέλου και επιλογή διεργασιών που προσημειώνονται.....	302
Εικόνα 6. 7. Εισαγωγή τοπογραφικής πληροφορίας στο MIKE SHE.	302
Εικόνα 6. 8. Περιοχή προσομοίωσης του πλημμυρικού κύματος.	305
Εικόνα 6. 9. Μελετούμενο θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός (10').	306
Εικόνα 6. 10. Πλατφόρμα εισαγωγής του μοντέλου MIKE 11 στο MIKE SHE. .	307
Εικόνα 6. 11. Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο MIKE 11.	308
Εικόνα 6. 12. Χωρική απεικόνιση της κεντρικής γραμμής ροής και των διατομών στο υδραυλικό μοντέλο MIKE 11.	310
Εικόνα 6. 13. Χρήσεις γης κατά μήκος των διατομών.....	311
Εικόνα 6. 14. Δεδομένα εισόδου για τη δημιουργία του 2-D πλημμυρικού χάρτη.	312
Εικόνα 6. 15. Αποθήκευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.	313
Εικόνα 6. 16. Τελικό στάδιο για την εκτέλεση της προσομοίωσης.	313
Εικόνα 6. 17. Μέγιστες τιμές βάθους ροής νερού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.	315
Εικόνα 6. 18. Πλάτος ροής ποταμού Κοιλιάρη (κατάντη τμήμα), πριν την έναρξη του πλημμυρικού κύματος.	316
Εικόνα 6. 19. Μέγιστο πλάτος πλημμυρικού κύματος και διακύμανση βάθους νερού.	317
Εικόνα 6. 20. Διαφανή απεικόνιση μέγιστου πλάτος πλημμυρικού κύματος και διακύμανση βάθους νερού.	318
Εικόνα 6. 21. Δυναμικό βάθος του πλημμυρικού κύματος σε κάθε σημείο της πλημμυρικής περιοχής (κάνναβος).	319

Εικόνα 6. 22. Πλημμυρικό κύμα (10') - ιστορικά καταγεγραμμένα πλημμυρικά σημεία.	320
Εικόνα 6. 23 Α, Β. Πλημμυρική περιοχή και χρήσεις γης που επηρεάζονται. .	323
Εικόνα 6. 24. Κτιριακά συγκροτήματα (έξι συνολικά κτίρια), που επηρεάζονται από το πλημμυρικό κύμα (10').	326
Εικόνα 6. 25. Οδικές αρτηρίες οι οποίες πουπηρεάζονται από το πλημμυρικό κύμα (10').	327

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διδακτορική διατριβή, στόχο έχει την ολοκληρωμένη διαχείριση - πρόβλεψη και αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, με βάση τις αρχές της νέας Ευρωπαϊκής Οδηγίας σχετικά με την αντιμετώπιση των πλημμυρών (2007/60/EC). Ένα αξιόπιστο πλημμυρικό διαχειριστικό πλάνο, έχει δύο συνιστώσες: α) Τη σωστή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων και β) Τη χωρική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Επίσης περιγράφεται η αναγκαιότητα ύπαρξης ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης του πλημμυρικού κινδύνου σε επίπεδο λεκάνης και ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να εκτιμήσουμε τα οφέλη από ένα τέτοιο σύστημα. Αναλυτικότερα περιγράφεται η αναγκαιότητα ύπαρξης ενός αξιόπιστου τηλεμετρικού δικτύου αποθήκευσης και μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής.

Σε μικρές λεκάνες απορροής, όπου ο διαθέσιμος χρόνος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου είναι μικρός, η εκ των προτέρων γνώση των περιοχών εκείνων που δύναται να πληγούν άμεσα από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό φαινόμενο είναι ιδιαίτερος σημαντική. Έτσι με τη δημιουργία μιας απλής μεθοδολογίας, που βασίζεται στη χρήση του GIS, προσδιορίζουμε χωρικά τις περιοχές εκείνες που έχουν αυξημένη επικινδυνότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, από τους παράγοντες εκείνους που εμπλέκονται άμεσα στη δημιουργία ενός πλημμυρικού φαινομένου προκύπτουν θεματικοί χάρτες που περιγράφουν το βαθμό του πλημμυρικού κινδύνου. Η πλημμυρική επικινδυνότητα κατηγοριοποιείται σε πέντε κλάσεις: Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή και Πολύ Χαμηλή. Προκειμένου να συνδυαστούν οι παραπάνω θεματικοί χάρτες προσδιορίζονται διάφοροι συντελεστές βαρύτητας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας χωρικός χάρτης εκτίμησης του βαθμού επικινδυνότητας σε πλημμυρικά φαινόμενα και ο προσδιορισμός των περιοχών – οικισμών άμεσου πλημμυρικού κινδύνου (επιρρεπείς). Η ανωτέρω προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής.

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος πρόβλεψης έχει άμεση σχέση με τη βαθιά γνώση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης απορροής και τη δυνατότητα της ακριβούς προσομοίωσης των ιδιαίτερων υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν μέσα σε αυτή. Μια σύνθετη

γεωμορφολογικά λεκάνη απορροής μπορεί να αποτελείται από παραποτάμους διαλείπουσας και μόνιμης ροής, υψηλές ορεινές αλλά και πεδινές καρστικές περιοχές, πηγές και καρσικά κανάλια. Προκειμένου να προσομοιώσουμε με ακρίβεια τα παραπάνω υδρολογικά χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε τέτοιες λεκάνες απορροής, δημιουργήσαμε ένα συνδυασμό τεσσάρων μοντέλων: α) Το καρστικό μοντέλο του Maillet, προκειμένου να προσδιορίσουμε την εκφόρτιση των πηγών, β) Ένα μοντέλο χωρικού προσδιορισμού ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο (A GIS based Energy Budget Snow Melt model), το οποίο δημιουργήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια ο ρυθμός τήξης του χιονιού στους ορεινούς καρστικούς όγκους και η παροχή εισόδου (τήξη χιονιού, βροχή) στο καρστικό σύστημα της περιοχής μελέτης. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού (matlab) προκειμένου να ενσωματώσει τα παραπάνω δύο ανεξάρτητα μοντέλα, γ) Ένα εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών, και δ) Το υδρολογικό μοντέλο HSPF. Στα στάδια δημιουργίας του παραπάνω ολοκληρωμένου πλαισίου μοντελοποίησης, περιλαμβάνονται επίσης οι διαδικασίες της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης, της ανάλυσης ευαισθησίας και της εκτίμησης αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παραπάνω πακέτου μοντελοποίησης έδειξαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις μετρήσεις του πεδίου.

Σε συνθέτες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, που χαρακτηρίζονται από καρστικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, εμφανίζονται συχνά καρστικές και μη καρστικές στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές, με πολύ καταστροφικές συνέπειες. Η λεπτομερής υδρολογική ανάλυση των παραπάνω πλημμυρικών αιχμών μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της γένεσης αυτών αλλά και στον έλεγχο τους, μέσω της δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση των βροχομετρικών και υδρομετρικών παραμέτρων είναι απαραίτητο να είναι τουλάχιστο σε ωριαία βάση. Ειδικότερα, ο χρόνος συγκέντρωσης, είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το χρόνο απόκρισης ενός επερχόμενου στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος. Στην περίπτωση που ο παραπάνω χρόνος είναι επαρκής για τη γρήγορη ενημέρωση των αρμόδιων φορέων και τη λήψη άμεσων και βασικών μέτρων προστασίας των πολιτών και των περιουσιών τους, προτείνεται ένα μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών λαμβάνει υπόψη του σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους όπως είναι α) η ποσότητα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης, β) η διάρκεια του γεγονότος βροχής, γ) η εποχή που το γεγονός

βροχής λαμβάνει χώρα, και δ) το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχόπτωσης και του αμέσως προηγούμενου αυτής. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών επαληθεύτηκε από 12 καταγραφόμενα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα.

Επίσης στην παρούσα Διδακτορική διατριβή, σύμφωνα και με τη φιλοσοφία της οδηγίας 2007/60/EC, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων (Integrated Flood Risk-impact Analysis System - IFRAS) σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: α) Ένα καταναμημένο υδρολογικό μοντέλο με φυσική σημασία για πλημμυρικά φαινόμενα, το οποίο είναι πλεγματικό και προσομοιώνει τις πλημμυρικές παραμέτρους στο χώρο και στο χρόνο (MIKE SHE – MIKE 11), και β) Ένα μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών. Οι δυο παραπάνω συνιστώσες του IFRAS έχουν τη δυνατότητα της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Το προτεινόμενο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής και αποτελεί ένα απλό, αλλά χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση των επακόλουθων οικονομικών ζημιών ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος.

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω προσεγγίσεων, μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής (τόσο απλής όσο και σύνθετης γεωμορφολογίας). Στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής διατριβής και του Ευρωπαϊκού Προγράμματος «FLOODMED», ως περιοχική μελέτη επιλέχτηκε η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη στο Ν. Χανίων – Κρήτη. Έτσι στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, προκειμένου να προσεγγίσουμε τις απαιτήσεις της παρούσας Διδακτορικής διατριβής, ήταν απαραίτητη η εγκατάσταση ενός τηλεμετρικού υδρομετεωρολογικού δικτύου, για την παρατήρηση των αντίστοιχων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο.

Η πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής έγκειται στο ότι:

- 1) Προτείνεται ένα ολοκληρωμένο διαχειριστικό πλάνο για την αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων, σε σύνθετες γεωμορφολογικά περιοχές και στα πλαίσια της νέας Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τις πλημμύρες (2007/60/EC).
- 2) Αναπτύχθηκε μεθοδολογία, που βασίζεται στη χρήση του GIS, για τη χωρική κατηγοριοποίηση του πλημμυρικού κινδύνου. Έτσι δημιουργήθηκε ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρότερη γνώση των περιοχών και των αντίστοιχων οικισμών που εμφανίζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα (επιρρεπείς) σε πλημμυρικά φαινόμενα.
- 3) Δημιουργήθηκε ένα ενιαίο πλαίσιο μοντελοποίησης των υδρολογικών διαδικασιών σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής. Παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ταυτόχρονης προσομοίωσης των υδρολογικών διαδικασιών σε παραποτάμους διαλείπουσας και μόνιμης ροής, υψηλές ορεινές αλλά και πεδινές καρστικές περιοχές, πηγές και καρστικά κανάλια.
- 4) Επιπρόσθετα αναπτύχθηκε μοντέλο χωρικού προσδιορισμού ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο (A GIS based Energy Budget Snow Melt model), το οποίο δημιουργήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια ο ρυθμός τήξης του χιονιού στους ορεινούς όγκους.
- 5) Δημιουργήθηκε επίσης ένα μοντέλο πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών, το οποίο βασίζεται στη λεπτομερή ανάλυση των υδρογραφημάτων της περιοχής μελέτης και τη γνώση σε πραγματικό χρόνο: α) της ποσότητας της συσσωρευμένης βροχόπτωσης, β) της διάρκειας του γεγονότος βροχής, γ) της εποχής που το μελετούμενο γεγονός λαμβάνει χώρα, και δ) το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχόπτωσης και του αμέσως προηγούμενου γεγονότος βροχής.
- 6) Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων (Integrated Flood Risk-impact Analysis System - IFRAS) σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο σύστημα βασίζεται στη δυναμική αλληλεπίδραση, ενός κατανεμημένου – πλεγματικού υδρολογικού μοντέλου και ενός μοντέλου εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών.

- 7) Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν συνολικά ή η κάθε μία ξεχωριστά, σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής (τόσο απλής όσο και σύνθετης γεωμορφολογίας).

EXTENDED ABSTRACT

The goal of the research presented in this PhD dissertation is the development of an integrated flood management – forecast and mitigation strategy in river basins with complex geomorphology, based on the European Directive (2007/60).

A GIS based methodology that evaluates the benefits of a flood warning system and a method to estimate the spatial distribution of flood hazardous areas are proposed as the first steps towards a reliable flood management strategy. They constitute useful tools in the identification of areas and settlements with high flood risk.

A successful prediction system depends on the accurate knowledge of the geomorphological characteristics of the river basin. Thus, in order to simulate the surface and groundwater flow in a karstic river basin where flood phenomena occur, a unified modeling framework was developed that combines four distinct models: a) a two part Maillet Karstic model used to determine the spring discharge, b) a GIS based Energy Budget Snow Melt model and a matlab code incorporates the previous two models, c) an empirical karstic channel model that simulates flow, and d) the Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF) model in the frame of the BASINS 4 model. The main steps of this part of the dissertation included the calibration, validation and sensitivity analysis of the HSPF model. The obtained simulated results were in very good agreement with the observed field data.

Additionally, a joint flash flood prediction model was developed based on the specific geomorphological characteristics of the river basin such as the rainfall cumulative and intensity, the concentration time, the season during which the rainfall takes place and the time intervals between rainstorms that affect the soil moisture conditions. The verification of this model was performed using observed flow data peaks measured downstream.

The final step of the work presented herein is the development of an Integrated Flood Risk-impact Analysis System (IFRAS) at the river basin level. This system is based on the dynamical interaction of a physically-based, distributed, integrated hydrological modeling system (MIKE SHE – MIKE 11) with a model that estimates flood losses.

A combination of the approaches presented above can be applied in any river basin of simple or complex geomorphology. The river basin chosen for this study is the Koiliaris River basin, located east of the City of Chania, Crete, (Greece). This basin has a complex hydro-geology that consists of temporary rivers (tributaries), high mountainous karstic areas, springs, downstream karstic areas and karstic channel parts. Thus, the construction of a telemetric hydrological network (funded by the European Program 'FLOODMED') that provides hourly real-time data was of great importance for the success of this study.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΓΕΝΙΚΑ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

1.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ – ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό έχει ουσιαστική σημασία για τη ζωή, διότι αποτελεί τόσο βασικό συστατικό όλων των οργανισμών, και χρήσιμο διαλυτικό, όσο και μεταφορικό μέσο και σπουδαίος φορέας ενέργειας. Το νερό καταλαμβάνει το 17% της επιφάνειας της γης, τα αποθέματα όμως σε γλυκό (πόσιμο) νερό ανέρχονται μόλις στο 2,6% των συνολικών αποθεμάτων της γης. Επίσης οι εναλλαγές τήξης και πήξης του νερού, που προκαλούνται από τις θερμικές μεταβολές λόγω των καιρικών αλλαγών και οι καλές διαλυτικές ικανότητες του συμβάλουν ιδιαίτερα στη φυσική και χημική αποσάθρωση του στερεού φλοιού της Γης και έτσι στη δημιουργία εδαφών.

Με την επίδραση της ηλιακής ενέργειας ένα μέρος του νερού της γης υψίσταται συνεχή κυκλοφοριακή κίνηση μεταξύ της γήινης επιφάνειας και της ατμόσφαιρας, η οποία είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος. Το ποσό του νερού που συμμετέχει στην ανακύκλωση, εκτιμάται σε $496 \times 10^3 \text{ km}^3$. Η ποσότητα αυτή όμως εκφρασμένη σε ποσοστό ως προς το σύνολο των υδάτινων αποθεμάτων της Γης ανέρχεται μόνο στο 1% περίπου. Συνεπώς, ο άνθρωπος ζει με την επίδραση του μικρού αυτού ποσοστού, μέσα στα πλαίσια του οποίου μπορεί να ρυθμίσει την υδατική οικονομία του (Κωτούλας, 2001).

Τα ύδατα φτάνουν στην επιφάνεια της γης με μορφή κατακρημνισμάτων, δηλαδή βροχής, χιονιού ή χαλαζιού. Από αυτά ένα μέρος εξατμίζεται ήδη κατά την πτώση του και επιστρέφει αμέσως στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο μέρος τους όμως φθάνει στο έδαφος, από το νερό αυτό ένα σημαντικό μέρος εξατμίζεται απ' ευθείας από την εδαφική επιφάνεια ή διαμέσου των φυτών (διαπνοή). Ένα μικρότερο μέρος διηθείται προς τα βαθύτερα στρώματα της γης σχηματίζοντας τα υπόγεια νερά και τις πηγές και εμποτίζοντας το έδαφος με υγρασία. Η μεγαλύτερη ποσότητα του νερού όμως απορρέει επιφανειακά προς τις χαμηλότερες περιοχές σχηματίζοντας υδάτινα νάματα, υδατοφλέβες, μικρά ρεύματα, χείμαρρους, χείμαρροποταμούς, ποταμούς, που τελικά καταλήγουν σε ένα μεγαλύτερο αποδέκτη (λίμνη ή θάλασσα). Από εκεί το νερό εξατμίζεται και επιστρέφει πάλι στην ατμόσφαιρα.

Η ετήσια υδρολογική ανακύκλωση δεν εξελίσσεται με ομοιόμορφο τρόπο, με αποτέλεσμα η δίαιτα των ρευμάτων, δηλ. η ετήσια πορεία της υδατοπαροχής τους, να παρουσιάζει συχνά βλαπτικές ανωμαλίες. Οι ισχυρές βροχοπτώσεις οδηγούν στο σχηματισμό αυξημένης υδατοαπορροής και σε πλημμύρες.

Αντίθετα, η έλλειψη βροχοπτώσεων ελαχιστοποιεί ή και εξαφανίζει την απορροή και προκαλεί λειψυδρία.

Κατά την ροή τους από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες περιοχές της χέρσου τα ύδατα παρασύρουν, μεταφέρουν και αποθέτουν κάθε είδους ύλες, τις οποίες αποσπών από το στερεό φλοιό, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται συνεχώς οι εξάρσεις της γης, να προσκλώνονται τα βυθίσματα της και να αυξάνονται και να επεκτείνονται οι πεδιάδες. Αυτή η διαβρωτική και μεταφορική δράση καθιστά το νερό έναν από τους σπουδαιότερους γεωμορφολογικούς παράγοντες, δημιουργεί όμως σοβαρά προβλήματα στον άνθρωπο, από τα οποία τα σπουδαιότερα είναι (Κωτούλας, 2001):

- Οι προσχώσεις των πεδινών κοιτών, οι οποίες μειώνουν την παροχευτικότητα των ρευμάτων και οδηγούν σε πλημμύρες και καταστροφές
- Η υποβάθμιση του ορεινού χώρου λόγω της απόπλυσης του εδάφους, γνωστής «εδαφοραγίας».

1.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΤΑΜΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Από τα κατακρημνίσματα, που πέφτουν στην επιφάνεια της γης, ότι δεν διεισδύει στο εσωτερικό της και δεν εξατμίζεται προς την ατμόσφαιρα, ρέει ακολουθώντας την οδό της μέγιστης κλίσης και των μικρότερων εμποδίων.

Με τη συγκέντρωση των υδάτων της επιφανειακής απορροής δημιουργούνται αρχικά υδάτινα νάματα, τα οποία συνενώνονται και σχηματίζουν υδατοφλέβες. Με την ίδια διαδικασία σχηματίζονται στην συνέχεια ρυάκια, ρυάκες και τέλος μεγαλύτερα υδατικά ρεύματα. Η υδρολογία διακρίνει τα υδάτινα ρεύματα σε μεγάλους ποταμούς, όπως ο Αμαζόνιος, ο Δούναβης κτλ, σε ποταμούς όπως ο Αξιός, ο Έβρος κτλ., σε χειμαρροποταμούς όπως ο Αλφειός, ο Αχέροντας κτλ., και τέλος σε χειμάρρους όπως ο Ξηρόλακκας Βελβενδού, ο Δενδροπόταμος Θεσ/νίκης κτλ. (Παπαπέτρου – Ζαμάνη, 1995).

Οι ποταμοί ρέουν κατά κανόνα σε ευρείες κοιλάδες, έχουν μεγάλη λεκάνη απορροής (μεγαλύτερη από 1500 - 2000 Km²), πλατιά κοίτη, μεγάλη παροχή, με σχετικά σταθερή διαίτα, μικρή κλίση πυθμένα και δημιουργούν παρατεταμένες πλημμύρες. Στη λεκάνη τους κυριαρχούν τμήματα με ημιπεδινή, λοφώδη και ημιορεινή διαμόρφωση.

Οι χείμαρροι ρέουν σε πολύ μικρές κοιλάδες και σε χαράδρες, έχουν μικρή λεκάνη απορροής (έκταση ορεινής λεκάνης έως 300 km²) και κλίση σχετικά έντονη, στενή κοίτη με σημαντική κλίση πυθμένα, μικρή σχετικά υδατοπαροχή, ανώμαλη διαίτα και δημιουργούν αιφνίδιες και σύντομες πλημμύρες. Στις λεκάνες τους κυριαρχούν τμήματα με ημιορεινή, ορεινή και πολύ ορεινή διαμόρφωση.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις της υδατοπαροχής που χαρακτηρίζουν τους χειμάρρους, σε αντίθεση με τους ποταμούς, διαπιστώνονται από το λόγο των μέσων υδάτων (Q_m) προς τα πλημμυρικά ύδατα (Q_{max}). Στη χώρα μας μεγάλη διακύμανση της υδατοπαροχής εμφανίζουν έκτος από τους χειμάρρους και οι χειμαρροποταμοί ακόμα και οι ποταμοί. Τόσο οι ποταμοί όσο και οι χείμαρροι μπορούν να μεταφέρουν στερεά υλικά (φερτές ύλες). Οι κοίτες των ποταμών όμως τροφοδοτούνται με υλικά τα οποία προέρχονται κυρίως από τους χειμάρρους που εκβάλλουν σ' αυτές, ενώ οι κοίτες των χειμάρρων εμπλουτίζονται με φερτές ύλες, που αποσπώνται από τις γύρω περιοχές, καθώς και από τα πρηνή και τον πυθμένα της κοίτης τους. Γι' αυτό, τα υλικά των κεντρικών κοιτών των ποταμών είναι κυρίως ετερόχθονα, ενώ των χειμάρρων αυτόχθονα.

Οι χείμαρροι έχουν μια χαρακτηριστική χειμαρρική ιδιότητα (Κωτούλας, 2001):

A) Εμφανίζουν αιφνίδιες, έντονες, μικρής διάρκειας πλημμύρες, ενώ κατά το λοιπό χρόνο παρουσιάζουν ελάχιστες (ή και μηδενικές) παροχές.

B) Αποσπούν, μεταφέρουν και αποθέτουν φερτές ύλες (ιδίως αδρομερή υλικά) στο χώρο δράσης τους.

Είναι απαραίτητο σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε τους έξης ορισμούς:

Χειμαρρικά ή χειμαρρώδη καλούνται τα φυσικά ρεύματα (ορεινοί ποταμοί, χειμαρροποταμοί, χείμαρροι) με έκταση λεκάνης απορροής έως 1500-2000 km² τα οποία εμφανίζουν έντονη χειμαρρικότητα, κυρίως λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων και άλλων διαταραχών στο φυσικό περιβάλλον του χώρου δράσης τους, η οποία εκφράζεται με τη μεταφορά σημαντικής ποσότητας φερτών υλών και με την ανώμαλη διαίτα του νερού.

Ως μικρά χειμαρρώδη ρεύματα χαρακτηρίζονται τα φυσικά ρεύματα με έκταση ορεινής λεκάνης έως 300 km², τα οποία αποτελούν τους συμβάλλοντες των χειμαρροποτάμων και ποταμών ή εμφανίζονται και ως αυτοτελείς μονάδες του υδρογραφικού δικτύου, παρουσιάζουν ιδιαίτερα ανώμαλη διαίτα νερού και

αποσπούν από τα ορεινά, μεταφέρουν και αποθέτουν στα πεδινά σχετικά άφθονες φερτές ύλες κατά κανόνα λόγω διαταραχής του φυσικού περιβάλλοντος από ανθρωπογενείς επιδράσεις.

1.2.1. Διάρθρωση Χειμαρρικών Ρευμάτων

Κάθε χειμαρρικό ρεύμα διαθέτει ένα χώρο χειμαρρικής δράσης ή χειμαρρικό χώρο, στον οποίο εξελίσσονται τα φαινόμενα της υδατοαπορροής και της διακίνησης (παραγωγής, μεταφοράς, απόθεσης) φερτών υλών. Αυτός αρχίζει από τα πιο απομακρυσμένα τμήματα των γήινων εξάρσεων που τον περιβάλλουν, τα οποία τροφοδοτούν με νερά την κεντρική κοίτη του ρεύματος και περατώνεται στη θέση εκβολής του στο μεγαλύτερο φυσικό αποδέκτη (ποταμό, λίμνη, θάλασσα) ή ακόμα στο αποχετευτικό δίκτυο μιας πόλης (Παπαπέτρου – Ζαμάνη, 1995).

Η επιφάνεια της χερσαίας γης που τροφοδοτεί ένα χειμαρρικό ρεύμα με νερό και φερτά υλικά, αποτελεί τη λεκάνη απορροής ή συλλεκτήρα ή υδρολογική λεκάνη του. Η περίμετρος της καθορίζεται από τη γραμμή του υδροκρίτη που την περιβάλλει. Η λεκάνη απορροής ενός ρεύματος από το υψηλότερο σημείο του χειμαρρικού χώρου μέχρι την εκβολή του στον τελικό αποδέκτη (ποταμό, λίμνη, θάλασσα) χαρακτηρίζεται ως συνολική. Κάθε συνολική λεκάνη απορροής διακρίνεται σε δύο τμήματα (Κωτούλας, 2001):

1) Ορεινή λεκάνη απορροής, η οποία περιλαμβάνει την ορεινή περιοχή του χειμαρρικού χώρου.

2) Πεδινή λεκάνη απορροής, η οποία εκτείνεται από την έξοδο του ρεύματος στη πεδινή περιοχή μέχρι την εκβολή του στον αποδέκτη.

Η πεδινή έκταση, την οποία επηρεάζει το χειμαρρικό ρεύμα με τη δράση του και ιδίως με την απόθεση φερτών υλικών, αποτελεί το ριπίδιο.

Επομένως, τα ριπίδια διαμορφώνουν το πεδινό τμήμα του χειμαρρικού χώρου. Επειδή δε η επιφάνεια των ριπιδίων είναι συνήθως κυρτή λόγω της απόθεσης φερτών υλών, η έκταση τους μπορεί να είναι μεγαλύτερη εκείνης της πεδινής λεκάνης απορροής του ρεύματος. Τέλος ως δέλτα χαρακτηρίζονται οι αποθέσεις, που σχηματίζουν τα χειμαρρικά ρεύματα εντός των λιμνών και των θαλασσών στις θέσεις εκβολής τους. Στις διευθετήσεις χειμαρρικών ρευμάτων ενδιαφέρουν κυρίως οι οριακές (επιφανειακές) αποθέσεις. Αυτές είναι συνήθως το κατώτερο μέρος του χειμαρρικού ριπιδίου ή του κώνου πρόσχωσης. Το μέγεθος

των λεκανών απορροής και των ριπιδίων εκφράζεται με την έκταση τους σε οριζόντια προβολή.

Η υψομετρική διαμόρφωση του χειμαρρικού χώρου ασκεί ιδιαίτερη επίδραση στη μορφολογία και γενικότερα στο χαρακτήρα των μικρών χειμαρρικών ρευμάτων. Με βάση το μέγιστο χειμαρρικό υψόμετρο της λεκάνης απορροής διακρίνονται οι εξής γενικές χειμαρρικές υψομετρικές κατηγορίες των μικρών χειμαρρικών ρευμάτων:

- Ρεύματα των λοφωδών και ημιορεινών περιοχών με μέγιστο υπερθαλάσσιο ύψος έως 1000 m
- Ρεύματα των ορεινών και πολύ ορεινών περιοχών με μέγιστο υπερθαλάσσιο ύψος από 1001 έως 2000 m
- Ρεύματα των αλπικών περιοχών με μέγιστο υπερθαλάσσιο ύψος από 2000 έως 3000 m
- Ρεύματα του αιωνίου χιονιού με μέγιστο υπερθαλάσσιο ύψος μεγαλύτερο από 3000 m

1.3. ΠΟΤΑΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΟΗΣ

Ένα άλλο κριτήριο ταξινόμησης των ποταμών είναι η διάρκεια ροής του νερού. Πιο συγκεκριμένα, ποτάμια συστήματα χαρακτηρίζονται ως συνεχή (perennial) όταν ρέουν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και διαλείπουσας ροής (intermittent) όταν διακόπτουν τη ροή τους κάποια χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια του έτους. Σύμφωνα επίσης με τους Uys και O'Keeffe (1997), τα ποτάμια κατηγοριοποιούνται ως προς τη διάρκεια ροής τους στους εξής τύπους:

1. *Συνεχή (Perennial)*: Ποτάμια τα οποία ρέουν συνεχώς.
2. *Διαλείπουσας ροής (Intermittent, Temporary)*: Όταν η ροή παραμένει για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του έτους, και
3. *Επεισοδικά - Εφήμερα (Episodic, Ephemeral)*: Όταν η ροή εκλείπει από το ποτάμι για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του υδρολογικού έτους ή εμφανίζεται κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων.

Σήμερα περίπου το 40% της χερσαίας επιφάνειας της Ευρώπης καλύπτεται από λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής. Το ποσοστό των χερσαίων εκτάσεων της νότιας Ευρώπης που καλύπτονται από ποτάμια

διαλείπουσας ροής θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια λόγω των μεγάλων κλιματικών αλλαγών. Μέχρι το 2030 το 30% της κερσαίας έκτασης της Νότιας Ευρώπης θα καλύπτεται από ποτάμια διαλείπουσας ροής, που ισοδυναμεί με αύξηση της τάξεως του 4% από τη σημερινή κατάσταση, ενώ για την Ελλάδα προβλέπεται αύξηση μόνο 1% (Τζωράκη, 2007).

1.4. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

Οι πλημμύρες είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά φυσικά φαινόμενα που απασχολούν και προβληματίζουν τον άνθρωπο από το παρελθόν και συνεχίζουν μέχρι σήμερα. Έχουν γίνει πολλές μελέτες και έρευνες για τον καθορισμό του φαινομένου, των παραμέτρων που το προκαλούν, των συνεπειών που έχει τόσο στους ανθρώπους όσο και στις ιδιοκτησίες τους και τέλος, των τρόπων με τους οποίους μπορούν να αντιμετωπιστούν και να προληφθούν, αν είναι αυτό δυνατό. Παρά τη σημαντική πρόοδο σ' αυτόν τον τομέα, το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί και αυτό όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά σε παγκόσμια κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, στην Ευρώπη, περισσότεροι από 10 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές κατά μήκος του ποταμού Ρήνου, περιοχές με πολύ υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο (Ε.Ο.Π., 2005). Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα που δεν μπορούν να αποτραπούν. Εντούτοις, η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων και των δυσμενών επιδράσεων τους. Η κλίμακα και η συχνότητα των πλημμυρών είναι πιθανό να αυξηθούν λόγω της αλλαγής του κλίματος, που θα επιφέρει υψηλότερη ένταση βροχοπτώσεων και αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Επίσης η μη ορθή σε πολλές περιπτώσεις διαχείριση των λεκανών απορροής δημιουργούν προβλήματα στην ομαλή διόδευση των πλημμυρών. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των ανθρώπων και των περιουσιών που βρίσκονται στις ζώνες υψηλού κινδύνου πλημμυρών συνεχίζει να αυξάνεται (Ε.Ε.Α., 2007). Πολλά κράτη μέλη λαμβάνουν ήδη μέτρα προστασίας κατά των πλημμυρών, αλλά η συντονισμένη δράση σε επίπεδο Κοινότητας θα έφερνε καλύτερα συνολικά αποτελέσματα και θα βελτιώνε το γενικό επίπεδο προστασίας κατά των πλημμυρών.

1.4.1. Ορισμός της πλημμύρας

Με τον όρο πλημμύρα εννοούμε γενικά την ανεξέλεγκτη κατάκλυση μίας περιοχής από νερό, που μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εξόδου του νερού ενός

υδατορέματος από τη φυσική ή τεχνητή κοίτη του και η κατάκλυση των παρακειμένων περιοχών. Συνεπώς, πλημμύρα δημιουργείται είτε: α) με την αύξηση της υδατοπαροχής, είτε: β) με τη μείωση της διατομής της κοίτης (Σακκάς, 2004). Πλημμύρες επίσης συμβαίνουν όταν η στάθμη του νερού στις λίμνες, στις δεξαμενές και τα υδροφόρα στρώματα υπερβαίνει κάποιες κρίσιμες τιμές και πλημμυρίζει ο παρακείμενος χώρος ή όταν η θάλασσα «φουσκώνει» στις παράκτιες περιοχές πολύ πιο πάνω από τη μέση στάθμη της. Ο συνηθέστερος και κυριότερος όμως λόγος για τον οποίο συμβαίνει μια πλημμύρα είναι οι ξαφνικές ραγδαίες βροχοπτώσεις με πολύ μεγάλη ένταση, κατά τις οποίες οι κοίτες των ποταμών - χειμάρρων ξεχειλίζουν, καθώς το έδαφος δεν είναι σε θέση να απορροφήσει τέτοιες ποσότητες νερού τόσο γρήγορα. Για την επιστήμη της Υδρολογίας, η έννοια της πλημμύρας είναι λίγο διαφορετική και έχει να κάνει απλά με τη σχετικά μεγαλύτερη παροχή σε ένα υδατόρευμα. Σαν φυσικό φαινόμενο η πλημμύρα είναι ένα δυναμικό, βίαιο φαινόμενο, εξαιρετικά επικίνδυνο και καταστρεπτικό, που εμφανίζεται γενικά απρόβλεπτα και που αφήνει ελάχιστα χρονικά περιθώρια για να μπορέσει να εκδηλώσει κανείς κάποια αντίδραση για την αντιμετώπισή του. Στον ελληνικό χώρο εμφανίζεται μόνο τοπικά και έχει μικρή διάρκεια. Το κρίσιμο ερώτημα είναι το πώς θα αποφευχθούν οι ακραίες πλημμυρικές παροχές να μετατραπούν σε πλημμύρα, σε συνδυασμό πάντα με τις αλλαγές που επιφέρει η ανάπτυξη μίας περιοχής (Στάθης, 2004).

1.5. ΟΙ ΑΙΤΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΚΑΙ Η ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΥΤΩΝ

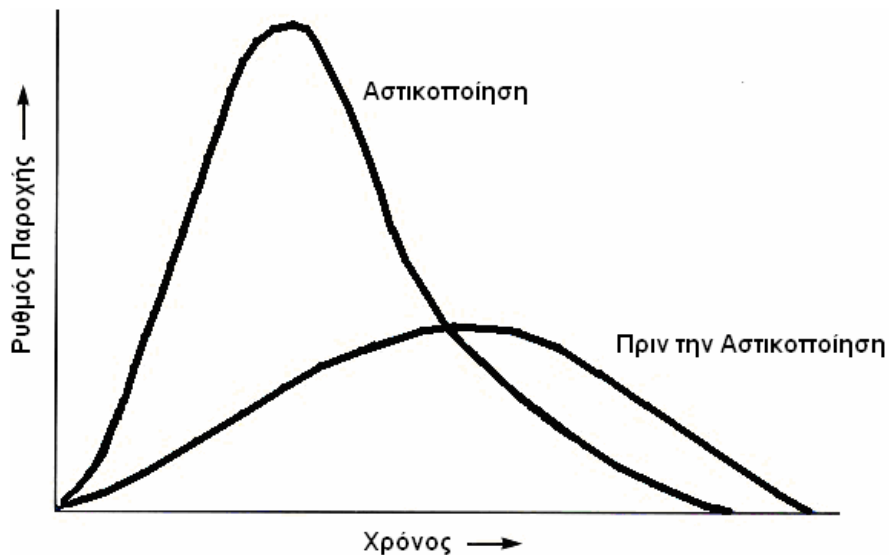
Τα τελευταία τριάντα χρόνια τα πλημμυρικά φαινόμενα και οι εξ αυτών απειλές, ζημιές και καταστροφές σε περιουσίες, έργα και ανθρώπινες ζωές ενισχύονται από τις κάθε είδους ανθρώπινες επεμβάσεις (π.χ. ευθυγραμμίσεις κοίτης, απορρίψεις μπαζών και σκουπιδιών στις κοίτες, χαμηλές και στενές γέφυρες, παράνομη επέκταση της καλλιεργούμενης γης προς τις κοίτες, απουσία έργων ορεινής υδρονομίας και συντήρησης των διαβρωμένων κοιτών, αποκομιδή αδρανών υλικών με άναρχο και επικίνδυνο τρόπο). Το σημαντικό είναι ότι ο σχεδιασμός έργων αντιπλημμυρικής προστασίας οφείλει να αρχίζει από τα ανάντη και να επεκτείνεται μέχρι και την παράκτια ζώνη. Επιπλέον, ο σχεδιασμός των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας πρέπει να βασίζεται σε μελέτη με πραγματικά δεδομένα των μηχανισμών απορροής και κυρίως σε

υδρομετεωρολογικά δεδομένα (βροχοπτώσεις, παροχές κ.λ.π) επί μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να περιλαμβάνει συνήθειες και ακραίες συνθήκες (Best Practices on Flood Prevention, Protection and Mitigation, 2003).

Γενικά, τα αίτια των πλημμυρών είναι πολλά, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι (Μιμίκου, 1994):

1. Η αστική ανάπτυξη που έχει ως αποτέλεσμα τη στεγανοποίηση της επιφάνειας της γης.
2. Η πλήρης κάλυψη των κοιτών των χειμάρρων.
3. Η αντιπλημμυρική προστασία γίνεται από τις πεδινές περιοχές προς τα ανάντη.
4. Ο εγκιβωτισμός της κοίτης.
5. Οι διαστάσεις και το μικρό ύψος των γεφυρών.
6. Η περιοδικότητα του πλημμυρικού φαινομένου, που μπορεί να διακριθεί σε μικρής και μεγαλύτερης διάρκειας.
7. Η αποψίλωση των δασών από πυρκαγιές ή άλλα αίτια και η επακόλουθη διάβρωση.
8. Η κατασκευή μεγάλων έργων, κυρίως οδικών, εγκάρσια προς την κοίτη, ιδιαίτερα σε περιοχές που δεν υπάρχει εμφανής διατομή της.
9. Οι καθιζήσεις που παρατηρούνται σε πεδινές περιοχές λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων π.χ. λόγω υπεραντλήσεων.
10. Αλλαγή ή εκτροπή κοίτης.

Στην Εικόνα 1.1, φαίνεται ένα χαρακτηριστικό υδρογράφημα ενός αστικού ρέματος κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Σύμφωνα με την Εικόνα, οι μέγιστες ροές των αστικοποιημένων ρεμάτων εμφανίζονται νωρίτερα και είναι πολύ υψηλότερες από τα ρέματα στα οποία δεν έχει παρέμβει ο ανθρώπινος παράγοντας. Η υποχώρηση της ροής μετά από καταιγίδα είναι επίσης γρηγορότερη. Αυτή η αύξηση στην αποφόρτιση προκαλεί επίσης τη διάβρωση των πυθμένων των ρεμάτων λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων ροής (Λυκοκανέλλος, 2003).



Εικόνα 1. 1. Αποτελέσματα της αστικοποίησης στον όγκο και το ποσό της απορροής.

Η βασική φιλοσοφία αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων που είχε επικρατήσει πριν μερικές δεκαετίες, βασιζόταν στο σχεδιασμό τεχνικών έργων που είτε συγκρατούν τον πλημμυρικό όγκο των υδάτων μακριά από την πόλη (αντιπλημμυρικά φράγματα ανάντη) είτε απομακρύνουν τα πλημμυρικά νερά όσο το δυνατόν πιο γρήγορα έξω από αυτή (εκτροπές και διευθετήσεις χειμάρρων). Οι λύσεις αυτές εκτός του ότι είναι αντισοικονομικές, δε βρίσκονται προς την πλευρά της ασφάλειας, αφενός λόγω του μεγάλου όγκου των στερεομεταφορών, που προσκάνουν σταδιακά τα φράγματα και αφετέρου λόγω της μελλοντικής επέκτασης των πόλεων που ενσωματώνουν τους χείμαρρους (Στεφανίδης, 1995).

Οι σύγχρονες λύσεις που προτείνονται βασίζονται στη δυνατότητα μείωσης των πλημμυρικών αιχμών στις φυσικές λεκάνες απορροής, με τις κατάλληλες ορεινές διευθετήσεις και την εκτόνωση των πλημμυρικών αιχμών σε ειδικά διαρρυθμισμένες ζώνες μέσα στην πόλη ή στην περιφέρεια των πόλεων (λεκάνες εκτόνωσης πλημμυρικών αιχμών). Οι λεκάνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν χώροι πρασίνου η αναψυχής και οπωσδήποτε προσφέρουν πρόσθετη ασφάλεια σε περιπτώσεις μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων (Στάθης 2004).

1.6. ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ (FLASH FLOOD)

1.6.1. Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των στιγμιαίων πλημμυρών

Ως στιγμιαία πλημμύρα ορίζεται η πλημμύρα η οποία συμβαίνει πολύ ξαφνικά, είναι συνήθως δύσκολο να προβλεφθεί, ο χρόνος μέχρι το σημείο αιχμής είναι πολύ σύντομος (συνήθως λίγες μόνο ώρες) και η απορροή γι' αυτόν το χρόνο είναι σημαντική (Chow et al., 1988). Οι στιγμιαίες πλημμύρες γενικά δημιουργούνται από βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης σε σύντομο χρονικό διάστημα που συνήθως συμβαίνουν σε λεκάνες απορροής μετρίου μεγέθους ή λεκάνες απορροής με μικρούς υδροφορείς. Είναι φανερό ότι η φυσιογραφία της λεκάνης απορροής και ειδικότερα οι κλίσεις και οι χρήσεις γης έχουν μεγάλη επίδραση στην ικανότητά της να προκαλεί τέτοιου είδους πλημμύρες. Μία λεκάνη απορροής γενικά συμπεριφέρεται σαν ένα φίλτρο μεταξύ της βροχόπτωσης και της απορροής. Τα χαρακτηριστικά αυτού του φίλτρου εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως είναι το μέγεθος, η κλίση, το έδαφος και ο βαθμός της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι στιγμιαίες πλημμύρες μπορούν να είναι εξαιρετικά επικίνδυνες. Τέτοιες πλημμύρες δημιουργούνται ταχύτατα λόγω των έντονων βροχοπτώσεων και της αδυναμίας του εδάφους να απορροφήσει τις ποσότητες του νερού, με συνέπεια να έχουμε υψηλή επιφανειακή απορροή. Τα γεγονότα είναι γενικά τοπικά έντονα και οι ζημιές συνήθως εντοπίζονται σε μια μικρή περιοχή. Οι μεγάλοι ποταμοί παραμένουν απρόσβλητοι, ενώ τα μικρότερα ποτάμια ή χειμαρροί μπορούν να πλημμυρίσουν, ακόμη και σε ένα ξηρό έτος (Στεφανίδης, 1995).

Ενώ έχουν γίνει πολλές επιστημονικές έρευνες και μελέτες για τις πλημμύρες γενικότερα, τα επεισόδια των στιγμιαίων πλημμυρών έχουν περάσει σχεδόν απαρατήρητα στον Ελλαδικό χώρο. Το γεγονός αυτό είναι αξιοπερίεργο γιατί η κατηγορία των πλημμυρών που πλήττει τα τελευταία χρόνια τη χώρα μας, με καταστρεπτικές συνέπειες είναι οι στιγμιαίες πλημμύρες. Έτσι, για τη μελέτη του φαινομένου και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του είναι πολλές φορές αναγκαία η προσφυγή σε έρευνες που έχουν γίνει από άλλες χώρες όπως τις Η.Π.Α. ή τη Δυτική Ευρώπη (Τσιτσιλώνης, 2008).

1.7. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

Η πλημμύρα ορίζεται εύκολα ποσοτικά με βάση κάποιο όριο παροχής ή στάθμης, η υπέρβαση του οποίου συνιστά “πλημμύρα” αν αναφερόμαστε σε

υδατόρευμα. Μια τέτοια παροχή μπορεί να προκαλέσει υπερχειλίση της κοίτης του υδατορεύματος ή ανεπιθύμητη κατάκλιση κάποιας περιοχής κοντά στο υδατόρευμα. Η κύρια παράμετρος που χαρακτηρίζει τη δημιουργία του φαινόμενου της πλημμύρας είναι οι υψηλές παροχές ή ο υπερβολικός όγκος νερού. Η πλημμύρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα βίαιο φαινόμενο σχετικά μικρής διάρκειας και συνήθως τοπικού χαρακτήρα. Προκειμένου να προβλεφθεί και να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ένα τέτοιο φαινόμενο είναι απαραίτητη η στατιστική ανάλυση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης και η μετέπειτα χρήση υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων προσομοίωσης. (Σακκάς, 1992). Έτσι το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της πλημμυρικής αιχμής αφορά την ανάλυση των χρονικών και χωρικών κατανομών των βροχοπτώσεων. Οι προκύπτουσες χρονοσειρές βροχόπτωσης (είτε ως μετρήσεις είτε βασιζόμενες σε μια στατιστική ή υδρομετεωρολογική ανάλυση) μετασχηματίζονται έπειτα σε πλημμυρικές αιχμές ή σε υδρογραφήματα. Η παραπάνω τεχνική θα μπορούσε να βασιστεί: α) στην απλή εφαρμογή μιας εμπειρικής εξίσωσης χρησιμοποιώντας την κατακρήμνιση ως δεδομένο εισόδου για τη λήψη της μέγιστης εκροής ή β) στην πιο σύνθετη εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου σε επίπεδο λεκάνης απορροής για την προσομοίωση της πλήρους φυσικής διαδικασίας της μετατροπής των βροχοπτώσεων σε απορροή (Chow et al., 1988).

Με βάση τη προσομοίωση των πλημμυρικών φαινομένων, σε επίπεδο λεκάνης απορροής, για κάθε περιοχή με μεγάλη πλημμυρική επικινδυνότητα και εκεί που απειλούνται ανθρώπινες ζωές, θα μπορούσαν να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την αντιμετώπιση ή τον περιορισμό του προβλήματος. Τα μέτρα αυτά πρέπει να περιλαμβάνουν όλα εκείνα τα έργα - κατασκευές, για την τροποποίηση των πλημμυρικών αιχμών με τη μείωση μιας ή περισσότερων υδραυλικών παραμέτρων (όπως η αιχμή της πλημμύρας, ο χρόνος ανόδου και η διάρκεια αυτής). Επίσης, για κάθε αλλαγή χρήσης γης στο χώρο των λεκανών ή στις επεκτάσεις των πόλεων, η μοντελοποίηση – προσομοίωση των πλημμυρών θα προβλέπει την κατασκευή των αναγκαίων αντιπλημμυρικών έργων για τις νέες υδρολογικές συνθήκες των λεκανών απορροής (Στάθης, 2004)

1.8. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΑΙΑ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Ένα καιρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως ακραίο είτε από την ένταση του, είτε από τη διάρκεια του ή και από τη συχνότητα επανεμφάνισής του. Η

σχέση ένταση - διάρκεια - συχνότητα χαρακτηρίζουν ένα εκδηλωθέν ακραίο καιρικό φαινόμενο το οποίο είναι δυνατόν με τη σειρά του να προκάλεσε μια εκτεταμένη φυσική καταστροφή. Γενικά μεγάλης κλίμακας ακραία καιρικά φαινόμενα δεν λαμβάνουν χώρα τόσο συχνά ώστε να θεωρούνται ως τα σημαντικότερα, ενώ τα ακραία καιρικά φαινόμενα μικρής κλίμακας είναι συχνότερα, προκαλώντας καταστροφές σε μικρές περιοχές του πλανήτη. Οι συνέπειες ενός ακραίου καιρικού φαινομένου υπολογίζονται από τη σχέση της έντασης του συγκεκριμένου φαινομένου με τη συχνότητα επανεμφάνισης του στην ίδια περιοχή. Αντικειμενικά είναι πολύ δύσκολο να ορισθεί μία τιμή μεγέθους πάνω από την οποία ένα καιρικό φαινόμενο θα μπορεί να χαρακτηρίζεται ως ακραίο και αυτό γιατί στο χαρακτηρισμό ενός φαινομένου ως ακραίο συνηγορούν πολύ παράγοντες. Σε πολλές περιπτώσεις ο χαρακτηρισμός ενός καιρικού φαινομένου ως ακραίο είναι αποτέλεσμα των καταστροφών ή ακόμη και των θανάτων που προκάλεσε σε μία περιοχή (Svensmark Henrik & Nigel Calder, 2008).

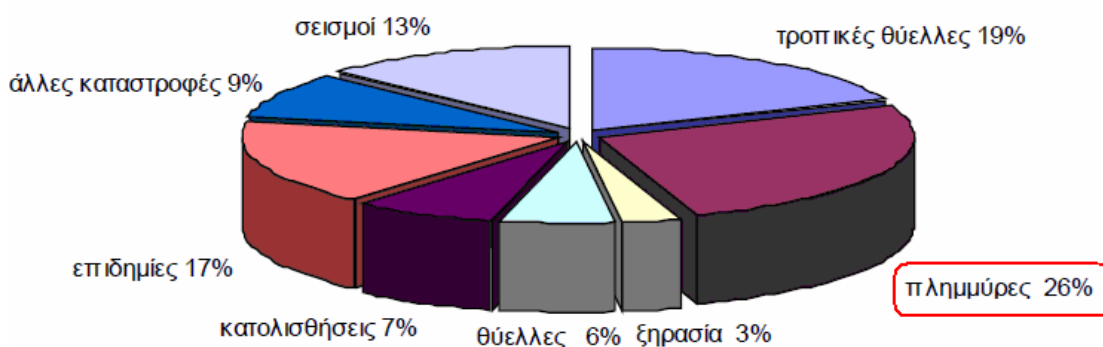
Κατά τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσονται πολλές θεωρίες οι οποίες υποστηρίζουν ότι η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος συχνά οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα και καταστροφές. Σε χρονική κλίμακα ημερών, μηνών ή ακόμα και ετών, μπορεί να εμφανίζονται κύματα καύσωνα, πλημμύρες, έντονες καταιγίδες και άλλα ακραία φαινόμενα λόγω της φυσικής διακύμανσης του καιρού και του κλίματος. Ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο αποτελεί μια κατάσταση που απέχει σημαντικά από την κανονική - φυσιολογική μορφή του κλιματικού συστήματος, ανεξάρτητα από την πραγματική επίδραση στη ζωή ή στην οικολογία της γης (European Environmental Agency, 2003).

Η αναμενόμενη κλιματική αλλαγή κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα θα επηρεάσει τον υδρολογικό κύκλο, με τις βροχοπτώσεις σε μερικές περιοχές να γίνονται μικρότερες μεν σε διάρκεια αλλά εντονότερες, ενώ σε άλλες περιοχές οι ξηρές περίοδοι θα αυξηθούν περισσότερο σε διάρκεια. Ένα άλλο αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής θα είναι ο κίνδυνος συχνότερων, και ενδεχομένως περισσότερο έντονων θυελλών ή άλλων ακραίων καιρικών γεγονότων (E.E.A., 2007). Σύμφωνα με το Διεθνές Συμβούλιο για τον υδάτινο πλούτο, δισεκατομμύρια άνθρωποι θα βρεθούν σε μεγάλο κίνδυνο από θύελλες, πλημμύρες και ξηρασίες στα επόμενα χρόνια. Επίσης μέχρι το 2025, ο μισός παγκόσμιος πληθυσμός θα ζει σε επικίνδυνες περιοχές για διάφορα ακραία

καιρικά φαινόμενα, σύμφωνα με στοιχεία των Ηνωμένων Εθνών (United Nations and Economic Commission, 2000).

Το οικονομικό κόστος των ακραίων καιρικών φαινομένων και των πλημμυρών είναι αρκετά μεγάλο και θεωρείται ότι θα αυξηθεί, με το μεγαλύτερο οικονομικό βάρος να το επωμίζονται τα φτωχότερα έθνη. Από το 1971 έως το 1995, οι πλημμύρες είχαν επιπτώσεις σε περισσότερους από 1,5 δισεκατομμύριο ανθρώπους (UNEP, 2004). Από αυτούς οι 318.000 σκοτώθηκαν και περισσότερο από 81 εκατομμύρια έμειναν άστεγοι. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο αριθμός των μεγάλων καταστροφών από πλημμυρικά φαινόμενα αυξάνεται σημαντικά, τα τελευταία 50 χρόνια πιο συγκεκριμένα είχαμε έξι στη δεκαετία του 50, επτά στη δεκαετία του 60, οκτώ σε αυτή του 70, 18 στη δεκαετία του 80 και 26 στη δεκαετία του 90. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2, σε σύγκριση με του τύπους των φυσικών καταστροφών οι πλημμύρες είναι η βασικότερη αιτία καταστροφής σε παγκόσμια κλίμακα.

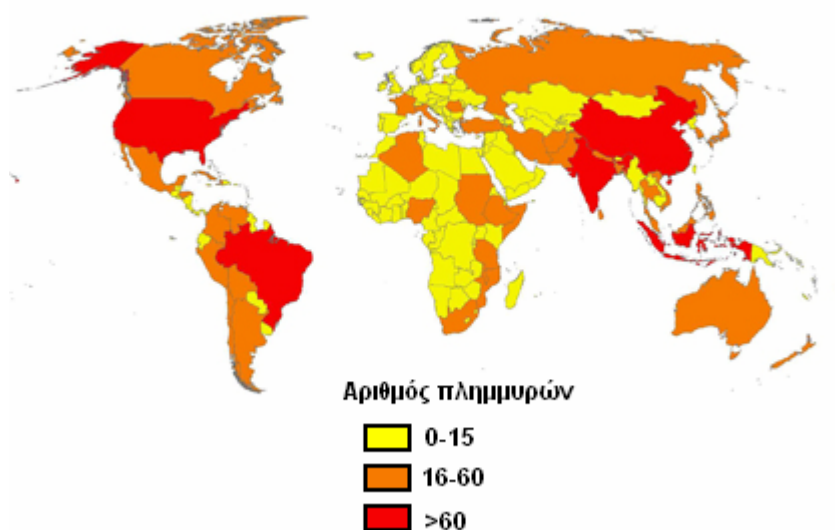
ΜΕΓΑΛΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ 1963 - 2003



Εικόνα 1. 2. Παγκόσμια κατανομή τύπου φυσικών καταστροφών κατά την περίοδο 1963-2003. (EM-DAT).

Επίσης στην Εικόνα 1.3, παρουσιάζεται, σε παγκόσμια κλίμακα, ο αριθμός των καταστροφικών πλημμυρικών φαινομένων που εμφανίστηκαν κατά την περίοδο μεταξύ των ετών 1974 έως 2003, για κάθε μια χώρα ξεχωριστά. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μεγαλύτερο αριθμό καταστροφικών πλημμυρών εμφανίζουν η Κίνα, η Ινδία καθώς επίσης και οι Η.Π.Α.

**Αριθμός καταστροφικών πλημμυρών ανα χώρα
1974-2003**



Εικόνα 1. 3. Παγκόσμια κατανομή καταστροφικών πλημμυρών κατά την περίοδο 1974-2003. (EM-DAT).

Στους παρακάτω Πίνακες 1.1 και 1.2, περιγράφονται οι 10 σημαντικότερες πλημμυρικές καταστροφές σε παγκόσμια κλίμακα για τη χρονική περίοδο (1900-2010), όσον αφορά τις οικονομικές ζημιές και τον αριθμό των ανθρώπινων απωλειών.

Πίνακας 1. 1. Οι δέκα σημαντικότερες πλημμυρικές καταστροφές για την περίοδο (1900 – 2010), όσον αφορά την οικονομική ζημιά.

Χώρα	Ημερομηνία	Ζημιά (US\$)
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	01/07/1998	30000000
Κορέα - Πλημμυρικό φαινόμενο	01/08/1995	15000000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	30/06/1996	12600000
USA - Πλημμυρικό φαινόμενο	24/06/1993	12000000
Γερμανία - Πλημμυρικό φαινόμενο	11/08/2002	11600000
USA - Πλημμυρικό φαινόμενο	09/06/2008	10000000
Ιταλία - Πλημμυρικό φαινόμενο	01/11/1994	9300000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	23/06/1999	8100000
Ιταλία - Στιγμαίο Πλημμυρικό φαινόμενο	14/10/2000	8000000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	23/06/2003	7890000

Πηγή: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database.

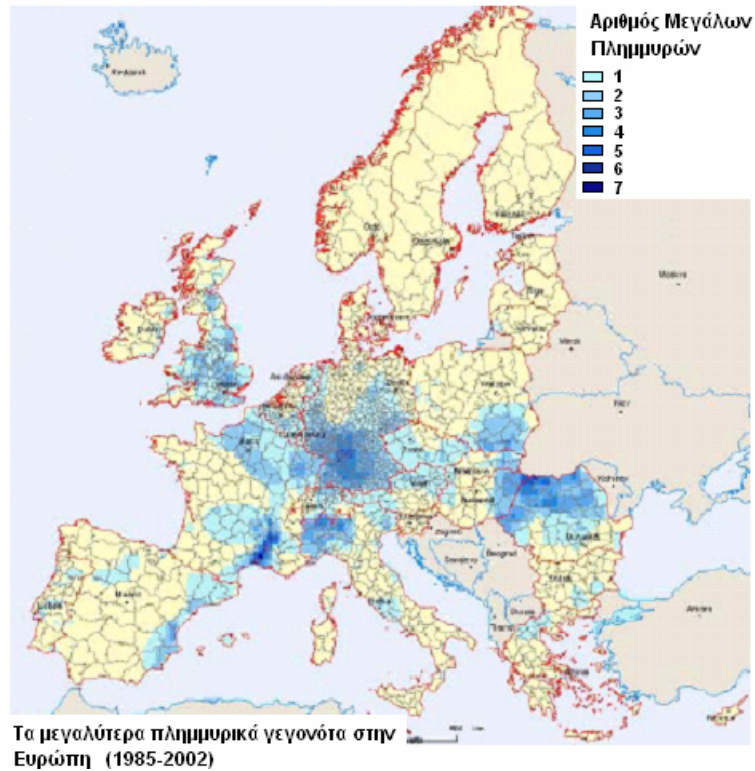
Πίνακας 1. 2. Οι δέκα σημαντικότερες πλημμυρικές καταστροφές για την περίοδο (1900 – 2010), όσον αφορά τον αριθμό νεκρών.

Χώρα	Ημερομηνία	Αριθμός Νεκρών
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Ιούλιος - 1931	3700000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Ιούλιος -1959	2000000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Ιούλιος - 1939	500000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	1935	142000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	1911	100000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Ιούλιος - 1949	57000
Γουατεμάλα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Οκτώβριος - 1949	40000
Κίνα - Πλημμυρικό φαινόμενο	Αύγουστος -1954	30000
Βενεζουέλα - Στιγμιαίο Πλημμυρικό φαινόμενο	15/12/1999	30000
Μπαγκλατές - Πλημμυρικό φαινόμενο	Ιούλιος -1974	28700

Πηγή: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database

Πιο συγκεκριμένα, η Ευρώπη μεταξύ 1998 και 2002 υπέστη πάνω από 100 σημαντικές καταστροφικές πλημμύρες. Από το 1998, οι πλημμύρες έχουν προκαλέσει περίπου 700 θανάτους, τη μετατόπιση περίπου μισού εκατομμυρίου ανθρώπων και τουλάχιστον 25 δισεκατομμύρια ευρώ σε οικονομικές απώλειες (European Environment Agency., 2007).

Στην Εικόνα 1.4, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των μεγαλύτερων πλημμυρικών γεγονότων που έγιναν στην Ευρώπη την περίοδο 1985-2002. Όπως βλέπουμε τα σημαντικότερα πλημμυρικά γεγονότα συνέβησαν στη βόριο-δυτική Ρουμανία, στη νότια -ανατολική Γαλλία, στην Αγγλία και την κεντρική και νοτιά Γερμανία (ESPON. <http://www.espon.eu/>).



Εικόνα 1. 4. Τα μεγαλύτερα πλημμυρικά γεγονότα που έγιναν στην Ευρώπη την περίοδο 1985-2002 (<http://www.espon.eu/main/>).

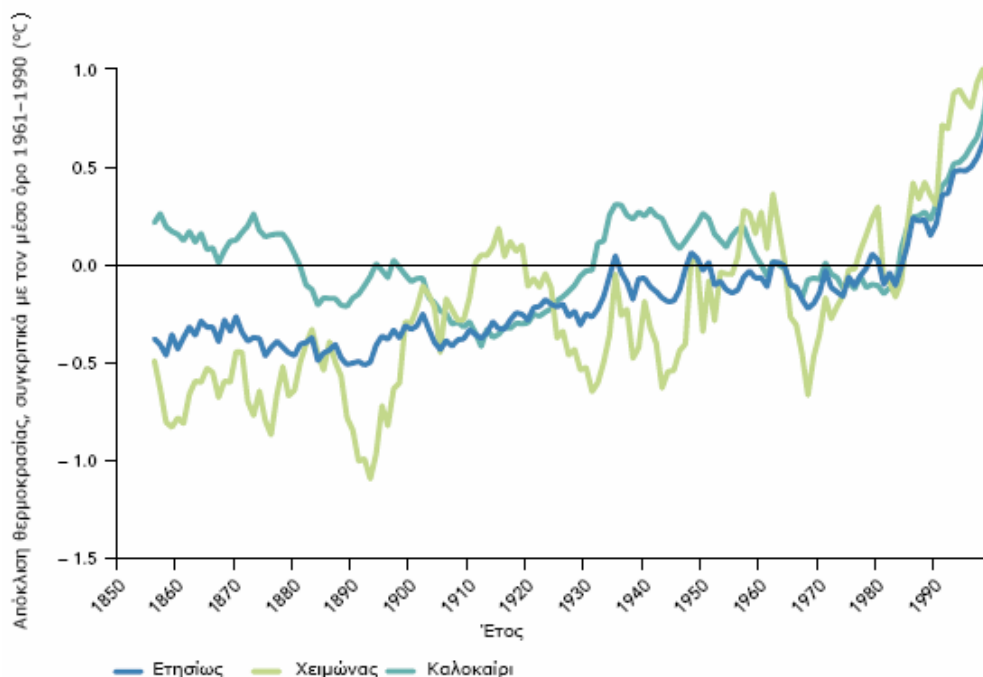
Χαρακτηριστικά στα μέσα Αυγούστου του 2002 πλημμυρικά φαινόμενα στην κεντρική και ανατολική Ευρώπη είχαν σαν αποτέλεσμα δεκάδες νεκρούς και εκατοντάδες χιλιάδες πρόσφυγες. Τα ιστορικά κέντρα της Πράγας και της Δρέσδης πλημμύρισαν από τα νερά των ποταμών (Εικόνα 1.5). Επίσης τα νερά του ποταμού Έλβα έφτασαν στο υψηλότερο επίπεδο από το 1845 (<http://natural-hazards.jrc.it>).



Εικόνα 1. 5. Πλημμυρικά φαινόμενα στα ιστορικά κέντρα της Πράγας και της Δρέσδης (Αύγουστος του 2002).

Η τελευταία έκθεση της ομάδας επιστημόνων του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή (IPCC) που δημοσιεύθηκε στις 7 Απριλίου 2007, έγραφε τα εξής: «Σχεδόν όλες οι περιοχές της Ευρώπης αναμένεται να επηρεαστούν αρνητικά από την κλιματική αλλαγή. Οι επιπτώσεις θα περιλαμβάνουν αυξημένο κίνδυνο στιγμιαίων πλημμυρών στην ενδοχώρα, πιο συχνές πλημμύρες στις ακτές και αυξημένη διάβρωση. Στη νότια Ευρώπη η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει τις συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες - ξηρασία) και να μειώσει τη διαθεσιμότητα του νερού, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, την αγροτική παραγωγή και να αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης στιγμιαίων πλημμυρικών φαινομένων» (E.E.A., 2007)

Στο παραπάνω συνηγορεί το γεγονός ότι σε πολλές περιοχές της Ευρώπης, η τάση για ακραίες βροχοπτώσεις είναι εντονότερη από το μέσο όρο. Αναλυτικότερα, από το 1976 μέχρι σήμερα έχει παρατηρηθεί αύξηση του αριθμού των ιδιαίτερα υγρών ημερών στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη και μείωση του σε τμήματα της Νότιας Ευρώπης. Επίσης η καταγραφόμενη αύξηση της συχνότητας των επεισοδίων έντονων βροχοπτώσεων οδηγεί στην αύξηση του κινδύνου πλημμυρών. Οι χειμερινές κατακρημνίσεις θα έχουν συχνότερα τη μορφή βροχής, ως αποτέλεσμα των υψηλότερων θερμοκρασιών (Εικόνα 1.6), γεγονός που θα οδηγήσει σε αύξηση της άμεσης απορροής των ποταμών και κατά επέκταση σε μεγαλύτερο κίνδυνο πλημμυρών. (ESPON. <http://www.espon.eu/>).



Εικόνα 1. 6. Ετήσιες, χειμερινές και καλοκαιρινές αποκλίσεις θερμοκρασίας στην Ευρώπη 1850–2000. (ESPON, The European Observation Network).

1.8.1. Κλιματικές αλλαγές και επίδραση τους στον Ελλαδικό χώρο

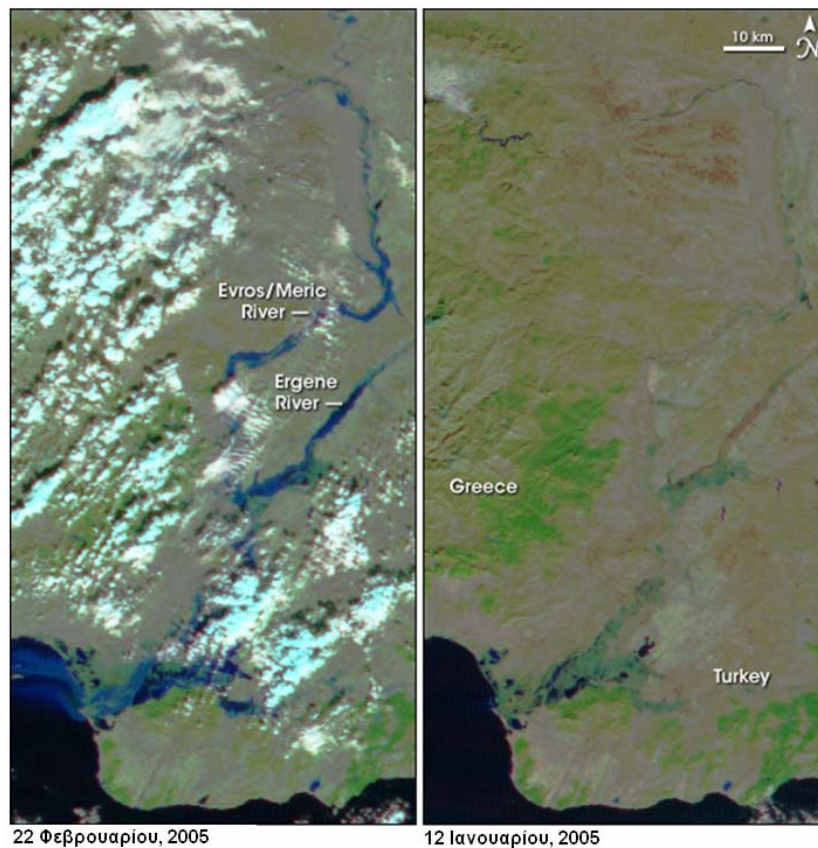
Τα τελευταία χρόνια το νερό, το βασικότερο αγαθό για την ύπαρξη ζωής και την οργάνωση της ανθρώπινης κοινωνίας είναι αγαθό σε ανεπάρκεια, όχι μόνο στη χώρα μας, αλλά και διεθνώς. Μεγάλες προσπάθειες καταβάλλονται για την ορθολογικότερη διαχείριση των περιορισμένων υδατικών πόρων, αλλά και της ανομοιόμορφης κατανομής τους στο χώρο και το χρόνο. Εξίσου σημαντικό πρόβλημα με την ανεπάρκεια του ύδατος (λειψυδρία), είναι και η περίσσεια αυτού (πλημμύρες) σε κάποιες περιπτώσεις.

Απρόσμενες και απρόβλεπτες ποσότητες ύδατος, οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν και να τιθασευτούν, συχνά έχουν καταστροφικές συνέπειες για την ισορροπία του περιβάλλοντος, την ανθρώπινη ζωή και την οικονομία. Το φαινόμενο της πλημμύρας αποτελεί μία από τις κύριες καταστροφές που με την πάροδο του χρόνου και την επίπτωση της μεταβολής του κλίματος, γίνεται ολοένα και εντονότερο. Η άνιση κατανομή των βροχοπτώσεων λόγω του μεσογειακού κλίματος της Ελλάδας έχει ως συνέπεια την εμφάνιση έντονων πλημμυρών, αλλά και έλλειμμα νερού την περίοδο που η ζήτηση αυτού παρουσιάζεται αυξημένη.

Οι δύο αντίθετες όψεις του καθεστώτος νερού στη Ελλάδα έχουν πολύ δυσμενή αποτελέσματα στον κοινωνικό και οικονομικό ιστό. Μία από τις γενεσιουργές αιτίες μιας πλημμύρας προφανώς είναι κάποια βροχόπτωση με μεγάλη ένταση και σχετικά μεγάλη διάρκεια. Στις μέρες μας όμως, ακόμη και μικρότερα επεισόδια βροχοπτώσεων, σε σχέση με το παρελθόν, οδηγούν σε εκδήλωση καταστροφικών πλημμυρών σε λεκάνες απορροής χειμαρρικών ρευμάτων λόγω των έντονων ανθρωπογενών επεμβάσεων. Για την Ελλάδα, σύμφωνα με έρευνες που αφορούν πιθανά κλιματολογικά σενάρια και τις συνέπειες αυτών στην απορροή, θα έχουμε (Μιμίκου, 2005): α) Αύξηση απορροής για ορισμένους χειμερινούς μήνες με αποτέλεσμα επιδείνωση της συχνότητας και δριμύτητας πλημμυρών. β) Αύξηση πλημμυρών αιχμών για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Έχουν γίνει πολλές μελέτες και έρευνες για τον καθορισμό του φαινομένου, των παραμέτρων που το προκαλούν, των συνεπειών του τόσο στους ανθρώπους όσο και στις ιδιοκτησίες τους και τέλος των τρόπων με τους οποίους μπορούν να αντιμετωπιστούν, αν είναι αυτό δυνατό. Παρά τη σημαντική πρόοδο σε αυτόν τον τομέα, το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί, και αυτό όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά σε παγκόσμια κλίμακα. Έτσι έντονα πλημμυρικά φαινόμενα έχουν πλήξει τα τελευταία χρόνια και τον Ελλαδικό χώρο. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει

να σταθούμε στις σημαντικές καταστροφές που προκλήθηκαν τον Ιούλιο του 2002 και το Φεβρουάριο του 2005. Στην παρακάτω δορυφορική εικόνα φαίνεται χαρακτηριστικά το πλημμυρικό γεγονός που έλαβε χώρα το Φεβρουάριο του 2005 στον Έβρο και δημιούργησε τεράστιες οικονομικές καταστροφές σε περιουσίες και καλλιέργειες [Εικόνα 1.7].



Εικόνα 1. 7. Δορυφορική εικόνα του πλημμυρικό γεγονός που έλαβε χώρα στις 22/2/2005 στον ποταμό Έβρο-Ενρος (<http://earthobservatory.nasa.gov/>).

1.9. ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

Τα τελευταία χρόνια με τις κλιματικές αλλαγές να γίνονται πιο έντονες αλλά και με τις αλλαγές στις πολιτικές που αφορούν τη χρήση γης, οι καταστροφικές πλημμύρες παρουσιάζουν μια μεγάλη αυξητική τάση, τόσο ως προς τη συχνότητα, όσο και ως προς τη σφοδρότητα. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών, είναι οι επιπτώσεις των πλημμυρών όχι μόνο να αυξάνονται, αλλά ταυτόχρονα να επηρεάζουν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο περισσότερες από μια χώρες. Έχει γίνει δε αντιληπτό ότι αυτές δεν περιορίζονται μόνο στον οικονομικό τομέα, αλλά αντίθετα επεκτείνονται τόσο στο περιβάλλον, όσο και στην κοινωνία. Η ανησυχία που προκάλεσαν οι διαπιστώσεις αυτές έθεσαν τις επιπτώσεις των πλημμυρών και την αντιμετώπισή τους σε νέες βάσεις. Ο νέος τρόπος διαχείρισης έρχεται και σε

συμφωνία με το γεγονός ότι οι επιπτώσεις των πλημμυρών δεν περιορίζονται σε ένα μόνο τομέα, επομένως δεν μπορούν και να αντιμετωπιστούν τμηματικά. Η άποψη αυτή ενισχύθηκε και με την Κοινοτική Οδηγία 2000/60/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για τους υδάτινους πόρους, που απαιτεί την ενιαία αποτίμηση τους, συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων πλημμύρας ή ξηρασίας.

1.9.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Φυσικές καταστροφές, όπως είναι οι πλημμύρες, έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που, ανάλογα με το γεγονός, μπορούν να επηρεάσουν περισσότερες από μια χώρες. Οι σφοδρές καταιγίδες για παράδειγμα μπορούν να αποβούν καταστροφικές για τα ενδιαφέροντα πολλών οργανισμών. Ως αποτέλεσμα της αλλοίωσης των ενδιαφεμάτων είναι η μη αναστρέψιμη, σε πολλές περιπτώσεις, απώλεια συγκεκριμένων ειδών από την τοπική χλωρίδα και πανίδα, που δεν μπορούν να επιβιώσουν μέσα στις νέες συνθήκες που διαμορφώνονται (Green et al., 2000).

Παράλληλα εκτός από τις επιπτώσεις στα ενδιαφέροντα, αλλά και στα οικοσυστήματα των περιοχών που πλημμυρίζουν, αρνητικές συνέπειες παρατηρούνται επίσης και στο έδαφος, μιας και κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας μετακινούνται μεγάλες ποσότητες τοξικών ουσιών, που εμποτίζουν τον υδροφόρο ορίζοντα και το υπέδαφος καθιστώντας παράλληλα μη αποδοτικές τις εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης στις γύρω περιοχές.

Τέτοια ακραία γεγονότα, όπως είναι οι καταστροφικές πλημμύρες, πολύ συχνά προκαλούν αλυσιδωτές αντιδράσεις (το γνωστό «φαινόμενο Ντόμινο»), που έχουν σαν αποτέλεσμα άλλες έμμεσες επιπτώσεις, όπως η διάβρωση του εδάφους είτε αποκλειστικά από τις πλημμύρες, είτε ύστερα από το συνδυασμό τους με άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως είναι οι κατολισθήσεις, όπως επίσης και οι επιπτώσεις σε περιοχές που αποτελούσαν παλιότερα δασικές εκτάσεις, αλλά καταστράφηκαν από πυρκαγιές και στη συνέχεια πλημμύρισαν μιας και το έδαφος δεν μπορούσε πλέον να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες νερού.

Οι πλημμύρες συμβάλλουν επίσης και στη διάχυση της ρύπανσης, καθώς συγκεκριμένες εστίες ρύπανσης, που εντοπίζονται σε στενά γεωγραφικά όρια, όπως είναι τα τμήματα κάποιου ποταμού, κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας

μπορούν να διαχυθούν στη γύρω περιοχή μολύνοντας το σύνολο των υδροφόρων οριζόντων.

Ωστόσο τα ακραία φυσικά φαινόμενα μπορούν επίσης να έχουν και θετικές επιδράσεις στη διατήρηση του φυσικού οικοσυστήματος. Για παράδειγμα οι πλημμύρες είναι σημαντικές, για τα παραποτάμια δάση και τους υγροτόπους, όπως επίσης και για την ανανέωση όχι μόνο των υδροφόρων οριζόντων, αλλά και την ευφορία του εδάφους.

1.9.2. Οικονομικές επιπτώσεις

Ακριβή μεγέθη των οικονομικών ζημιών είναι δύσκολο να υπολογιστούν μιας και τα δεδομένα καλύπτουν μικρό μόνο κομμάτι των συνολικών γεγονότων. Οι επιπτώσεις των πλημμυρών στην οικονομία ποικίλλουν από χώρα σε χώρα, σε κάποιες δε το κόστος είναι μεγαλύτερο, ιδίως σε αυτές που η οικονομία τους βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο και για το λόγο αυτό οι προτεραιότητες τους είναι διαφορετικές. Στην Ευρώπη οκτώ από τις χώρες που υπέστησαν τις μεγαλύτερες καταστροφές από συνεχείς πλημμύρες, ανήκουν στο κεντρικό και το ανατολικό της τμήμα (Πίνακας 1.3). Μιας και σχεδόν όλες αυτές οι χώρες είναι νέα μέλη της ΕΕ, το φαινόμενο των πλημμυρών, θα αποτελέσει μεγαλύτερη πρόκληση για μια διευρυμένη Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η συνολική οικονομική ζημιά που υπέστη η Ευρώπη από τις πλημμύρες τις τρεις τελευταίες δεκαετίες υπερβαίνει τα 72 δισεκατομμύρια Ευρώ, σε τιμές 2000. Οι τιμές αυτές αυξήθηκαν 8,5 φορές σε σχέση με τη δεκαετία του '70. Με τον ένα ή τον άλλον τρόπο σχεδόν 9 εκατομμύρια Ευρωπαίων επηρεάστηκαν από τις αρνητικές συνέπειες των καταστροφικών πλημμυρών, ενώ αυτές προκάλεσαν ζημιές ύψους 60 δισεκατομμυρίων ευρώ σε ασφαλισμένες περιουσίες, ποσό το οποίο αυξάνεται αν υπολογιστεί και το κόστος για τις περιουσίες που δεν είχαν ασφαλιστεί. Τα ποσά αυτά αποτελούν αποκλειστικά και μόνο εκτιμήσεις του Ευρωπαϊκού τμήματος του ΟΗΕ, μιας και δεν υπάρχουν συγκεκριμένα και επαρκή απογραφικά οικονομικά στοιχεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο συνολικό οικονομικό κόστος θα πρέπει να συνυπολογιστούν όχι μόνο οι άμεσες οικονομικές επιπτώσεις (καταστροφές σε ακίνητες και μη περιουσίες, ή σε γεωργικές εκτάσεις, απώλειες στην παραγωγή, καταστροφή των υποδομών), αλλά παράλληλα και το κόστος επαναφοράς των υποδομών σε τέτοια κατάσταση ώστε

να μπορούν μελλοντικά να αντιμετωπίσουν ανάλογης έντασης θεομηνίες (Wright M.J., & Monday L.J., 1996).

Πίνακας 1. 3. Οι επιπτώσεις των πλημμυρών σε αριθμούς, σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης (EM-DAT).

Ημερομηνία Γεγονότος (1998-2002)	Περιοχή	Επιπτώσεις
Μάιος 1998	Campania (Ιταλία)	Καταρρακτώδεις βροχές, το κράτος σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, περίπου 150 νεκροί και πάνω από 3000 πληγέντες.
Μάιος 1998	Zonguldak, Karabul, Bartin, (Τουρκία)	70% της περιοχής του Bertin βυθίστηκε, 16 νεκροί, οικονομικές απώλειες ύψους 1,2 δις ευρώ συμπεριλαμβανομένων 30000 πουλερικών και 150 βοοειδών.
Ιούνιος 1998	Bacau, Vaslui, Salaj, Mures, Neamt, Cluj, Alba, Sibiu, Hunedoara (Ρουμανία)	23 νεκροί, πάνω από 10000 πληγέντες μιας και πλημμύρισαν πάνω από 1000 km ² γης, συμπεριλαμβανομένων περίπου 160000 εκταρίων αγροτικής έκτασης. Περισσότερα από 500 km οδικού δικτύου, 270 γέφυρες και πάνω από 1800 κατοικίες καταστράφηκαν, ενώ το οικονομικό κόστος ανήλθε στα 150 εκ ευρώ.
Ιούλιος 1998	Sabinov, Presov (Σλοβακία)	82 χωριά χτυπήθηκαν, περίπου 50 άτομα σκοτώθηκαν και πάνω από 10000 πληγέντες, μιας και 2000 σπίτια πλημμύρισαν. Πάνω από 5000 ζώα σκοτώθηκαν.
Μάιος 1999	Bavaria (Γερμανία)	Πάνω από 120 km ² γης πλημμύρισαν με την καταστροφή του φράγματος, 3 άνθρωποι σκοτώθηκαν και εκατοντάδες αναγκάστηκαν να απομακρυνθούν από τις κατοικίες τους.
Ιούνιος 1999	Ρουμανία	19 νεκροί, πάνω από 1500 κατοικίες και 23000 εκτάρια αγροτικής έκτασης καταστράφηκαν και περισσότερα από 300 km του οδικού δικτύου υπέστησαν ζημιές.
Απρίλιος 2000	Boca, Borsod-Abaúj-Zemplén, (Ουγγαρία)	Περίπου 2500 km ² γης πλημμύρισαν, και 20000 άτομα εκκένωσαν τις κατοικίες τους.
Απρίλιος 2000	Alba, Arad, Bihor, Bistrita, Botosani, Brasov, Caras-Severin, Cluj, Harghita, Hunedoara, Maramures, Salaj, Timis (Ρουμανία).	9 νεκροί, 1000 km ² γης πλημμύρισαν περίπου 80000 εκτάρια αγροτικής έκτασης καταστράφηκαν, 9000 κατοικίες πλημμύρισαν και εκατοντάδες γέφυρες καταστράφηκαν ολοσχερώς.
Οκτώβριος 2000	Piedmont, Val d'Aoste, Liguria (Ιταλία)	29 νεκροί, πάνω από 40000 πληγέντες, περίπου 6000 έμειναν άστεγοι, ενώ το οικονομικό κόστος ξεπέρασε τα 430 εκ ευρώ
Οκτώβριος 2000	Kent, Sussex, Hampshire (H.B.)	Εκατοντάδες οικογένειες αναγκάστηκαν να εκκενώσουν τις κατοικίες τους και το οικονομικό κόστος έφτασε στα 6 δις ευρώ
Ιούνιος 2001	Κεντρική και νότια Τρανσυλβανία (Ρουμανία)	7 νεκροί και πάνω από 10000 πληγέντες, ύστερα από πλημμύρες σε 500 km ² γης, ενώ 3000 κατοικίες καταστράφηκαν.
Αύγουστος 2002	Αυστρία, Βέλγιο, Βουλγαρία, Δημοκρατία της Τσεχίας, Γαλλία, Γερμανία, Ιταλία, Ρουμανία, Ελβετία, Σλοβακία και Η.Β.	Έντονες βροχοπτώσεις για μια περίοδο 5 ετών. Πάνω από 600000 πληγέντες και περίπου 80 νεκροί στις 11 χώρες που επηρεάστηκαν. Μεγάλες οικονομικές ζημιές (15 δις ευρώ), το οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο καταστράφηκε ολοσχερώς, περίπου 10000 εκτάρια αγροτικής γης πλημμύρισαν, καθώς και μεγάλες πόλεις. Σοβαρές καταστροφές σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, ενώ προκλήθηκαν και πολλές κατολισθήσεις.
Σεπτέμβριος 2002	Lezha, Shkoder, Fier, Gjirokaster (Αλβανία)	Περίπου 260 km ² γης πλημμύρισαν, πάνω από 60000 πληγέντες, ενώ παρουσιάστηκαν προβλήματα στην υγιεινή και την παροχή νερού. Το κράτος κήρυξε 6 περιφέρειες σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

Η καταστροφή των υποδομών άλλωστε, γεννά από μόνη της και επιπλέον έμμεσα οικονομικά κόστη, τα οποία χάνονται συνήθως στο βάθος του χρόνου. Αυτό συμβαίνει γιατί το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επιδιόρθωση ή την εκ νέου κατασκευή τους είναι μεγάλο και συνεπώς η τοπική οικονομία αδυνατεί να λειτουργήσει στο μέγιστο βαθμό κατά την περίοδο αυτή, στερούμενη των απαραίτητων υποδομών. Φυσικά στο οικονομικό κόστος δεν εντάσσεται το «κόστος» της ανθρώπινης ζωής ή το ψυχολογικό κόστος με το οποίο επιβαρύνονται οι πληγέντες, μεγέθη τα οποία αν και αγγίζουν μεγάλες τιμές (117 εκατομμύρια πλημμυροπαθείς στον πλανήτη και συνολικά 6.957 θάνατοι από πλημμύρες) δεν μπορούν να μετρηθούν στα πλαίσια των οικονομικών επιπτώσεων (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

1.9.3. Κοινωνικές επιπτώσεις

Παρατηρώντας κανείς τα στοιχεία που αφορούν τη συχνότητα των πλημμυρών αντιλαμβάνεται εύκολα ότι ο κύριος αριθμός αυτών πλήττει τα οικονομικά ασθενέστερα κράτη. Στην Ευρώπη το μεγαλύτερο μέρος των καταστροφικών πλημμυρών εντοπίζεται στα κράτη που βρίσκονται στο ανατολικό της τμήμα, η πλειονότητα των οποίων έχει και τις πιο αδύναμες οικονομίες. Χώρες με αδύναμη οικονομία αδυνατούν να αντεπεξέλθουν στο κόστος κατασκευής υποδομών, κατάλληλων να αντιμετωπίσουν τέτοιου είδους καταστροφές και με τον τρόπο αυτό καθίστανται ιδιαίτερα ευάλωτες σε πιθανές πλημμύρες (Pahl-Wahl, Claudia, 2006).

Παράλληλα μεγάλο μέρος του πληθυσμού στις χώρες αυτές αναγκάζεται να εκτοπιστεί κάθε φορά που οι πλημμύρες πλήττουν τις περιοχές τους. Ο εκτοπισμός αυτός συνεπάγεται εκτός από τα προβλήματα στη στέγαση (δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις πλημμυροπαθών που αναγκάζονται να διαμένουν ακόμη και σε παραγκούπολεις για μεγάλο χρονικό διάστημα), την αδυναμία τους να ορθοποδήσουν οικονομικά ύστερα και από την τυχόν απώλεια περιουσιακών τους στοιχείων κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι οικονομικά ασθενείς ομάδες να αντιμετωπίζουν ακόμη μεγαλύτερα προβλήματα, γεγονός που πολύ συχνά οδηγεί στη διεύρυνση των κοινωνικών ανισοτήτων, διαταράσσοντας με τον τρόπο αυτό και τη κοινωνική συνοχή των χωρών (Bouwen, and Taillieu, 2004).

Συμπερασματικά

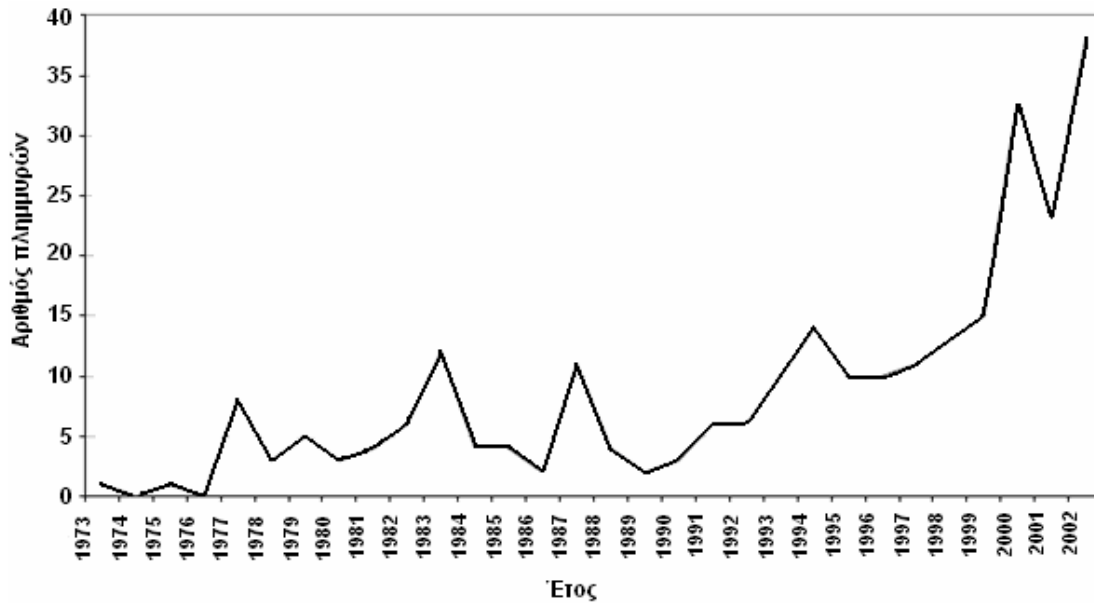
- Οι αρνητικές επιπτώσεις των καταστροφικών πλημμυρών αυξάνονται συνεχώς, επηρεάζοντας κάθε φορά μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού.
- Οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι μονοδιάστατες, αλλά αντίθετα εντοπίζονται στον περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό τομέα, προκαλώντας σε κάθε έναν από αυτούς μεγάλες καταστροφές.
- Λόγω των οικολογικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων, που έχουν οι πλημμύρες είναι αναγκαία μια νέα ολιστική προσέγγιση, που θα αντιμετωπίζει το πρόβλημα συνολικά.

1.10. ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

Το 2005, καταγράφηκαν συνολικά σε όλο τον πλανήτη 6.957 θάνατοι από πλημμύρες, αριθμός που αντιστοιχεί σε αύξηση 13%, σε σχέση με το 2004. Παράλληλα οι πλημμυροπαθείς του πλανήτη, το 2005, ανήλθαν στα 117 εκατομμύρια άτομα (57% αύξηση σε σχέση με το 2004). Επίσης το 2005 εντοπίζονται οι τρεις μεγαλύτερες, από άποψη θυμάτων, καταστροφικές πλημμύρες στον κόσμο και πιο συγκεκριμένα το Φεβρουάριο στο Πακιστάν με 520 νεκρούς, τον Ιούνιο στην Κίνα με 771 νεκρούς και τον Ιούλιο στην Ινδία με 1.200 νεκρούς (EM-DAT).

Στην Ευρώπη κατά τη διάρκεια της τελευταίας τριακονταετίας 1973-2002, περίοδος για την οποία υπάρχουν επίσημα στοιχεία από το Ευρωπαϊκό τμήμα του ΟΗΕ, οι πλημμύρες στη γηραιά ήπειρο παρουσιάζουν δραματική αύξηση (Εικόνα 1.8). Οι 31 πλημμύρες που σημειώθηκαν σε Ευρωπαϊκά κράτη κατά τη δεκαετία 1973-1982, αυξήθηκαν σε 179 (αύξηση 577%) τη δεκαετία 1993-2002 (EM-DAT).

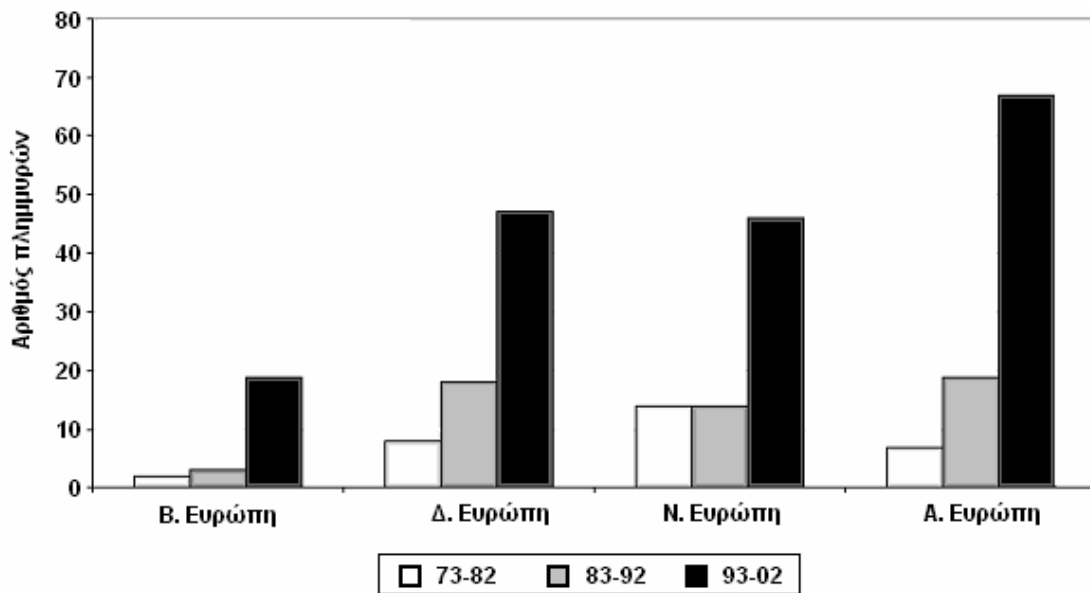
Οι στατιστικές αυτές θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με κάθε επιφύλαξη μίας και τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία μεγαλύτερη ευαισθησία, ιδιαίτερα στις ανατολικές και νότιες χώρες της Ευρώπης, σε σχέση με τα αποτελέσματα και τις επιπτώσεις των πλημμυρών. Δεν είναι τυχαίο ότι στην τελευταία δεκαετία έχουν παρατηρηθεί και έχουν ενταχθεί στις μετρήσεις, πολλές, μικρής έκτασης και περιορισμένων επιπτώσεων πλημμύρες.



**Εικόνα 1. 8. Συνολικός αριθμός πλημμυρών στην Ευρώπη (1973-2002).
(Hoyois and Guha-Sapir, 2003)**

Τα αίτια της αύξησης των πλημμυρών θα μπορούσαν να ενταχθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: στις κλιματικές αλλαγές, στην αλλαγή χρήσεων γης και στις νέες πιέσεις που δημιουργούνται από τη μη ορθή διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων των περιοχών.

Η κατανομή του αριθμού των πλημμυρών δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την Ευρώπη. Εάν ταξινομήσουμε την Ευρώπη σε τέσσερα γεωγραφικά διαμερίσματα, σύμφωνα με τον ΟΗΕ: νότια, βόρεια, ανατολική και δυτική παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός πλημμυρών εντοπίζεται στην Ανατολική (93 καταστρεπτικές πλημμύρες την τελευταία τριακονταετία) και Νότια Ευρώπη (74 πλημμύρες την τελευταία τριακονταετία) (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1. 9. Συνολικός αριθμός πλημμυρών κατά Ευρωπαϊκό διαμέρισμα, ανά δεκαετία. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

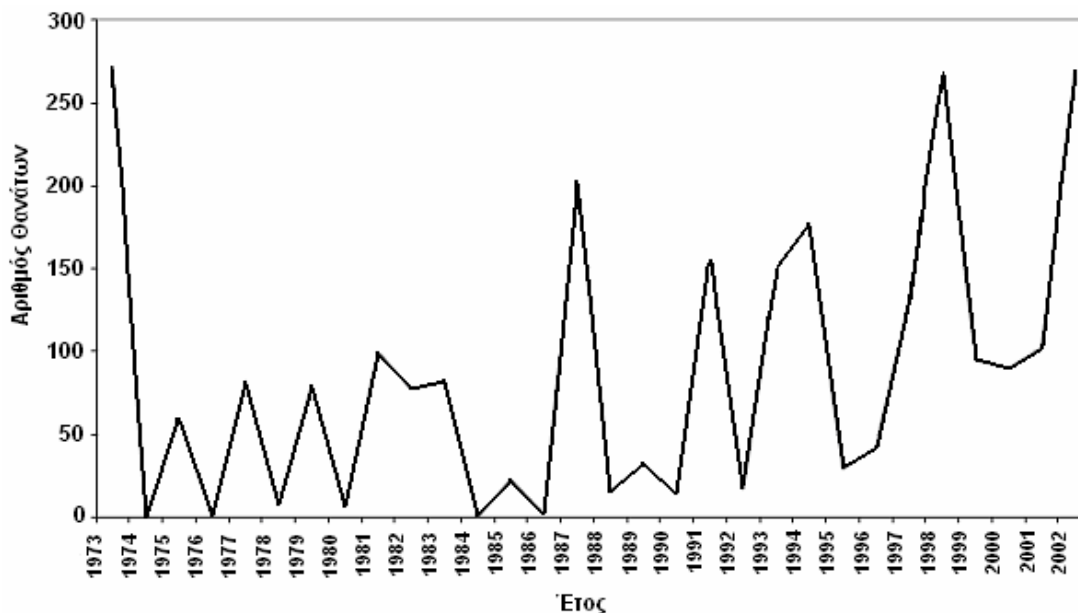
Στην Ανατολική Ευρώπη το 57% των πλημμυρών της τελευταίας δεκαετίας εντοπίζεται στις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Η Ρωσία κρατάει τα σκήπτρα με το 52% των καταστροφικών πλημμυρών να παρατηρείται στη Σιβηρία. Η χώρα που ακολουθεί τη Ρωσία σε καταστρεπτικές πλημμύρες είναι η Ρουμανία στην οποία το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει, τα τελευταία χρόνια, αλματώδη άνοδο.

Στη Νότια Ευρώπη η χώρα με τις περισσότερες καταγεγραμμένες πλημμύρες είναι η Ιταλία, ακολουθούν η Ισπανία και η Πορτογαλία, ενώ η Ελλάδα δεν παρουσιάζει μεγάλο αριθμό καταγεγραμμένων καταστροφικών πλημμυρών. Σημαντικό στοιχείο για τη Νότια Ευρώπη αποτελεί η έξαρση που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα στις αρχές της δεκαετίας του 2000.

1.10.1. Καταστροφικές πλημμύρες και απώλειες ανθρώπινων ζώων

Η εξακρίβωση του ακριβούς αριθμού των θανάτων που προκλήθηκαν από μία καταστρεπτική πλημμύρα δεν είναι εύκολη υπόθεση. Μία από τις επιπτώσεις της πλημμύρας άλλωστε είναι και η καταστροφή των σχετικών στατιστικών στοιχείων. Γενικά πάντως υπολογίζεται ότι οι μισές από τις καταστρεπτικές πλημμύρες στη Ευρώπη έχουν ανθρώπινα θύματα.

Την τελευταία τριακονταετία καταγράφηκαν συνολικά 2.626 θάνατοι που προκλήθηκαν από πλημμύρες (Εικόνα 1.10). Ο αριθμός των θανάτων την τελευταία δεκαετία είναι υπερδιπλάσιος από τον αντίστοιχο αριθμό της περιόδου 1973-1982 (WHO,2002).

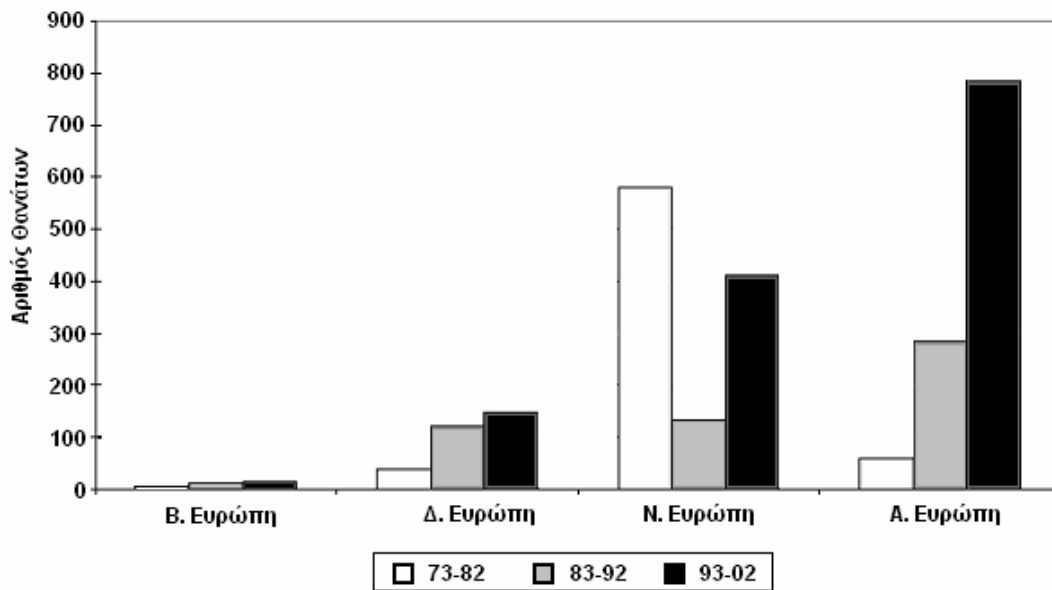


**Εικόνα 1. 10. Συνολικός αριθμός Θανάτων από πλημμύρες, στην Ευρώπη.
(Hoyois and Guha-Sapir, 2003)**

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το 54% των πλημμυρών αφορά σε περιπτώσεις με 1 έως 10 θανάτους, το 21% από 11 έως 20 και το 24% από 20 θανάτους και πάνω. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας τριακονταετίας παρατηρείται αυξητική τάση, όσον αφορά στην πρόκληση θανάτων από πλημμύρες (Εικόνα 1.11). Οι πλημμύρες πλέον δεν προκαλούν τις ίδιες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές αρκεί μάλιστα να υπολογίσουμε ότι στις δύο πρώτες δεκαετίες οι πλημμύρες που προκαλούσαν πάνω από 10 απώλειες ανθρώπινων ζώων κάλυπταν το 62% των συνολικών καταστροφικών πλημμυρών εκείνης της περιόδου (Hoyois and Guha-Sapir, 2003).

Η Ανατολική Ευρώπη κρατάει τα σκήπτρα των θανάτων από καταστροφικές πλημμύρες, τη στιγμή που στην Νότια Ευρώπη παρουσιάζεται μία εντυπωσιακή μείωση, δεκαετία 1983-1992 (WHO,2002).

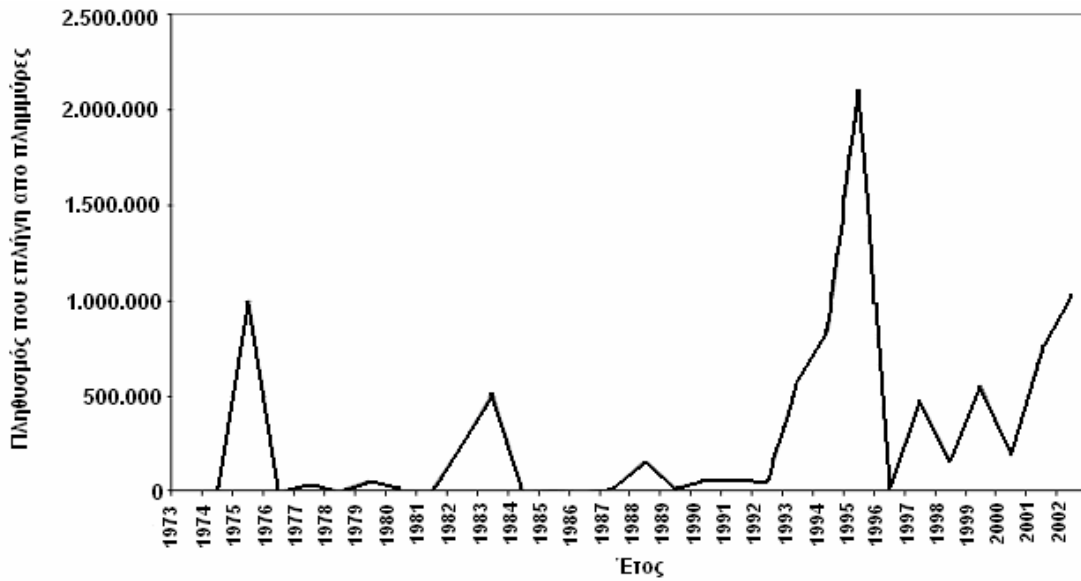
Στην Ελλάδα σημαντικές καταστροφές από πλημμύρες με πάνω από δέκα ανθρώπινα θύματα παρουσιάστηκαν κατά τα έτη 1977, 1980, 1994 και 2001.



Εικόνα 1. 11. Συνολικός αριθμός Θανάτων από πλημμύρες κατά Ευρωπαϊκό διαμέρισμα, ανά δεκαετία. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

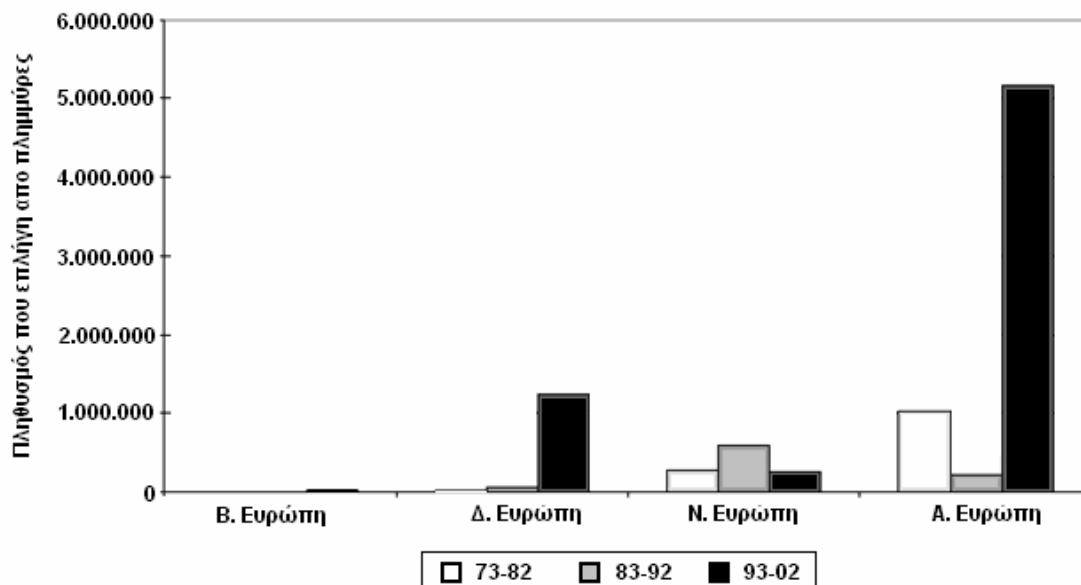
1.10.2. Καταστροφικές πλημμύρες και αριθμός πλημμυροπαθών

Κατά την τελευταία τριακονταετία, 9 εκατομμύρια Ευρωπαίοι υπήρξαν θύματα με τον ένα ή άλλο τρόπο, των αρνητικών συνεπειών από τις καταστροφικές πλημμύρες. Η τάση που παρατηρείται είναι τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των ατόμων που πλήττονται από τις πλημμύρες να αυξάνεται. Την εικοσαετία 1983-2002 ο αριθμός των Ευρωπαίων που επλήγησαν από πλημμύρες ήταν πενταπλάσιος σχεδόν από τον αντίστοιχο της δεκαετίας του '70 (Εικόνα 1.12).



Εικόνα 1. 12. Συνολικός Ευρωπαϊκός πληθυσμός που επλήγη από πλημμύρες. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις από τις πλημμύρες δεν έχουν μία ομοιόμορφη γεωγραφική κατανομή. Οι μεγαλύτερες συνέπειες συνεχίζουν να παρουσιάζονται στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, όπου ο συνολικός αριθμός των πληγέντων ανέρχεται περίπου στα 6.411.957 άτομα (Εικόνα 1.13), (EPSON).



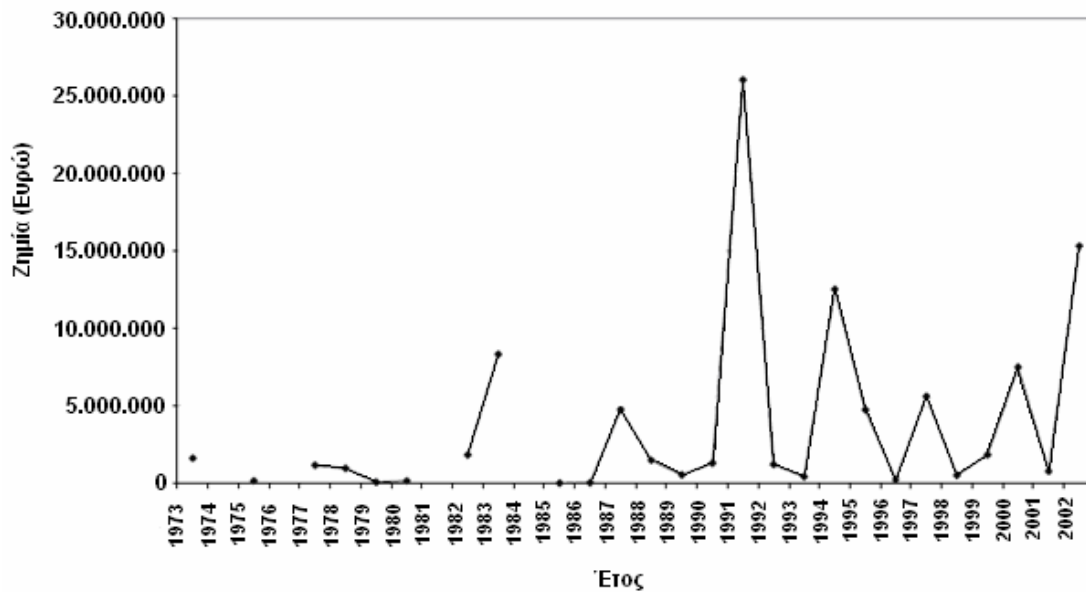
Εικόνα 1. 13. Συνολικός πληθυσμός που επλήγη από πλημμύρες κατά Ευρωπαϊκό γεωγραφικό διαμέρισμα, ανά δεκαετία. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχετικός περιορισμός των πλημμυροπαθών, την τελευταία δεκαετία, στις χώρες της Νότιας Ευρώπης. Ένα επίσης ενθαρρυντικό γεγονός είναι ότι το ποσοστό των μεγάλων πλημμυρών με περιορισμένες ζημιές αυξήθηκε την τελευταία δεκαετία. Οι πλημμύρες με λιγότερο από 10.000 πλημμυροπαθείς αυξήθηκαν από 56% σε 86% τη δεκαετία του '90. Θα πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι δύο πολύ μεγάλες πλημμύρες σημειώθηκαν στην Ισπανία το 1982 και 1983 με 225.000 και 500.000 πλημμυροπαθείς αντίστοιχα.

Στην Ελλάδα τα δύο τρίτα των πλημμυρών επηρεάζουν λιγότερο από 1.000 κατοίκους. Δύο μεγάλες πλημμύρες έχουν καταγραφεί το 1977 με 1.600 ανθρώπινα θύματα και το 2000 με 6.000 πλημμυροπαθείς (Hogois and Guha-Sapir, 2003).

1.10.3. Το οικονομικό κόστος των πλημμυρών στην Ευρώπη

Όπως προαναφέραμε η οικονομική ζημιά που υπέστη η Ευρώπη από τις πλημμύρες τις τρεις τελευταίες δεκαετίες υπερβαίνει τα 72 δισεκατομμύρια Ευρώ. Τα ποσά αυτά είναι εκτιμήσεις του ΟΗΕ, μιας και είναι πάρα πολύ δύσκολο να υπάρχουν συγκεκριμένα και επαρκή απογραφικά οικονομικά στοιχεία. Οι δυσκολίες αυτές οφείλονται και στο γεγονός ότι θα πρέπει να συνυπολογιστούν όχι μόνο τα στοιχεία της άμεσης επέμβασης ή των μέτρων για την ανακούφιση των πληγέντων, αλλά παράλληλα και το κόστος επαναφοράς των υποδομών σε κατάσταση που να μπορούν στο μέλλον να αντιμετωπίσουν ανάλογης έντασης θεομηνίες. Φυσικά στο οικονομικό κόστος δεν εντάσσεται το «κόστος» της ανθρώπινης ζωής ή το ψυχολογικό κόστος με το οποίο επιβαρύνονται οι πληγέντες. Η αδυναμία συλλογής στοιχείων φαίνεται και στην ασυνέχεια της σχετικής καμπύλης (Εικόνα 1.14), (UNEP, 2004).

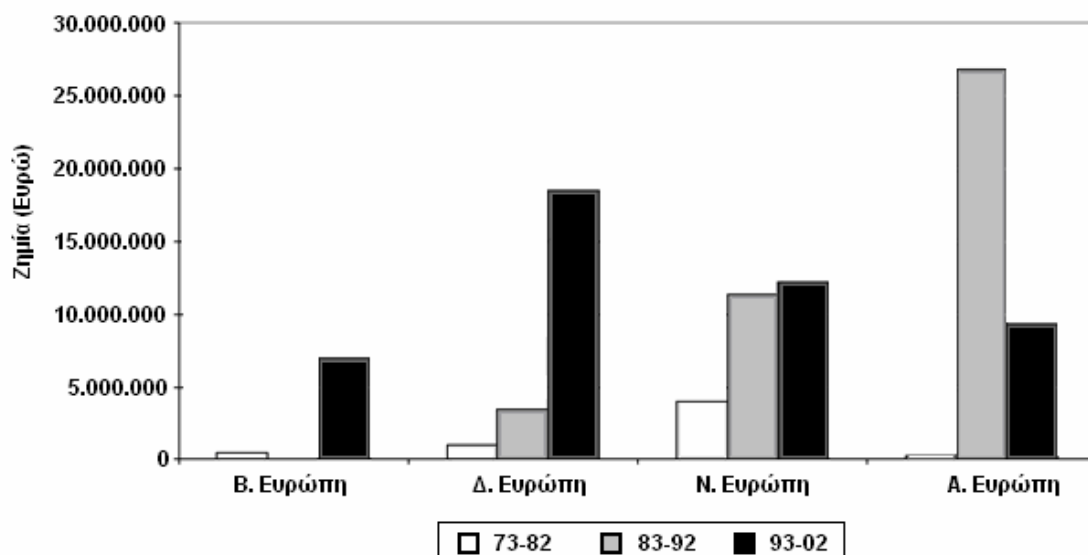


Εικόνα 1. 14. Συνολική οικονομική ζημιά που προκάλεσαν οι πλημμύρες στην Ευρώπη. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.14, την τελευταία δεκαετία παρουσιάζεται και σε αυτόν τον τομέα μία αλματώδης αύξηση. Οι οικονομικές ζημιές από καταστροφικές πλημμύρες στην Ευρώπη την τελευταία δεκαετία ήταν 8,5 φορές παραπάνω από ότι τη δεκαετία του '70, (Εικόνα 1.15).

Το σχετικά χαμηλό ύψος των οικονομικών επιπτώσεων στην Ανατολική Ευρώπη οφείλεται στην έλλειψη σχετικών στοιχείων. Στη Ρωσία, την Ουγγαρία και την Ουκρανία π.χ υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, με όλες τις επιφυλάξεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, για το 40% - 48% των πλημμυρών.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις χώρες της Νότιας Ευρώπης με την Ισπανία, την Πορτογαλία και τη FYROM να παρουσιάζουν στοιχεία για λιγότερο από το 50% των πλημμυρών τους. Χώρες όπως η Ελλάδα δεν έχουν παραδώσει αξιόπιστα, κατά τις υπηρεσίες του ΟΗΕ, σχετικά στοιχεία (Best Practices on Flood Prevention, Protection and Mitigation, 2003).



Εικόνα 1. 15. Συνολική οικονομική ζημιά που προκάλεσαν οι πλημμύρες στην Ευρώπη κατά γεωγραφικό διαμέρισμα, ανά δεκαετία. (Hoyois and Guha-Sapir, 2003)

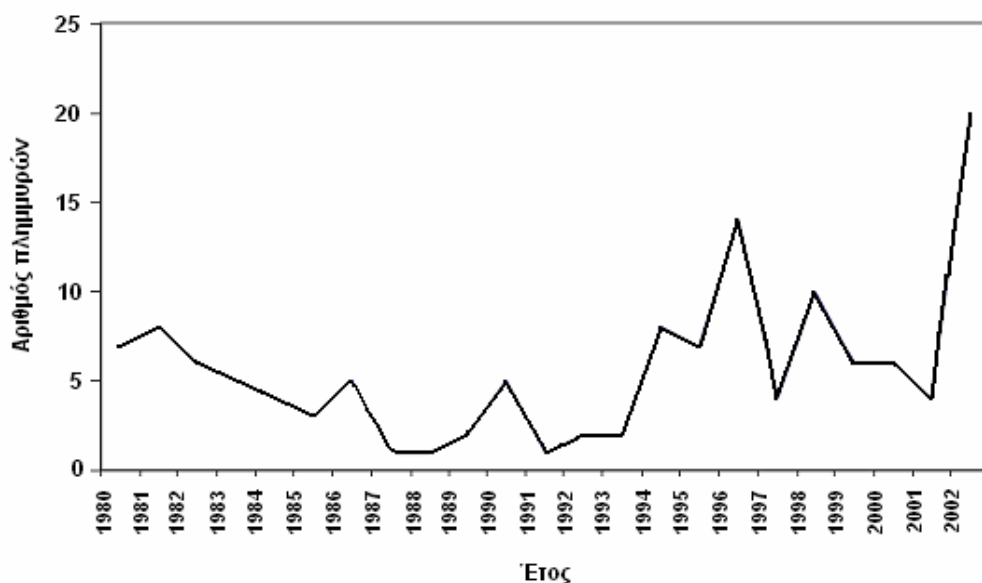
Συμπερασματικά

- Παρατηρείται μια αυξητική τάση των καταστροφικών πλημμυρών.
- Οι πλημμύρες πλήττουν περισσότερο και κυρίως έχουν μεγαλύτερες συνέπειες στις φτωχότερες περιοχές της Ευρώπης, όπως για παράδειγμα στα ανατολικά κράτη και τα κράτη του νότου.
- Ως θετικό στοιχείο θα πρέπει να θεωρηθεί η τάση περιορισμού των αρνητικών συνεπειών των καταστροφικών πλημμυρών. Το ποσοστό των πλημμυρών με περιορισμένες επιπτώσεις τείνει να αυξάνεται σε σχέση με τις πλημμυρικές καταστροφές με μεγάλο κοινωνικό, οικονομικό και κυρίως σε ανθρώπινες ζωές κόστος.
- Η Ελλάδα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες εξάρσεις μέσα στο Ευρωπαϊκό περιβάλλον. Ένας από τους λόγους θα μπορούσε να είναι η έλλειψη σχετικών αξιόπιστων στοιχείων. Η γεωγραφική της θέση πάντως, στον Ευρωπαϊκό νότο, την εντάσσει σε μία ιδιαίτερα ευαίσθητη περιοχή.
- Τα πλημμυρικά στοιχεία που αφορούν τον Ελλαδικό χώρο υποδεικνύουν την ανάγκη για αποτελεσματική αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης και εφαρμογή σύγχρονων επιστημονικών μεθόδων πρόβλεψης, προετοιμασίας και αντιμετώπισης των καταστροφικών πλημμυρών.

1.11. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Στην Ελλάδα οι μεγάλες πλημμύρες είναι σπάνιες. Πολύ συχνά όμως παρουσιάζονται τοπικές πλημμύρες που προκαλούν μεγάλες καταστροφές και προέρχονται από μικρές λεκάνες απορροής ή τοπικά υδατορεύματα, συνήθως χειμαρρους. Οι τοπικές πλημμύρες προβάλλονται από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης ως εξαιρετικά καταστροφικές, όχι μόνο λόγω της συνηθισμένης υπερδιόγκωσης των γεγονότων από τους δημοσιογράφους, αλλά και διότι επισύρουν τη μομφή της κοινής γνώμης κατά της πολιτείας. Οι ζημιές που προκαλούνται από τις πλημμύρες αναφέρονται σε σπίτια, καταστήματα, δρόμους και τεχνικά έργα, δίκτυα τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρικού, επαγγελματικά και επιβατικά αυτοκίνητα. Τέλος, οι πλέον σημαντικές είναι οι απώλειες ανθρώπινων ζωών. Δυστυχώς, στην Ελλάδα δεν υπάρχει ένας ενιαίος φορέας για την καταγραφή των πλημμυρών και των καταστροφών που προκάλεσαν κατά το παρελθόν. Προκειμένου να έχουμε μια εικόνα του μεγέθους και των επιπτώσεων των πλημμυρών στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των πλημμυρικών γεγονότων που έχουν σημειωθεί στον ελλαδικό χώρο από το έτος 1980 μέχρι το 2002, (Μιμίκου 2005). Η αξιολόγησή τους πραγματοποιήθηκε με βάση το ύψος της ζημιάς που προηγήθηκε (Εργ. Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ).

Αναλυτικότερα, έχουν σημειωθεί και καταγραφεί 150 έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο. Σε 22 περιπτώσεις υπήρξαν ανθρώπινα θύματα, 36 φορές πλημμύρισαν μεγάλοι ποταμοί (Σπερχειός, Έβρος, Πηνειός κλπ.), ενώ οι περισσότερες περιπτώσεις αφορούν τη δράση χειμαρρικών ρεμάτων των οποίων οι κοίτες διέρχονται από αστικές περιοχές. Στην Εικόνα 1.16 και στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζονται η πορεία του αριθμού των έντονων πλημμυρικών γεγονότων (1980 – 2003), η οποία παρουσιάζει αυξητική τάση, καθώς και ο αριθμός θυμάτων κατά την περίοδο 1994-2002 (Στάθης, 2004).



Εικόνα 1. 16. Αριθμός πλημμυρών στον Ελλαδικό χώρο. (Στάθης, 2004)

Πίνακας 1. 4. Αριθμός πλημμυρών και ανθρώπινες απώλειες τα τελευταία χρόνια, στην Ελλάδα.

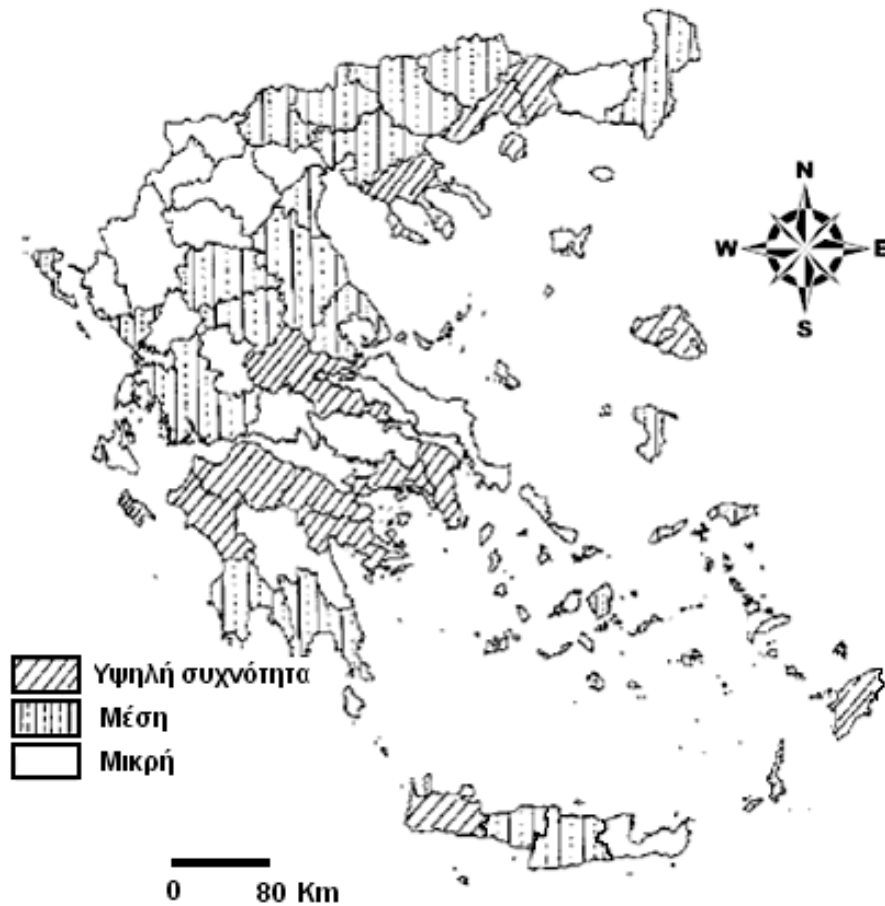
Έτος	Αριθμός πλημμυρών	Ανθρώπινες Απώλειες
1994	8	16
1995	7	
1996	14	2
1997	4	
1998	10	5
1999	6	
2000	6	2
2001	4	4
2002	10	3

Επίσης ο Πίνακας 1.5, παρουσιάζει τις καταστροφές που έχουν καταγραφεί στην Ελλάδα εξαιτίας των σημαντικότερων πλημμυρικών γεγονότων κατά την δεκαετία 2000 - 2010.

Πίνακας 1. 5. Καταστροφές πλημμύρες στην Ελλάδα την περίοδο 2000 – 2010.
(www.em-dat.net/)

Ημερομηνία Έναρξης	Ημερομηνία Λήξης	Περιοχή	Αριθμός νεκρών	Αριθ. ανθρώπων που επηρεάστηκαν	Εκτιμώμενη ζημιά (Εκατομμ.\$)
14/02/2010	20/2/2010	Έβρος		350	55
16/11/2007	02/12/2007	Έβρος	2	600	
21/10/2006	22/10/2006	Μεσσήνη		90	
08/10/2006	12/10/2006	Χαλκιδική	1	3000	5.659
18/02/2005	24/02/2005	Έβρος			
19/02/2003	19/02/2003	Κεντ. Ελλάδα			
02/02/2003	02/02/2003	Αχαΐα			600
25/01/2003	25/01/2003	Μαραθώνας		450	
27/12/2002	27/12/2002	Δωδεκάνησα			
13/12/2002	13/12/2002	Ζάκυνθο		180	
07/11/2002	07/11/2002	Αθήνα		210	
29/11/2001	29/11/2001	Σάμος		600	
14/01/2001	15/01/2001	Κόρινθος	11	450	
19/11/2000	19/11/2000	Αθήνα-Κόρινθος	1	6000	
31/10/2000	31/10/2000	Κέρκυρα		600	

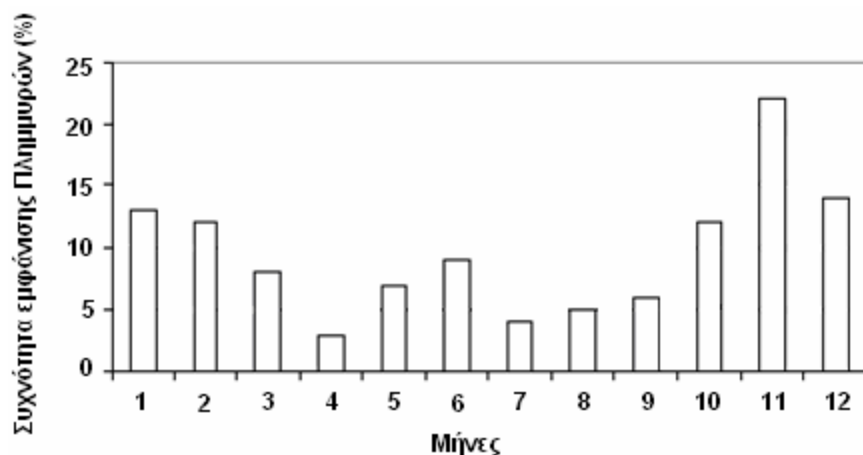
Με βάση τον αριθμό των σημαντικών πλημμυρικών γεγονότων σχεδιάστηκε ο χάρτης συχνότητας εμφάνισης πλημμυρών στον ελληνικό χώρο ο οποίος και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.17. Οι βαθμίδες συχνοτήτων αναφέρονται ως εξής: α) Μικρή συχνότητα αφορά περιοχές στις οποίες δεν εκδηλώθηκε πλημμύρα ή είχαμε εμφάνιση 1-2 πλημμυρικών γεγονότων, στην περίοδο που ερευνάται (1980 - 2002), β) η μέση συχνότητα 3-7 πλημμύρες, και γ) η υψηλή συχνότητα περισσότερες από οκτώ (8) φορές. Η συχνότητα παράλληλα εκφράζει και την πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής (Στάθης, 2004).



Εικόνα 1. 17. Γεωγραφική κατανομή της πλημμυρικής επικινδυνότητας στον Ελλαδικό χώρο. (Στάθης, 2004)

1.11.1. Χρονική εμφάνιση των πλημμυρών

Σε γενικές γραμμές τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της υγρής ή βροχερής περιόδου του έτους. Οι μήνες Νοέμβριος και Δεκέμβριος παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα πλημμυρικών συμβάντων (Εικόνα 1.18). Επιπλέον, ο μήνας Νοέμβριος είναι ο μήνας που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές έντασης βροχής ανά 24ώρο (Στάθης, 2004).



Εικόνα 1. 18. Μηνιαία κατανομή της συχνότητας των πλημμυρών στην Ελλάδα. (Στάθης, 2004)

Στον Πίνακα 1.6, δίνονται οι τιμές των μεγίστων βροχοπτώσεων που έχουν καταγραφεί στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών για τον Ελλαδικό χώρο και έχουν προκαλέσει σημαντικές πλημμύρες.

Πίνακας 1. 6. Έντονες βροχοπτώσεις 20ετίας στην Ελλάδα με έντονη πλημμυρογένεση. (Στάθης, 2004)

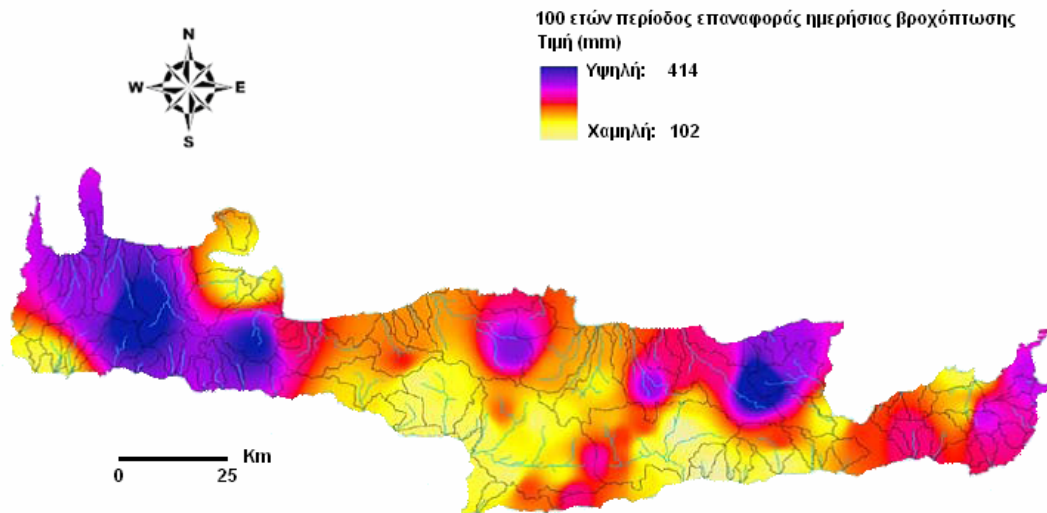
Τοποθεσία Σταθμού	Ημερομηνία	Αριθμός πλημμυρών		
		Ωριαία	24 ώρου	Ετήσιο ύψος βροχής
Κόρινθος	12/11/1997	31.3	290	459.7
Αθήνα	06/11/2001		82	358
Λαμία	23/11/1998	23.6	141	672.6
Λάρισα	28/11/1998		167	465.2
Χαλκιδική	8-9/10/2000	37.5	236	586.7
Λακωνία	10/11/1990		222	816.7
Αθήνα	21-22/10/1994	42.7	140	358
Κάσος	22-23/10/1994		250	788
Καρδίτσα	22-23/10/1994		230	632
Σάμος	28/11/2001		128	918.4
Κασος	28/12/2002		170	788

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το φυσικό δυναμικό πλημμυρογένεσης που διαμορφώνεται στη χώρα μας ευνοεί την εκδήλωση πλημμυρών. Η κατάσταση αυτή σε συνδυασμό με τις έντονες ανθρωπογενείς επιδράσεις στις λεκάνες απορροής και στις κοίτες των χειμαρρικών ρεμάτων, επιτείνουν τα αποτελέσματα

των πλημμυρών. Το πλημμυρικό πρόβλημα στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα οξύ στις πεδινές περιοχές ρεμάτων, τα οποία διασχίζουν αστικές περιοχές με έντονη οικιστική ανάπτυξη. Ολοένα και περισσότερες περιοχές οι οποίες τις προηγούμενες δεκαετίες ήταν δάση ή αγροί, μετατρέπονται σε αστικές, με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερων απορροών σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση. Ως συνέπεια αυτού είναι οι κοίτες των ρεμάτων να μην επαρκούν για τη διόδευση των αυξημένων παροχών και να πλημμυρίζουν οι γειτνιάζουσες περιοχές. Τα έντονα πλημμυρικά προβλήματα δημιουργούνται από ραγδαίες και ακραίες βροχοπτώσεις. Οι ακραίες αυτές τιμές βροχής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαστασιολόγηση των αντιπλημμυρικών έργων.

1.11.2. Πλημμύρες στην Κρήτη

Οι πλημμύρες στο νησί της Κρήτης, είναι ένα σχετικά συχνό φαινόμενο, το οποίο γίνεται όλο και εντονότερο τα τελευταία χρόνια. Μία από τις βασικές αιτίες δημιουργίας πλημμυρών, είναι η κατανομή της βροχόπτωσης. Για τη μελέτη των πλημμυρικών γεγονότων, στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα στοιχεία, καθώς δεν υπάρχει αρμόδιος φορέας για τη διεξαγωγή μετρήσεων. Με στόχο τη γνώση της κατανομής της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης, δημιουργήθηκε ένας χάρτης ημερήσιας βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς εκατό ετών από στοιχεία βροχομετρικών σταθμών εγκατεστημένων στο νησί (Εικόνα 1.19). Ο χάρτης παράχθηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις ημερήσιας βροχόπτωσης από 52 σταθμούς. Οι χρονοσειρές βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν έχουν στοιχεία έως το υδρολογικό έτος 2005-2006, με ένα εύρος 25 – 30 ετών, ανάλογα το σταθμό (Τσιτσιλώνης, 2008).



**Εικόνα 1. 19. Χάρτης ημερήσιας βροχόπτωσης εκατονταετίας στην Κρήτη.
(Τσιτσιλώνης, 2008)**

Με βάση την Εικόνα 1.19, παρατηρούμε ότι ο νομός Χανίων εμφανίζει τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα δημιουργίας πλημμυρών, σε ότι αφορά πάντα την κατανομή βροχόπτωσης, σε αντίθεση με τη Ανατολική Κρήτη. Επίσης περιοχές που γειτνιάζουν με τους ορεινούς όγκους του νησιού εμφανίζουν πολύ υψηλή ημερήσια βροχόπτωση (περίοδο επαναφοράς εκατό ετών). Θα πρέπει βέβαια να επισημανθεί ότι ο παραπάνω χάρτης δεν αποκλείει σε καμία περίπτωση την εμφάνιση μεγάλων στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων, ακόμα και σε περιοχές με σχετικά χαμηλή επικινδυνότητα όσον αφορά την κατανομή της βροχόπτωσης.

1.12. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΟΔΗΓΙΕΣ 2000/60/ΕΚ ΚΑΙ 2007/60/ΕΚ.

Όπως έχει αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια σημαντικές πλημμύρες έπληξαν την Ευρωπαϊκή Ένωση, οι οποίες προκάλεσαν απώλειες μεγάλου αριθμού ανθρώπινων ζώων, μετακινήσεις μεγάλων ομάδων πληθυσμού, τεράστιες οικονομικές και κοινωνικές ζημιές, σοβαρότατες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και βλάβες σε υποδομές, σε εμπορικές και βιομηχανικές επιχειρήσεις καθώς και σε γεωργικές εκτάσεις.

Η Κοινότητα εδώ και αρκετά χρόνια προσπαθεί να διαμορφώσει ένα νέο θεσμικό πλαίσιο, αναφορικά με την περιβαλλοντική νομοθεσία για την ποιότητα του νερού. Όμως μέχρι πρόσφατα δεν είχαν αντιμετωπιστεί τα θέματα των πλημμυρών και οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος αναφορικά με τους

κινδύνους πλημμύρας. Η οδηγία πλαίσιο για το νερό 2000/60/EC (EU Water Framework Directive - WFD), προβλέπει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών με στόχο την επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης. Η οδηγία αυτή συμβάλει επίσης στο μετριασμό των επιπτώσεων των πλημμυρών. Όμως, η μείωση του κινδύνου πλημμύρας δεν είναι ένας από τους κύριους στόχους της εν λόγω οδηγίας, ούτε λαμβάνονται επαρκώς υπόψη πιθανοί μελλοντικοί κίνδυνοι (π.χ. αλλαγή του κλίματος). Αυτό το κενό ήρθε να καλύψει η νέα οδηγία για την αξιολόγηση των πλημμυρών (2007/60/EC).

Η νέα οδηγία και όσα θα γίνουν για την εφαρμογή της συνδέονται στενά με την εφαρμογή της οδηγίας πλαίσιο για το νερό. Η Οδηγία 2007/60/EC έχει ως βάση τη λεκάνη απορροής ποταμού, που αποτελεί και το θεμελιώδες στοιχείο εφαρμογής της οδηγίας πλαίσιο για το νερό. Λόγω της διαφοροποίησης των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τη γεωγραφία, την υδρολογία και τη διάρθρωση των εγκατεστημένων πληθυσμών, η νέα οδηγία παρέχει στα κράτη μέλη επαρκή ευελιξία, ώστε να μπορούν να καθορίσουν το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας, τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την επίτευξη αυτού του επιπέδου προστασίας και τα χρονοδιαγράμματα για την εφαρμογή σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας. Επίσης, τα κράτη μέλη έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν τα σχέδια διαχείρισης των πλημμυρικών κινδύνων στα διαχειριστικά σχέδια λεκανών απορροής.

1.12.1. Το βασικό περιεχόμενο της οδηγίας για την αξιολόγηση των πλημμυρών

Οι διάφοροι τύποι πλημμυρών που σημειώνονται στην Κοινότητα αφορούν πλημμύρες ποταμών, στιγμιαίες πλημμύρες, πλημμύρες στα αστικά κέντρα, πλημμύρες που οφείλονται στο αποχετευτικό σύστημα καθώς και παράκτιες πλημμύρες. Οι ζημιές που προκαλούνται από τα παραπάνω είδη πλημμυρών ποικίλλουν στις διάφορες χώρες και περιφέρειες της Κοινότητας. Ως εκ τούτου, οι στόχοι που αποσκοπούν στη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας θα πρέπει να βασίζονται στις τοπικές και περιφερειακές περιστάσεις.

Οι κίνδυνοι πλημμύρας σε ορισμένες περιοχές εντός της Κοινότητας μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντοι όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε περιοχές ακατοίκητες ή με μικρή δημογραφική πυκνότητα ή σε περιοχές με περιορισμένα

περιουσιακά στοιχεία ή μικρή οικολογική αξία. Η προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας σε κάθε λεκάνη και υπολεκάνη απορροής ποταμών καθώς και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες πρέπει να πραγματοποιείται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού ώστε να προσδιορίζεται πάντοτε ο κίνδυνος πλημμύρας και να αποφασίζεται κατά πόσον επιβάλλεται να αναληφθεί περαιτέρω δράση. Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/EC, η βάση για τον καθορισμό των προτεραιοτήτων λήψης περαιτέρω τεχνικών, οικονομικών και πολιτικών αποφάσεων για την αντιμετώπιση των πλημμυρών, έγκειται στην δημιουργία πλημμυρικών χαρτών καθώς και χαρτών στους οποίους να αναφέρονται ενδεικτικές ζημιές από πλημμύρες και να περιγράφονται οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά επίπεδα κινδύνου πλημμύρας.

Για να μειωθούν και να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις των πλημμυρών στην εκάστοτε περιοχή είναι σκόπιμο να καθιερωθούν σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας. Τα αίτια και οι συνέπειες των πλημμυρών ποικίλλουν ανάλογα με τις χώρες και τις περιφέρειες της Κοινότητας. Κατά συνέπεια τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες γεωγραφικές - υδρολογικές συνθήκες της κάθε λεκάνης απορροής ποταμού και να παρέχουν λύσεις αφού ληφθούν υπόψη οι ανάγκες και οι προτεραιότητές τους.

1.12.2. Προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας

Στο άρθρο 4 της νέας οδηγίας (2007/60/EC) καθορίζεται ότι τα κράτη μέλη για κάθε περιοχή της λεκάνης απορροής ποταμού ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού που εμπίπτει στην επικράτειά τους, πραγματοποιούν προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας, η οποία περιλαμβάνει τουλάχιστον τα εξής:

(α) Χάρτη της περιοχής με τα όρια της λεκάνης απορροής ποταμού, της αντίστοιχης υπολεκάνης και όπου αυτό είναι απαραίτητο των παράκτιων ζωνών. Ο χάρτης θα πρέπει να περιγράφει επίσης τα αντίστοιχα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης.

(β) Περιγραφή των πλημμυρών που σημειώθηκαν κατά το παρελθόν.

(γ) Περιγραφή των υδρολογικών διαδικασιών που σχετίζονται με τις πλημμύρες και την ευαισθησία τους έναντι αλλαγών.

(δ) Περιγραφή αναπτυξιακών σχεδίων, που συνεπάγονται ενδεχόμενη αλλαγή χρήσεων γης ή δημογραφικής κατανομής ή διάταξης των οικονομικών δραστηριοτήτων, με αποτέλεσμα την αύξηση των κινδύνων πλημμύρας στην περιοχή ανάντη ή κατόντη της λεκάνης απορροής.

(ε) Αξιολόγηση της πιθανότητας μελλοντικών πλημμυρών βάση των υδρολογικών δεδομένων, των ειδών των πλημμυρών και των προβλεπόμενων επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος.

(στ) Πρόβλεψη μελλοντικών πλημμυρών και υπολογισμός των συνεπειών τους στην υγεία του ανθρώπου, το περιβάλλον και τις οικονομικές δραστηριότητες συνυπολογίζοντας μακροπρόθεσμες μεταβολές (π.χ. αλλαγή του κλίματος).

Βάση των παραπάνω το άρθρο 4 της Οδηγίας (2007/60/EC), προβλέπει ότι κάθε λεκάνη και υπολεκάνη απορροής ή παράκτια ζώνη ποταμού χαρακτηρίζεται κατά τρόπο που να εμπίπτει σε μία από τις εξής κατηγορίες:

(α) Λεκάνες, υπολεκάνες απορροής ή παράκτιες ζώνες ποταμών για τις οποίες συμπεραίνεται, ότι δεν υφίσταται σοβαρός κίνδυνος πλημμύρας ή δεν θεωρείται εύλογο να θεωρηθεί πιθανό να συμβεί πλημμύρα ή ότι οι επιπτώσεις σε περίπτωση πλημμύρας για την υγεία του ανθρώπου, το περιβάλλον ή την οικονομική δραστηριότητα είναι αρκετά περιορισμένες.

(β) Λεκάνες και υπολεκάνες απορροής ποταμού ή παράκτιες ζώνες για τις οποίες συμπεραίνεται, ότι υφίσταται σοβαρός κίνδυνος πλημμύρας ή είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι είναι εύλογο να συμβεί πλημμύρα.

Με βάση το άρθρο 5, εστιάζεται η προσοχή στις λεκάνες ή υπολεκάνες εκείνες, όπου υφίσταται σοβαρός κίνδυνος πλημμύρας, ώστε στη συνέχεια με βάση τα προβλεπόμενα στην παρούσα οδηγία, να καταρτιστούν σχέδια διαχείρισης των κινδύνων αυτών. Όσον αφορά το χρονοδιάγραμμα υλοποίησης στο άρθρο 6, προβλέπεται, ότι τα κράτη μέλη ολοκληρώνουν την προκαταρκτική αξιολόγηση του κινδύνου πλημμύρας το αργότερο σε μια τριετία από την ημερομηνία κατά την οποία τίθεται σε ισχύ η παρούσα οδηγία. Επίσης τα κράτη μέλη επανεξετάζουν και ενημερώνουν, εφόσον είναι απαραίτητο, την παραπάνω αξιολόγηση το αργότερο το 2018 και εν συνεχεία ανά εξαετία.

1.12.3. Χάρτες πλημμυρικού κινδύνου

Σύμφωνα με το άρθρο 7 της Οδηγίας (2007/60/EC), τα κράτη μέλη οφείλουν να εκπονούν, σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, χάρτες πλημμυρών και χάρτες ενδεικτικών ζημιών από πλημμύρες, που εφεξής θα αναφέρονται ως «χάρτες πλημμυρικού κινδύνου», για τις λεκάνες και υπολεκάνες απορροής ποταμών καθώς και για παράκτια τμήματα για τα οποία κρίνεται, ότι υφίσταται σοβαρός κίνδυνος πλημμύρας. Οι χάρτες πλημμυρών αναφέρονται σε γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν, σύμφωνα με τα εξής σενάρια:

- (α) πλημμύρες υψηλής πιθανότητας
- (β) πλημμύρες μέσης πιθανότητας
- (γ) πλημμύρες περιορισμένης πιθανότητας

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια πρέπει να παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

- (α) προβλεπόμενο βάθος νερού
- (β) ταχύτητα ροής, εφόσον είναι απαραίτητο
- (γ) περιοχές στις οποίες ενδέχεται να παρατηρηθούν φαινόμενα παρόχθιας διάβρωσης και εναπόθεσης φερτών υλών.

Οι χάρτες ενδεικτικών ζημιών λόγω πλημμυρών θα πρέπει να περιγράφουν τις πιθανές ζημιές που θα προκληθούν από τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των σεναρίων και να εκφράζουν τις ζημιές αυτές ως εξής:

- (α) με τον αριθμό κατοίκων, που ενδεχομένως πληγεί
- (β) με την πιθανή οικονομική ζημιά στην περιοχή,
- (γ) με τις πιθανές ζημιές στο περιβάλλον.

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να ολοκληρώσουν τους χάρτες πλημμυρικού κινδύνου το αργότερο έως τις 22 Δεκεμβρίου 2013, σύμφωνα με το άρθρο 8. Οι χάρτες αυτοί επανεξετάζονται και εφόσον είναι απαραίτητο ενημερώνονται το αργότερο έως τις 22 Δεκεμβρίου 2019 και στη συνέχεια ανά εξαετία.

Επίσης, σύμφωνα με το άρθρο 14 της οδηγίας, τα κράτη μέλη οφείλουν να μεριμνούν ώστε να διατίθενται στο κοινό οι προκαταρκτικές αξιολογήσεις κινδύνων πλημμύρας, οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου και τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας. Επιπρόσθετα, τα κράτη μέλη θα πρέπει να εξασφαλίζουν την ενεργό συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων μερών στην

εκπόνηση, επανεξέταση και ενημέρωση των σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου (π.χ. Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης).

1.12.4. Εφαρμογή της Οδηγίας (2007/60/EC) για τις πλημμύρες στην Ελλάδα

Η οδηγία για το νερό αποτελεί κατά γενική ομολογία μια τεράστια προσπάθεια, σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, για την ορθή προστασία και χρήση όλων των υδάτων, ώστε να εξασφαλιστεί η αειφόρος χρήση του νερού σε ολόκληρη την Ευρώπη. Με την νέα οδηγία για τις πλημμύρες συμπληρώνεται η περιβαλλοντική νομοθεσία. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε τους στόχους και τις βάσεις με τις δύο αυτές οδηγίες και τώρα αναμένεται από κάθε κράτος μέλος να αξιολογήσει την υπάρχουσα κατάσταση και τις ιδιαιτερότητες των υδατικών του πόρων και να διαμορφώσει τη δική του εθνική στρατηγική.

Οι επιπτώσεις από την εφαρμογή των δυο οδηγιών στην Ελλάδα δεν μπορεί παρά να είναι θετικές. Η εφαρμογή τους θα δημιουργήσει τις απαραίτητες συνθήκες για τη στήριξη μιας πολιτικής, που θα οδηγήσει στην ικανοποιητική και αποτελεσματική προστασία, στην ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των υδατικών μας πόρων, καθώς και την ορθή διαχείριση των κινδύνων από τις πλημμύρες. Ωστόσο η εφαρμογή τους στην Ελλάδα προϋποθέτει τη δημιουργία της απαραίτητης υποδομής, επίπονη εργασία, μακροπρόθεσμο προγραμματισμό, αλλαγή νοοτροπίας και οικονομικό κόστος, ενώ θα χρειαστεί και πολιτική βούληση. Για την Ελλάδα, η οδηγία για τις πλημμύρες έρχεται τη κατάλληλη στιγμή, κατά την οποία οι υδατικοί πόροι της αντιμετωπίζουν αυξημένες πιέσεις και πλήττεται σχεδόν κάθε χρόνο από σοβαρές πλημμύρες.

1.13. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2007/60/EC ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Η διαπίστωση των αιτιών πλημμυρογένεσης δεν εμποδίζει τις πλημμύρες ούτε και τις καταστροφές που δύναται να προκαλέσουν, παρ'όλες τις προσπάθειες που θα μπορούσαν να καταβάλουν οι αρμόδιοι φορείς και ιδιαίτερα οι Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης. Βασική φιλοσοφία στην αντιπλημμυρική προστασία, είναι να μην αγνοείται η μακροχρόνια δυναμική των ρεμάτων, που εκφράζεται με τη γεωμετρία της διατομής της φυσικής κοίτης και τα ιδιαίτερα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η Οδηγία 2007/60/EC, αποσκοπεί στη μείωση των επιπτώσεων από τις πλημμύρες. Το παραπάνω μπορεί να γίνει εφικτό με την ανάπτυξη προγραμμάτων διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου, που περιλαμβάνουν:

α) *Την πρόληψη των ζημιών που προκαλούνται από τις πλημμύρες.* Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με την αποφυγή ανέγερσης κατοικιών και βιομηχανιών σε περιοχές που δύναται να πληγούν από πλημμύρες. Επίσης θα πρέπει να προσαρμόζονται τα μελλοντικά σενάρια πλημμυρικού κινδύνου με βάση τις αλλαγές στις γεωργικές και δασοκομικές πρακτικές (χρήσεις γης).

β) *Την προστασία, δηλαδή τη λήψη μέτρων, διαρθρωτικών και μη, για τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων και των μετέπειτα επιπτώσεων αυτών σε συγκεκριμένες περιοχές.*

γ) *Την ετοιμότητα, δηλαδή την ενημέρωση του πληθυσμού για τους κινδύνους των πλημμύρων και τον τρόπο αντίδρασης σε περίπτωση πλημμύρας.*

δ) *Την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης με την ανάπτυξη σχεδίων εκτάκτου ανάγκης στην περίπτωση δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων.*

ε) *Την αποκατάσταση των συνεπειών το ταχύτερο δυνατόν και το μετριασμό, τόσο των κοινωνικών, όσο και των οικονομικών επιπτώσεων στον πληγέντα πληθυσμό.*

Σε πρώτη φάση, σύμφωνα με την οδηγία 2007/60/EC, δύο είναι τα βασικά βήματα για τη μείωση των επιπτώσεων από τις πλημμύρες, σε επίπεδο λεκάνης απορροής:

1. Ο Προσδιορισμός των ευαίσθητων – επικίνδυνων σε πλημμυρικά φαινόμενα περιοχών και το είδος των εξειδικευμένων ενεργειών που απαιτούνται προκειμένου να καθοριστούν τα αντίστοιχα έργα - παρεμβάσεις. Ο προσδιορισμός των ευαίσθητων πλημμυρικών περιοχών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), μέσω της δημιουργίας χαρτών που θα περιγράφουν το βαθμό χωρικής επικινδυνότητας της εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η δημιουργία των παραπάνω χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με το συνδυασμό της κατάλληλης μεθοδολογίας και των δυνατοτήτων του GIS. Αναλυτικότερα ο τρόπος δημιουργίας των χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας καθώς και οι αντίστοιχες παρεμβάσεις για την άμβλυνση των επιπτώσεων από τις πλημμύρες θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας Διδακτορικής διατριβής.

2. Ανάπτυξη συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου. Βασική παράμετρος στη δημιουργία ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου είναι ο προσδιορισμός των θέσεων που θα τοποθετηθούν αντίστοιχα οι μετεωρολογικοί και υδρομετρικοί σταθμοί παρακολούθησης. Η μετάδοση των μετρήσεων θα πρέπει να γίνεται μέσω τηλεμετρικού δικτύου, ώστε σε πραγματικό χρόνο να γνωρίζουμε τις παραμέτρους – συνθήκες που επικρατούν στη λεκάνη απορροής. Θα πρέπει επίσης να υπάρξει πρόβλεψη ώστε το όλο σύστημα να μπορεί να δουλέψει και ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης (Warning System), για την άμεση ανταπόκριση του κρατικού μηχανισμού στην περίπτωση πλημμυρικών γεγονότων.

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος προειδοποίησης για πλημμύρες εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης, την επεξεργασία της πρόβλεψης σε προειδοποίηση, καθώς επίσης και από την ερμηνεία της προειδοποίησης από τους αρμόδιους φορείς που τη λαμβάνουν. Οι περισσότερες επιστημονικές αναλύσεις δίνουν έμφαση στο γεγονός ότι η βέλτιστη μεθοδολογία πρόβλεψης πλημμυρών [Flood Forecasting Methodology (FFM)] πρέπει να καθορίζει την πλημμυρική απειλή με μια έγκαιρη μέθοδο (Ford, 2001). Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια – εγκυρότητα των προβλέψεων μας, όσον αφορά τα πλημμυρικά φαινόμενα σε επίπεδο λεκάνης απορροής, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα τη δημιουργία των πλημμυρών, όπως είναι: α) η χωρική συνεισφορά της βροχοπτώσης, β) η διαμόρφωση της απορροής, γ) η πιθανή πορεία του πλημμυρικού κύματος και δ) η διαδικασία τήξης του χιονιού στους ορεινούς όγκους. Είναι λοιπόν προφανής η σημασία της γνώσης σε πραγματικό χρόνο των ύδρο-μετεωρολογικών συνθηκών, που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος πρόβλεψης έχει άμεση σχέση με τη γνώση των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης απορροής και τη δυνατότητα της ακριβούς προσομοίωσης των ιδιαίτερων υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν μέσα σε αυτή (Σακκάς, 1992). Βάση αυτών, η έγκαιρη πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων απαιτεί την ακριβή μελέτη της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής μέσω της αλληλεπίδρασης βροχής, εδαφικής υγρασίας και διάδοσης ροής είτε αυτή είναι επιφανειακή είτε υπόγεια. Γνωρίζοντας έτσι με περισσότερη λεπτομέρεια την ατμοσφαιρική-

εδαφική μεταβολή μπορούμε να ερμηνεύσουμε ικανοποιητικότερα τους μηχανισμούς γένεσης των πλημμυρικών φαινομένων.

Ειδικότερα, όσον αφορά την προσομοίωση των απορροών και τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος, η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα γενικότερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, θα δώσουν χρήσιμες πληροφορίες – δεδομένα τα οποία μέσω των υδρολογικών μοντέλων ή μέσω του συνδυασμού αυτών με μοντέλα πρόβλεψης πλημμυρών, θα βοηθήσουν στην έγκαιρη πρόβλεψη ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος. Παράλληλα με τη χρήση υδραυλικών μοντέλων μπορεί να μελετηθεί αποκλειστικά η πορεία του πλημμυρικού κύματος μέσα σε ένα συγκεκριμένο κρίσιμο τμήμα της λεκάνης απορροής (CNS Scientific and Engineering Services, 1991).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας Διδακτορικής διατριβής θα αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης της υδρολογικής συμπεριφοράς πολύπλοκων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πακέτου υδρολογικής προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν στο Κεφάλαιο 5 για τη δημιουργία και οργάνωση ενός έγκαιρου συστήματος πρόβλεψης πλημμυρικών φαινομένων σύμφωνα και με την νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία για την αξιολόγηση των πλημμυρών. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 θα εκτιμηθεί η οικονομική ζημιά που δύναται να δημιουργηθεί από ένα ενδεχόμενο μεγάλο πλημμυρικό φαινόμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ & ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΥ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

2.1.1. Τρόπος επιλογής

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης, πρόβλεψης και αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, σύμφωνα και με την οδηγία 2007/60 ΕΚ, απαραίτητος ήταν ο προσδιορισμός της περιοχής μελέτης. Η επιλογή της λεκάνης απορροής ποταμού, βασίστηκε στα εξής κριτήρια:

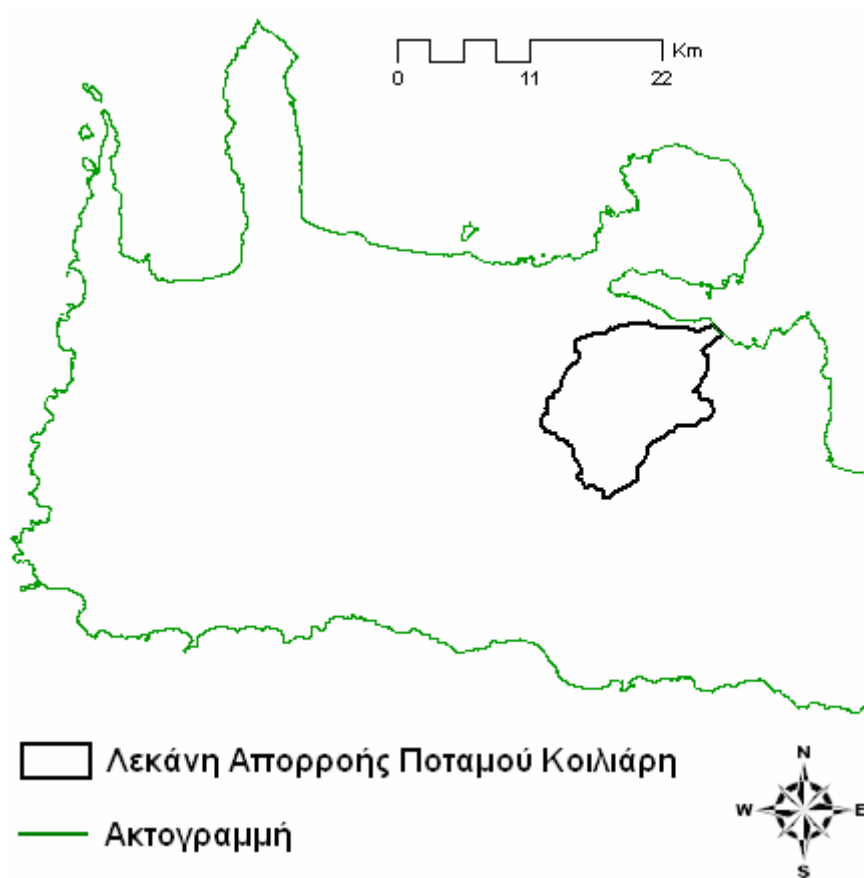
α) Στη σύνθετη Γεωμορφολογία, έτσι ώστε το προτεινόμενο διαχειριστικό πλαίσιο μοντελοποίησης πλημμυρικών φαινομένων να λαμβάνει υπόψη του όλες εκείνες τις πολύπλοκες υδρογεωλογικές συνθήκες που επηρεάζουν τη δημιουργία και την ένταση των διαφόρων ειδών πλημμύρας. Βάση αυτού, το δημιουργούμενο ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης, πρόβλεψης και αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε απλές όσο και σε πιο σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, συμβάλλοντας έτσι στην αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου σε Ευρωπαϊκό αλλά και σε Παγκόσμιο επίπεδο.

β) Στην αυξημένη Πλημμυρική Επικινδυνότητα. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 1, ο Ν. Χανίων, εμφανίζει τη μεγαλύτερη πλημμυρική επικινδυνότητα, σε σχέση με τους άλλους Νομούς της Κρήτης και από τις μεγαλύτερες στον Ελλαδικό χώρο.

Με βάση τα παραπάνω η πειραματική περιοχή – λεκάνη απορροής που επιλέχτηκε ήταν αυτή του ποταμού Κοιλιάρη, στο Ν. Χανίων. Αναλυτικότερα:

2.1.2. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

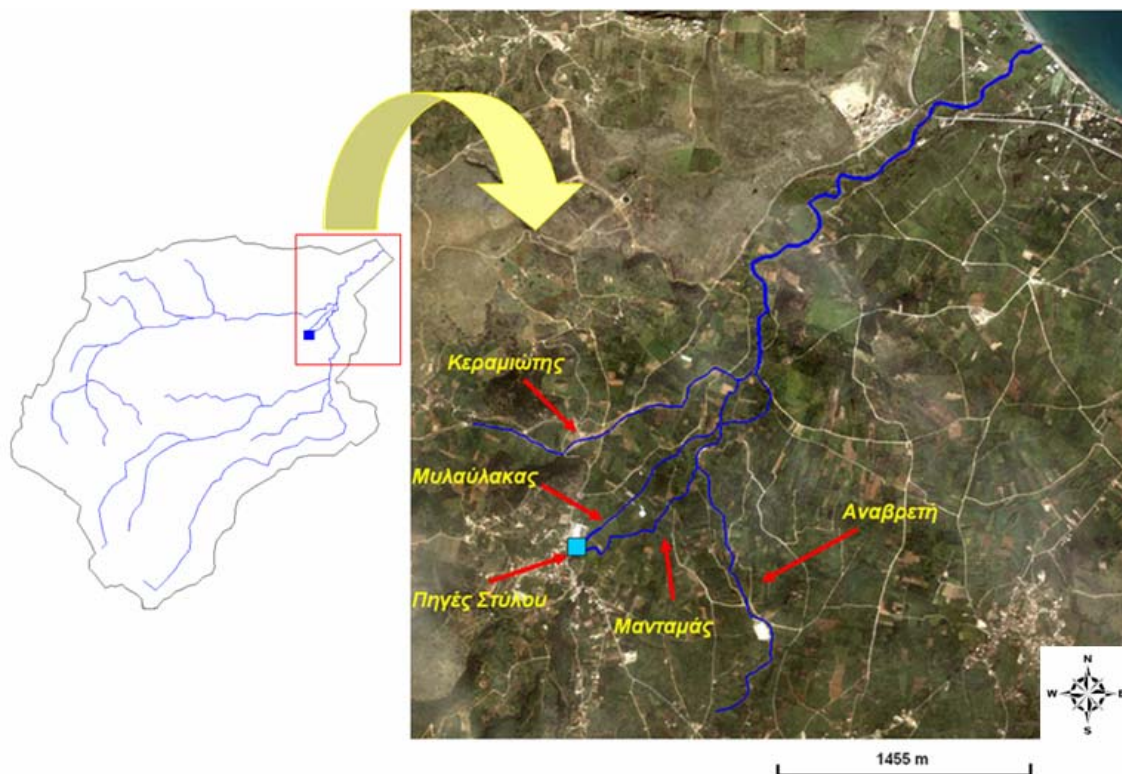
Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη βρίσκονται στα ανατολικά του Βόριου τμήματος του Ν. Χανίων (Εικόνα 2.1). Η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής συμβάλλει καταλυτικά στην διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του Ν. Χανίων.



Εικόνα 2. 1. Γεωγραφική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, στο Ν. Χανίων.

Η λεκάνη απορροής εκτείνεται από τους πρόποδες των Λευκών Ορέων μέχρι την παράκτια ζώνη του δήμου Αρμένων. Περιλαμβάνει 17 κοινότητες, εκ των οποίων οι 8 είναι πεδινές, οι 2 ημιορεινές και οι 7 ορεινές. Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Κοιλιάρη είναι 36 km. Η έκταση

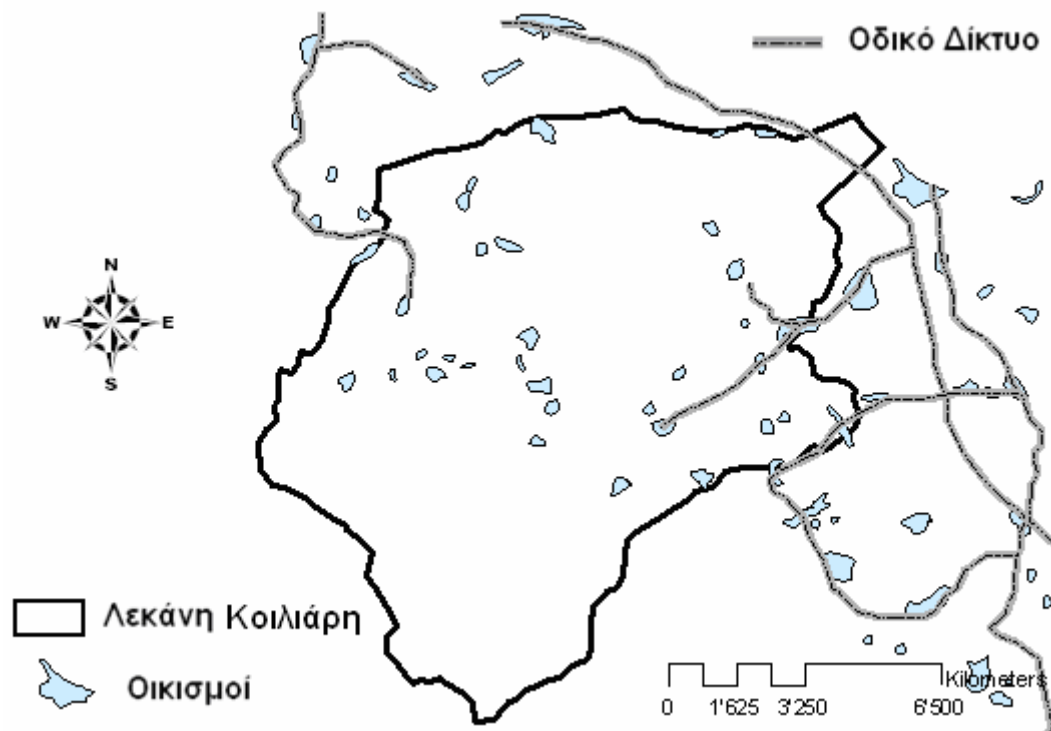
της λεκάνης απορροής υπολογίστηκε με τη χρήση του GIS στα 130 km². Ο ποταμός Κοιλιάρης τροφοδοτείται, όπως και οι περισσότερες λεκάνες απορροής του Νομού Χανίων, από ποσότητες υδάτων όπου προέρχονται από τα Λευκά Όρη. Τον απαρτίζουν 4 παραπόταμοι εκ των οποίων οι 2 χαρακτηρίζονται ως προσωρινά υδατορεύματα (Κεραμιώτης και Αναβρέτης), ενώ ο Μυλαύλακας και ο Μανταμάς έχουν μόνιμη ροή (από τις πηγές του Στύλου) καθόλη τη διάρκεια του έτους, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως μόνιμα υδατορεύματα (Εικόνα 2.2).



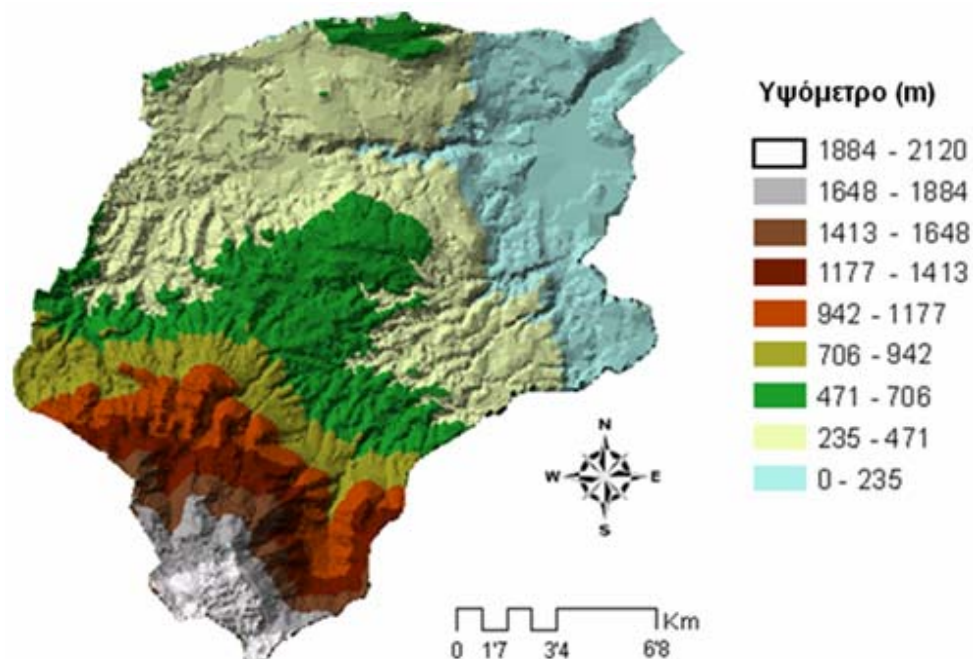
Εικόνα 2. 2. Υδρογραφικό δίκτυο και οι παραπόταμοι του ποταμού Κοιλιάρη.

Από το σημείο ένωσης όλων των παραπόταμων μέχρι τις εκβολές του ποταμού Κοιλιάρη το μήκος του είναι 3.3 km (Εικόνα 2.2). Η γεωγραφική έκταση των οικισμών καθώς και το οδικό δίκτυο της περιοχής ενδιαφέροντος περιγράφονται στην Εικόνα 2.3. Η λεκάνη απορροή εκτείνεται από την ακτογραμμή ως και το υψόμετρο των 2041 m. (Εικόνα 2.4). Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής ποικίλοι με μέση τιμή κλίσης της τάξης του 12%. Αναλυτικότερα, στους πρόποδες των Λευκών Ορέων η μέγιστη τοπογραφική κλίση φτάνει το 43%, ενώ σε πολύ μεγάλα υψόμετρα η τοπογραφική κλίση μπορεί να φτάσει και το 90%. Στην πεδινή έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οι κλίσεις είναι αρκετά μικρές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή των πηγών του Στύλου, όπου η κλίση είναι της τάξης του 1 με 2%.

Μάλιστα σε βορειότερο τμήμα του ποταμού, όπου βρίσκεται η συμβολή όλων των παραποτάμων του Κοιλιάρη, η κλίση είναι της τάξης του 0,6%.

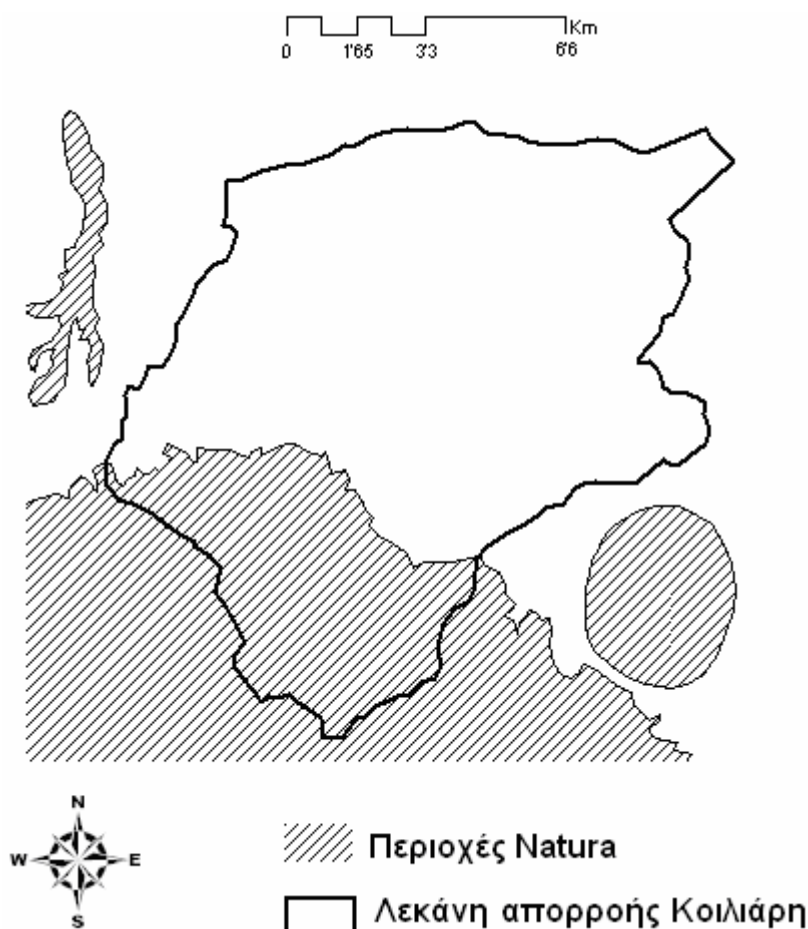


Εικόνα 2. 3. Χωρική απεικόνιση των Οικισμών και του Οδικού Δικτύου της Λεκάνης Απορροής του Κοιλιάρη.



Εικόνα 2. 4. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Θα ήταν σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι ένα μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (ορεινός όγκος) ανήκει σε προστατευόμενες περιοχές (Natura 2009), Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2. 5. Περιοχές Natura εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

2.1.3. Γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαρτίζουν τη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη είναι οι εξής (Βοζινάκης και Κουγιάννη, 2004):

Ανθρακικά πετρώματα - Μακροπερατά: Στο Νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη εντοπίζονται ανθρακικά πετρώματα, δηλαδή στο νότιο μέρος των οικισμών Ράμνης, Κάμπων, Πλατυβόλα, Δρακόνα, Μελιδονίου, Καρών καθώς και στο βόρειο-κεντρικό τμήμα της λεκάνης (Εικόνα 2.6). Τα καρστικά πετρώματα είναι έντονα υδατοπερατά, αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα. Με την επίδραση κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας και το σχηματισμό ανθρακικού οξέος σε συνδυασμό με το νερό,

ο ασβεστόλιθος αποσαθρώνεται χημικά, διευρύνοντας τις ασυνέχειες και σχηματίζοντας κενά (έγκοιλα).

Νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα - Μικροπερατά: Είναι υδατοπερατοί σχηματισμοί, που παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου βρίσκονται οι οικισμοί Πεμονίων, Παιδοχωρίου, Μαχαιρών, Νέου χωρίου και Καλυβών, επίσης εντοπίζονται στο βορειοδυτικό τμήμα και στο βόρειο τμήμα, παραλιακά της λεκάνης απορροής.

Φλύσχης - Αδιαπέρατα: εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης. Τα κύρια πετρώματα της ακολουθίας του φλύσχη είναι ο ψαμμίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, η μάργα καθώς και ο ιλυόλιθος, ωστόσο μπορούν να παρουσιάσουν άργιλοι, ασβεστόλιθοι κ.α. Γενικά είναι μη υδατοπερατοί σχηματισμοί. Παρακάτω ακολουθεί ο γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, ο οποίος δημιουργήθηκε με τη χρήση GIS (Εικόνα 2.6).



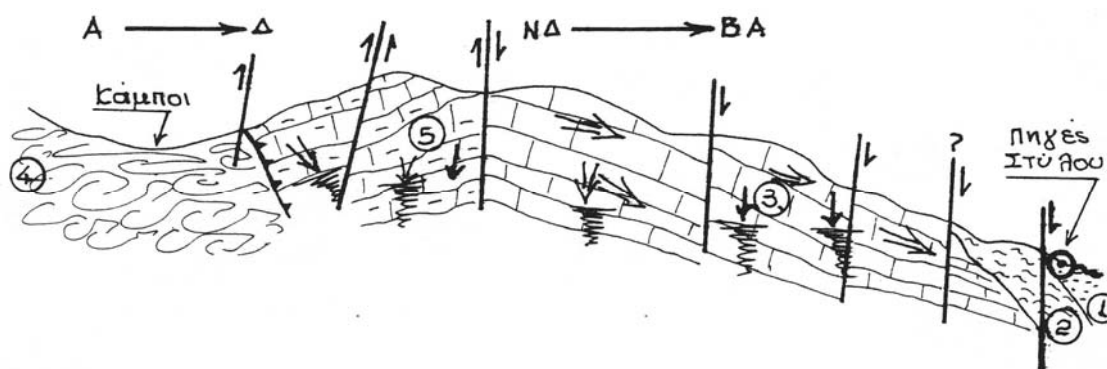
Εικόνα 2. 6. Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

2.1.4. Υδρογεωλογία λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

Η βασική ροή των ποταμών και των ρεμάτων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού προέρχεται σε πολλές περιοχές στην Ελλάδα από καρστικές πηγές. Σε αυτές τις περιοχές η άντληση νερού από το καρσι συνδέεται στενά με τις χαμηλές συνθήκες ροής στο ποτάμι, το οποίο κατά συνέπεια επηρεάζει την οικολογική ποιότητα των ποταμών.

Το όλο σύστημα του ποταμού Κοιλιάρη τροφοδοτείται κατά κύριο λόγο από τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρυπαλίου και τους πλακώδεις ασβεστόλιθους και σε μικρότερη κλίμακα από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, οι οποίοι βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με το παλαιότερο καρσικό σύστημα. Η κυρίως τροφοδοσία των πηγών του ποταμού Κοιλιάρη γίνεται από το καρστικό ασβεστολιθικό σύστημα των Λευκών Ορέων.

Οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Νεογενούς είναι άλλο ένα σύστημα που τροφοδοτεί τον ποταμό Κοιλιάρη, μιας και από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους υπάρχει άμεση απορροή. Μάλιστα οι πηγές που αναβλύζουν στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη εμφανίζονται στην επαφή των αλλουβιακών προσχώσεων με τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Σε μικρότερη κλίμακα συναντώνται και ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης καθώς και φυλλίτες-χαλαζίτες (Εικόνα 2.7).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ:

- 1) Τεταρτογενείς προσχώσεις
- 2) Νεογενή (Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι)
- 3) Ασβεστόλιθοι Δολομίτες του καλύμματος της Τρίπολης
- 4) Φυλλίτες-Χαλαζίτες
- 5) Κρυσταλλικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι

Εικόνα 2. 7. Σκαριφηματική γεωλογική τομή ανάντη των πηγών Στύλου.

(Χατζηθεοκάρους, 2005)

Στον ορεινό όγκο των Λευκών Ορέων κυριαρχούν τα ανθρακικά πετρώματα δύο βασικών γεωλογικών συστημάτων (Βοζινάκης και Κουγιάννη, 2004):

(α) του αυτόχθονου συστήματος (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι)

(β) των τεκτονικών καλυμμάτων του Τρυπαλίου και της Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, ανακρυσταλλομένοι ασβεστόλιθοι).

Τη μεγαλύτερη συγκριτικά έκταση καταλαμβάνουν τα ανθρακικά του υποβάθρου (αυτόχθονου συστήματος) και τη μικρότερη αυτά του καλύμματος Τρυπαλίου τα οποία εμφανίζονται σε μεγάλα υψόμετρα και σε άμεση επαφή με το υπόβαθρο.

Η περατότητα των πετρωμάτων σε συνδυασμό με τη γενική δομή των Λευκών Ορέων συντελούν στην ανάπτυξη υπόγειων υδροφοριών με πολύ μεγάλο υδατικό δυναμικό. Μάλιστα στην περιοχική μελέτη εμφανίζεται μια πληθώρα υπόγειων υδροφοριών. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι τα πλούσια μετεωρολογικά κατακρημνίσματα που δέχεται το ορεινό συγκρότημα (βροχές και χιόνια) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πλούσια υδροφορία της περιοχής.

Δευτερεύοντα ρόλο στο υδατικό δυναμικό παίζουν και οι άμεσες απορροές των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων λόγω των μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Αποτέλεσμα αυτών των υδροφοριών είναι οι αναβλύσεις πηγών σημαντικής παροχής σε ορισμένες ζώνες στη βάση του ορεινού όγκου. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες των διαφόρων τμημάτων του ορεινού συγκροτήματος διοχετεύεται το νερό σε περιφερειακές υπόγειες υδροφορίες σε χαμηλότερο υψόμετρο και στη συνέχεια τροφοδοτούνται γνωστές πηγές και γεωτρήσεις, μερικές από τις οποίες βρίσκονται και στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.



Εικόνα 2. 8. Κατεύθυνση υπογείων υδάτων και πηγές εκφόρτισης.

Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη έχουν καταγραφεί τόσο κύρια γεωλογικά ρήγματα όσο και μικρότερα δευτερεύοντα ρήγματα (Εικόνα 2.9). Μέσω των παραπάνω ρηγματιών η υπόγεια ροή, σε αρκετές περιπτώσεις, εκφορτίζεται στις διάφορες πηγές της λεκάνης (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2. 9. Γεωλογικά ρήγματα στη λεκάνη απορροής και οι πηγές στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Οι πηγές του Στύλου αναβλύζουν στα 17 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και παρουσιάζουν έντονες εποχιακές διακυμάνσεις στις εκφορτίσεις τους. Οι μέσες ετήσιες εκφορτίσεις των πηγών του Στύλου προσεγγίζονται στα $68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ (υδρολογικά έτη 1970-2001). Το 89% της συνολικής παροχής εντοπίζεται στην περίοδο Νοεμβρίου – Ιουνίου. Υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις ότι οι πηγές έχουν τόσο ρυθμιστικό ταμιευτήρα όσο και μόνιμο ταμιευτήρα νερού. Η εμφάνιση των πηγών οφείλεται στην παρεμπόδιση της ροής του υπόγειου νερού του καρστικού υδροφορέα από τις μαργαϊκές (νεογενείς) αποθέσεις (εξαιτίας της τεκτονικής επαφής).

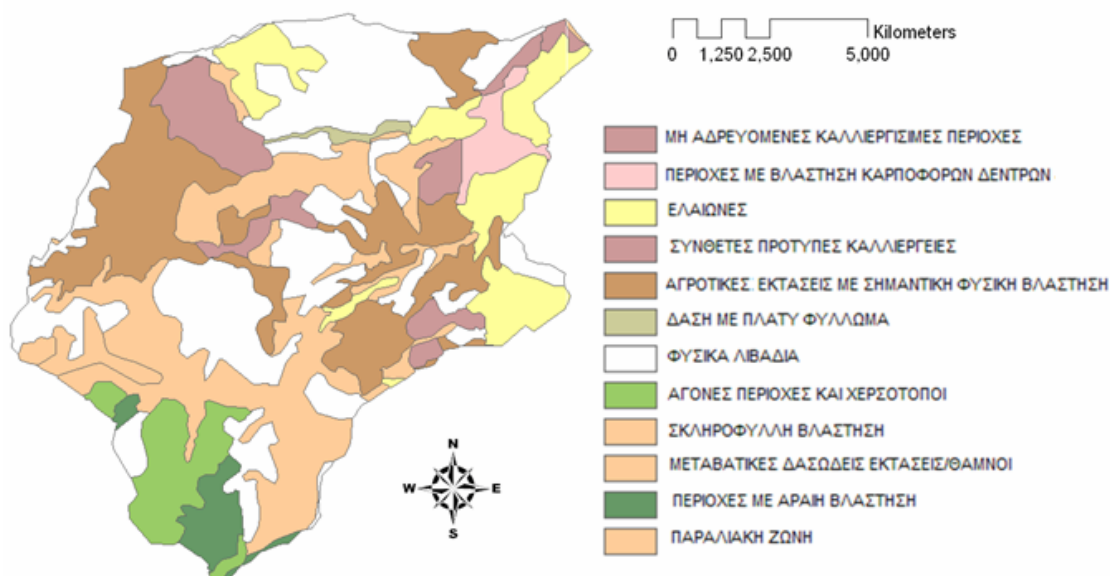
2.1.5. Χρήσεις γης

Με βάση στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας, του προγράμματος Corine 2000 καθώς και σύγχρονων αεροφωτογραφιών εκτιμηθεί ότι:

- το 58% (101 km²) των συνολικών χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη χαρακτηρίζονται ως βοσκότοποι (δημόσιοι ή ιδιωτικοί),
- το 29.4% (51 km²) ως καλλιεργούμενες εκτάσεις,
- το 2.8% (5 km²) ως οικιστικές περιοχές και δρόμοι,
- το 8.5% (14.8 km²) ως δάση,
- το 0.6% (1 km²) ως υδατικές επιφάνειες, και
- το 0.7% (0.9 km²) ως άλλες χρήσεις.

Επιπρόσθετα, στο πεδινό τμήμα της λεκάνης απορροής που διασχίζει ο ποταμός Κοιλιάρης προσδιορίστηκε ότι το 46% των συνολικών χρήσεων χρησιμοποιούνται ως βοσκότοποι.

Πρέπει να τονιστεί ότι στη λεκάνη απορροής δεν λειτουργούν μεγάλες βιομηχανίες, ενώ υπάρχει ένας μικρός αριθμός βιοτεχνιών & ελαιοτριβείων (12). Οι γεωργικές καλλιέργειες της περιοχής κατά κύριο λόγο είναι ελαιόδεντρα, εσπεριδοειδή και αμπέλια, (Corine 2000). Στην Εικόνα 2.10, που ακολουθεί, περιγράφονται οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, οι οποίες και δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον GIS.



Εικόνα 2. 10. Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Επίσης με τη συνδυασμένη χρήση του GIS και του προγράμματος Corine 2000, προσδιορίστηκε ότι το 61.6% της γεωργικής γης χρησιμοποιείται για τη καλλιέργεια ελιάς, το 6.4% για εσπεριδοειδή, το 5.2% για αμπέλια και το 2.6% ως γη λαχανόκηπων. Η χωρική κατανομή των καλλιεργούμενων εσπεριδοειδών και αμπελιών είναι ιδιαίτερα υψηλή στις πεδινές περιοχές της λεκάνης απορροής. Αντίθετα στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές η καλλιέργεια ελαιόδεντρων αποτελεί την πρωτεύουσα χρήση της γεωργικής γης

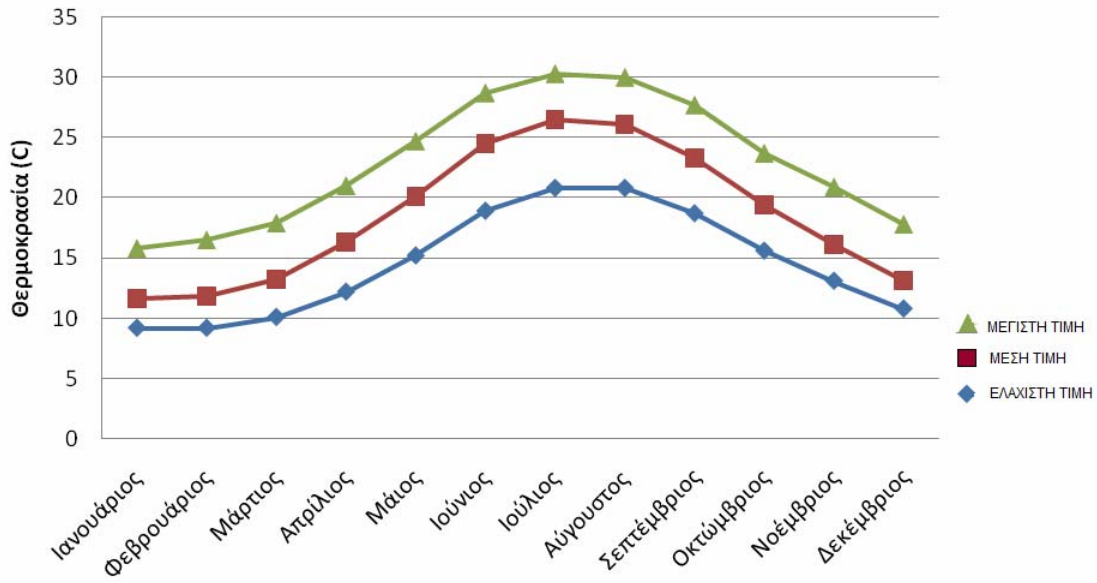
2.1.6. Κλιματολογικά χαρακτηριστικά

Το κλίμα της περιοχής μελέτης είναι ημί-ξηρο και χαρακτηρίζεται από βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις (σε μεγάλα υψόμετρα) τους χειμώνες και θερμά και ξηρά καλοκαίρια, στα οποία η εξατμισοδιαπνοή ξεπερνά τη βροχόπτωση και έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό υδατικό έλλειμμα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο βόρειο τμήμα της λεκάνης είναι 705 mm (χαμηλά υψόμετρα), ενώ στο νότιο τμήμα είναι 2125 mm (ορεινή ζώνη), (Καλογεράκη, 2009).

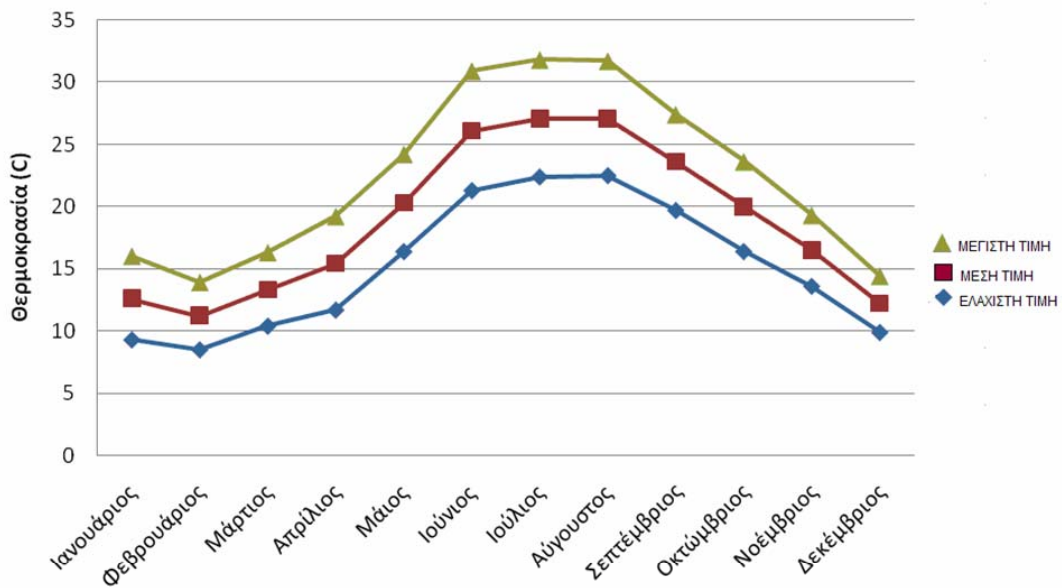
Τα διαφορά μετεωρολογικά στοιχεία, για τη χρονική περίοδο μέχρι και το 2007, συλλέγονταν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς Καλυβών (υψόμετρο 24 m) και Σούδας (υψόμετρο 150 m), (Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων, της Νομαρχίας Χανίων).

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα τελευταία χρόνια, από το 1989 και μετά, παρατηρείται μια ελάττωση του μέσου ύψους βροχόπτωσης σε επίπεδα κάτω του μέσου όρου των προηγούμενων ετών ενώ και η θερμοκρασία εμφανίζει μικρή πτώση με μέσες ετήσιες τιμές της τάξης των 19 °C. Το σύνολο των κατακρημνίσεων λαμβάνει χώρα μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου-Μαρτίου, ενώ οι πιο ξηροί μήνες χαρακτηρίζονται οι Ιούλιος και Αύγουστος. Στο μεγαλύτερο τμήμα της πεδινής περιοχής δεν παρατηρούνται χιονοπτώσεις λόγω του σχετικά μικρού υψομέτρου, στους ορεινούς όμως όγκους της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη παρατηρούνται σημαντικές ποσότητες χιονοκάλυψης για αρκετούς μήνες του χρόνου.

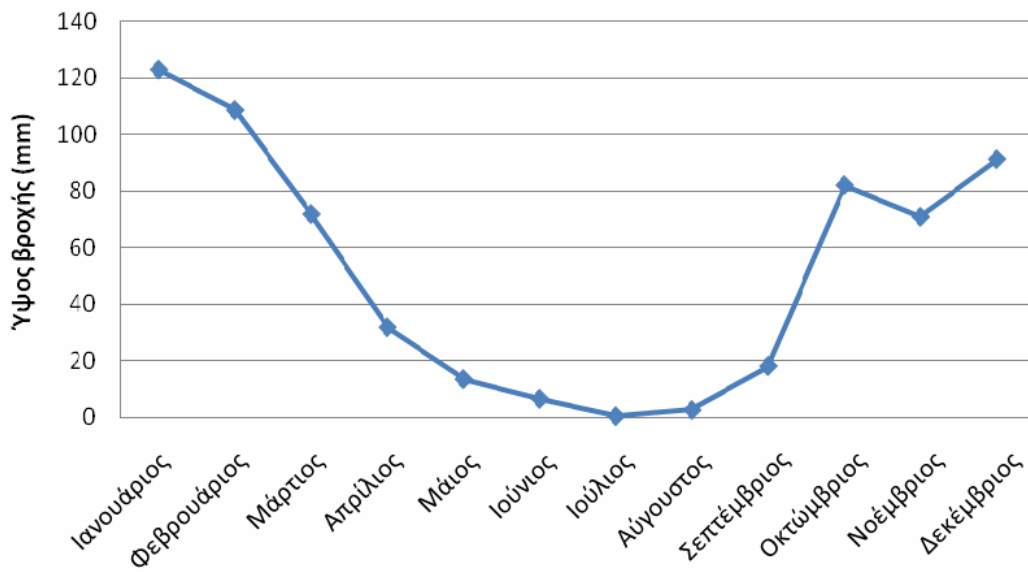
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με στοιχεία για τη θερμοκρασιακή μεταβολή (Εικόνες 2.11 και 2.12) και το ύψος των βροχοπτώσεων (Εικόνες 2.13 και 2.14) από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας.



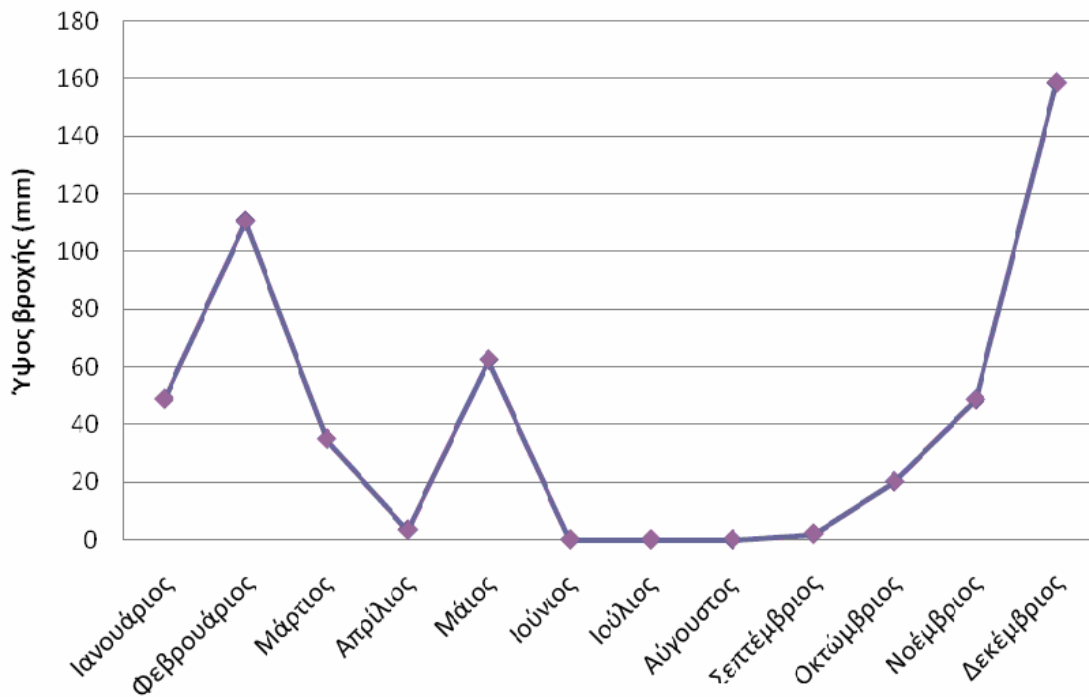
Εικόνα 2. 11. Οριακές και μέσες τιμές θερμοκρασίας από το 1958 έως 1997.



Εικόνα 2. 12. Οριακές και μέσες τιμές θερμοκρασίας το 2007.



Εικόνα 2. 13. Μέσες τιμές βροχόπτωσης από το 1958 έως 1997.



Εικόνα 2. 14. Μέσες τιμές βροχόπτωσης το 2007.

2.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ

Από το 1975 στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη λειτουργεί ο μετεωρολογικός σταθμός M3 (Καλύβες - Kalybes) στην ομώνυμη περιοχή, ($35^{\circ} 27'$, $24^{\circ} 10'$) και σε υψόμετρο 24 m MSL. Επίσης από το 2005 βρίσκεται σε λειτουργία ο τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός H1 (Άγιος Γεώργιος- Agios Georgios), ($35^{\circ} 26' 33''$, $24^{\circ} 08'$) και σε υψόμετρο 20m MSL, ο συγκεκριμένος υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται τοποθετημένος στο σημείο που ενώνονται όλοι οι παραπόταμοι του ποταμού Κοιλιάρη, (Εικόνα 2.15) και συγκεκριμένα 3.3 km από το σημείο εκβολής του.



Εικόνα 2. 15. Σημείο ένωσης όλων των παραπόταμών της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Είναι προφανές ότι ο συγκεκριμένος τηλεμετρικός σταθμός καταγράφει την ολική ποσότητα ύδατος που απορρέει είτε επιφανειακά είτε υπόγεια από το ανάντη τμήμα της λεκάνης.

Τον Ιούλιο του 2007 στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου FLOODMED έγινε εγκατάσταση δύο επιπλέον τηλεμετρικών μετεωρολογικών και δυο τηλεμετρικών υδρομετρικών σταθμών (Εικόνα 2.16).

Το Ευρωπαϊκό έργο FLOODMED:

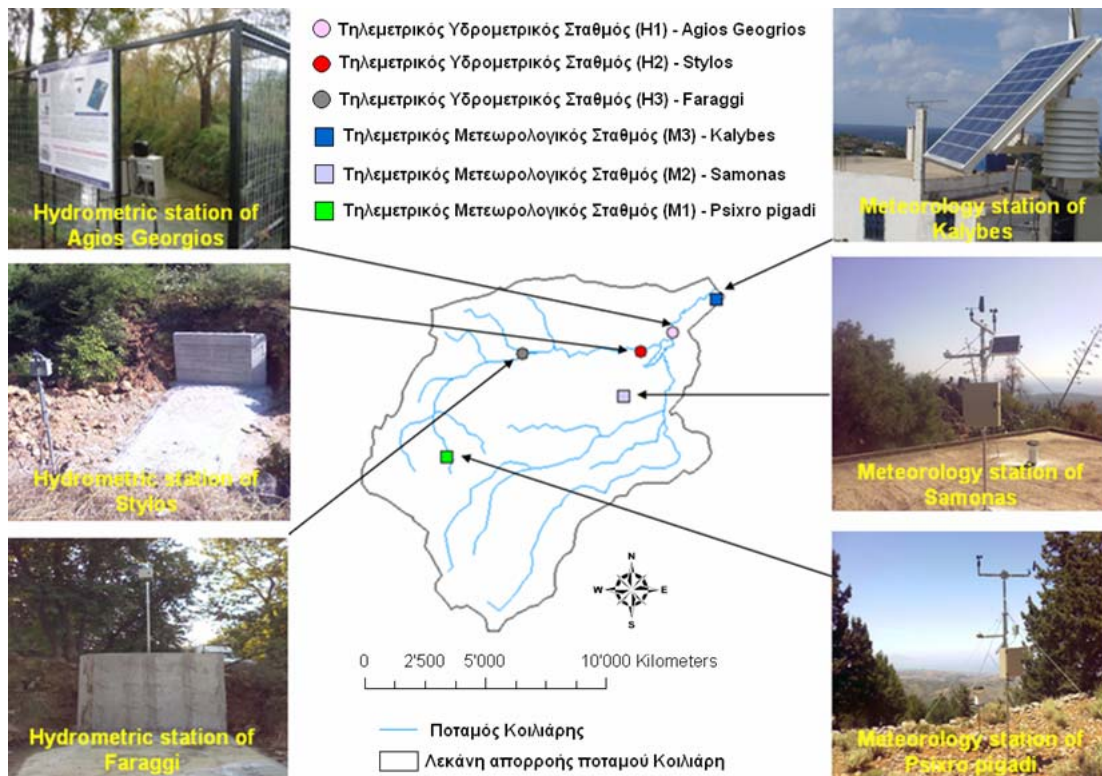
Παρακολούθηση, πρόγνωση και καλές πρακτικές με στόχο την πρόληψη και τον περιορισμό των πλημμυρών σε περιοχές Κεντρικής Ευρώπης, Αδριατικής, Παραδουνάβιας και Νοτιοανατολικής Ευρώπης.

Το έργο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στα πλαίσια της Κοινοτικής Πρωτοβουλίας INTERREG IIIB CADSES 2000-2006.

Οι δύο τηλεμετρικοί υδρομετρικοί σταθμοί τοποθετήθηκαν στρατηγικά στον παραπόταμο Κεραμιώτη στην είσοδο και την έξοδο του καρστικού φαραγγίου του Δικτάμου. Ο λόγος τοποθέτησης των σταθμών στα συγκεκριμένα σημεία είναι πρώτον το γεγονός ότι το γεωλογικό υπόβαθρο ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο του φαραγγίου είναι καρσικό και είναι πολύ σημαντική η μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου τμήματος και κατά δεύτερο και σημαντικότερο λόγο διότι η αυξημένη παροχή στον παραπόταμο Κεραμιώτη ευθύνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό για πλημμυρικά φαινόμενα στα κατάντη.

Στην είσοδο του φαραγγίου κατασκευάστηκε ο τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός Η3 με την ονομασία Φαράγγι - Faraggi, ($35^{\circ} 26' 24''$, $24^{\circ} 04'$) και σε υψόμετρο 210 m MSL. Το δημοτικό διαμέρισμα στο οποίο ανήκει ο συγκεκριμένος σταθμός είναι ο Δήμος Κεραμιών. Στην έξοδο του φαραγγίου (Εικόνα 2.17), κατασκευάστηκε ο δεύτερος τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός Η2 με την ονομασία Στύλος - Stylos, ($35^{\circ} 26' 38''$, $24^{\circ} 07'$) και σε υψόμετρο 30m MSL. Το δημοτικό διαμέρισμα στο οποίο ανήκει ο συγκεκριμένος σταθμός είναι ο Δήμος Αρμένων, Εικόνα 2.16.

Όσον αφορά τους δυο τηλεμετρικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, ο πρώτος, μετεωρολογικός σταθμός Μ2 εγκαταστάθηκε στην περιοχή Σαμωνάς - Samonas, ($35^{\circ} 25' 23''$, $24^{\circ} 06'$) και σε υψόμετρο 385m MSL. Ο σταθμός αυτός ανήκει στο δημοτικό διαμέρισμα του Δήμου Αρμένων (Εικόνα 2.18). Ο δεύτερος τηλεμετρικός μετεωρολογικός σταθμός Μ1 εγκαταστάθηκε στην περιοχή Ψυχρό Πηγάδι - Psixro Pigadi, ($35^{\circ} 23' 62''$, $24^{\circ} 02'$) και σε υψόμετρο 1000 m MSL. Το δημοτικό διαμέρισμα στο οποίο ανήκει είναι ο Δήμος Κεραμιών (Εικόνα 2.19). Οι δύο νέοι τηλεμετρικοί μετεωρολογικοί σταθμοί καθώς επίσης και ο πρώτος μετεωρολογικός σταθμός Μ3 (Καλυβών), τοποθετήθηκαν στα παραπάνω σημεία, για να έχουμε πιο αξιόπιστα και πιο αντιπροσωπευτικά μετεωρολογικά δεδομένα σε σχέση με τη χωροταξία και την υψομετρική διαβάθμιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, Εικόνα 2.16.



Εικόνα 2. 16. Υδρομετεωρολογικό δίκτυο στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.



Εικόνα 2. 17. Ο παραπόταμος Κεραμιώτης στο σημείο εξόδου από το φαράγγι του Δικτάμου.



Εικόνα 2. 18. Μετεωρολογικός σταθμός M2 (Υψόμετρο 385 m).

Οι τηλεμετρικοί μετεωρολογικοί και υδρομετρικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα μετάδοσης των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα των μετρήσεων που καταγράφουν μεταδίδονται και συγκεντρώνονται αυτόματα σε ένα κεντρικό υπολογιστή (PC), που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης. Από το συγκεκριμένο κεντρικό υπολογιστή (PC) γίνεται ασύρματη τηλεφωνική κλήση και επικοινωνία με τους σταθμούς, ακολουθεί η μεταφορά και η συγκέντρωση των δεδομένων (στοιχείων) από τους διάφορους σταθμούς στη μνήμη του κεντρικού PC. Μετέπειτα πραγματοποιείται η αξιολόγηση των δεδομένων και η είσοδος τους σε υδρολογικά μοντέλα,

προκειμένου να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για το υδατικό δυναμικό της λεκάνης απορροής και τον τυχόν κίνδυνο ή όχι πλημμυρικού φαινομένου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Για λόγους ασφάλειας, στους παραπάνω σταθμούς, έγινε εγκατάσταση σταθερής περίφραξης με προστατευτικό ανοξείδωτο μεταλλικό πλέγμα. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε καμπάνια ενημέρωσης των αρμοδίων φορέων (Δήμοι, Κοινότητες) καθώς και των κατοίκων της περιοχής, μέσω ενημερωτικών φυλλαδίων ή μέσω άμεσης επαφής, προκειμένου να ενημερωθούν για την αναγκαιότητα ύπαρξης των παραπάνω σταθμών. Η κατευθυντήρια γραμμή της ενημέρωσης αφορούσε στην κατανόηση ότι η γνώση σε πραγματικό χρόνο του υδατικού δυναμικού (επιφανειακού και υπογείου) της ευρύτερης περιοχής, θα βοηθήσει στην ορθότερη διαχείριση του ύδατος κατά τους καλοκαιρινός μήνες αλλά και στην πρόβλεψη και αποφυγή των καταστροφικών συνεπειών από τυχόν πλημμυρικά φαινόμενα κατά τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου.



Εικόνα 2. 19. Μετεωρολογικός σταθμός M1 (Υψόμετρο 1000 m).

Τέλος σε κάθε τηλεμετρικό σταθμό τοποθετήθηκε ειδική σήμανση, η οποία αναφέρει τον τύπο του σταθμού, το φορέα διαχείρισης αυτού και το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα χρηματοδότησης (Εικόνα 2.20).



Εικόνα 2. 20. Ειδική σήμανση που τοποθετήθηκε στους τηλεμετρικούς σταθμούς.

2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΔΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

2.3.1. Γενικά

Η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης κινδύνου πλημμυρικών φαινομένων μπορεί να πετύχει με την εφαρμογή διεθνών μεθοδολογιών και μοντέλων εκτίμησης πλημμυρών και πρόβλεψης αυτών. Όσον αφορά τα μοντέλα η αξιοπιστία εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια των υδρομετεωρολογικών δεδομένων και κυρίως από την παροχή που υπολογίζεται από μετρήσεις της ροής. Η κύρια δυσκολία για την εκτίμηση της παροχής στα φυσικά κανάλια είναι η σύνδεση της με τη διαθεσιμότητα των τιμών ταχύτητας όσον αφορά την τμηματική έρευνα του βάθους στο ποτάμι. Στην πράξη, η ροή του ποτάμιου συστήματος εκτιμάται, από τοπικούς σταθμούς και μετατρέπεται σε παροχή διαμέσου μιας καμπύλης μετατροπής. Είναι απαραίτητο σε αυτό το σημείο να αναφερθούμε στις μεθόδους μέτρησης παροχής που χρησιμοποιούνται στην υδρολογική πρακτική για την εκτίμηση της παροχής και της ταχύτητας κατά τη διάρκεια μεγάλων πλημμυρικών φαινομένων.

2.3.2. Παρακολούθηση του επιπέδου νερού σε ποτάμια

Η παροχή μπορεί να προσδιοριστεί είτε από μετρήσεις της ταχύτητας ροής σε μια τομή του ποτάμιου συστήματος είτε από τον προσδιορισμό της τοπικής στάθμης του ποταμού η οποία μπορεί να μετατραπεί σε παροχή μέσο μιας ακριβούς σχέσης στάθμης - παροχής που είναι ευρέως γνωστή ως καμπύλη

αξιολόγησης (rating curve). Η γνώση της καμπύλης αξιολόγησης αποκτάται από τη μέση ταχύτητα ροής και εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των πειραματικών δεδομένων οι οποίες πρέπει να αναφέρονται τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές ροές. Η εκτίμηση της παροχής μπορεί επίσης να γίνει με τη χρήση ηχητικών συχνοτήτων για τον καθορισμό του ρυθμού ροής. Αυτές οι μετρήσεις μπορεί να είναι είτε 'Doppler effects meters' ή 'Time of light'. Το πρώτο είδος μέτρησης ροής μετρά τη συχνότητα αλλαγής που προκαλείται από το υγρό, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί την ταχύτητα του σήματος 'ταξιδεύοντας' μεταξύ δυο αναμεταδοτών. Τέλος η χρήση δορυφορικών αισθητήρων ίσως βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη παρακολούθηση του επιπέδου νερού και την εκτίμηση της ταχύτητας (Barbetta et al., 2006).

Δυο βασικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του επιπέδου της στάθμης του νερού. Η άμεση μέθοδος η οποία περιλαμβάνει μετρήσεις της στάθμης του υγρού από μια οριακή γραμμή, και η έμμεση μέθοδος που εκτιμά το επίπεδο από κάποια άλλα χαρακτηριστικά. Για τη μέτρηση της στάθμης του ποταμού υπάρχουν α) οι μη καταγραφόμενες μετρήσεις (staff, chain, wire, weight, float-tape, electric-tape gauges). β) καταγραφόμενες μετρήσεις, οι οποίες αποτελούνται από ένα σύνολο οργάνων τα οποία καταγράφουν το ύψος της επιφάνειας του νερού σε σχέση με το χρόνο. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι είτε αναλογικά (γραφικά αποτελέσματα) είτε ψηφιακά. Όσα αφορά τους αισθητήρες μέτρησης του ύψους νερού είναι οι παρακάτω:

α) floater hydrometer, στον οποίο οι διακυμάνσεις του επιπέδου νερού μεταφέρονται σε μια συσκευή καταγραφής,

β) pressure transducer, ο οποίος μετατρέπει την πίεση του νερού τουτέστιν το επίπεδο αυτού σε ηλεκτρονικά σήματα,

γ) ultrasonic water level instrument, όπου χρησιμοποιείται ο υπερηχητικός ήχος των κυμάτων για να καθορίσει την απόσταση από την επιφάνεια του αισθητήρα στην επιφάνεια του νερού με τον χρόνο που κάνει το σήμα να επιστρέψει πίσω. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε ένα καθορισμένο σημείο πάνω από το επίπεδο του νερού,

δ) radar sensor, που είναι ένας νέος τύπος μέτρησης του επιπέδου του νερού, με πολλά πλεονεκτήματα στην υδρολογική πρακτική. Το όργανο στέλνει μικροκύματα στην επιφάνεια του νερού. Σε αντίθεση με τον υπερηχητικό

αισθητήρα η θερμοκρασία του αέρα δεν επηρεάζει τη μέτρηση του επιπέδου του νερού, κάνοντας έτσι κατάλληλο τον παραπάνω αισθητήρα για χρήση σε ποτάμια όπου υπάρχει μεγάλη αυξομείωση της αέριας θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του νερού και της τοποθεσίας του εξοπλισμού (Barbetta et al., 2006).

2.3.3. Μέτρηση της ταχύτητας και της παροχής των υδάτων στον ποταμό Κοιλιάρη και στον παραπόταμο Κεραμιώτη

Εκτός από τη στάθμη, για τον υπολογισμό της παροχής είναι αναγκαία και η μέτρηση της ταχύτητας των υδάτων του ποταμού. Ακριβώς γι' αυτό το σκοπό στους σταθμούς παρακολούθησης της στάθμης μετρήθηκε η υγρή διάμετρος του ποταμού και στη συνέχεια η ταχύτητα και έτσι βρέθηκε η παροχή του ποταμού με τρόπο που αναλύεται πιο κάτω. Οι μετρήσεις ταχύτητας έγιναν με δύο τύπων μηλίσκους. Ο μηλίσκος, για μικρές παροχές, μοντέλο FP 101 από την εταιρεία Global Water και ο μηλίσκος H-S OSS-B1 από την εταιρεία Hydrological Services.

Ο μηλίσκος FP 101 αποτελείται από ένα βραχίονα από ανοξείδωτο αλουμίνιο, στον οποίο ενσωματώνεται μεζούρα που αναγράφει μέτρα, εκατοστά και χιλιοστά. Ο μηλίσκος περιλαμβάνει ψηφιακή κεφαλή με δυνατότητα μέτρησης της ταχύτητας σε m/sec ή σε ft/sec. Το εύρος των τιμών της ταχύτητας που μπορεί να μετρήσει το όργανο κυμαίνεται από 0.5 m/sec έως και 0.01 m/sec. Η προπέλα του μηλίσκου βρίσκεται μέσα σε πλαστική προστατευτική θήκη διαμέτρου 2 ιντσών και αποτελείται και η ίδια από πλαστικό. Ο μηλίσκος FP101 χρησιμοποιήθηκε κυρίως κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου η στάθμη των υδάτων του ποταμού ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (Εικόνα 2.21).



Εικόνα 2. 21.Ο μηλίσκος FP101.

Αντίθετα με το μηλίσκο FP 101, ο μηλίσκος H-S OSS-B1 χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας σε μεγαλύτερες παροχές. Περιλαμβάνει ανοξείδωτο

ατσάλινο βραχίονα στον οποίο αναγράφονται μέτρα και εκατοστά. Το όργανο αποτελείται κυρίως από δύο τμήματα, την προπέλα και το μετρητή παλμών. Η προπέλα διαμέτρου 125 χιλιοστών, είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι. Στην Εικόνα 2.22, φαίνεται η διάταξη της προπέλας με το βραχίονα ενώ διακρίνονται και τα καλώδια που συνδέουν την προπέλα με το μετρητή. Οι μετρήσεις των παλμών που μας δίνει το όργανο έγιναν ανά 20 και ανά 10 δευτερόλεπτα για την ακριβέστερη εύρεση των τιμών της ταχύτητας.

Η ταχύτητα μετριόταν πάντα σε βάθος 60% από την επιφάνεια του νερού (Εικόνα 1, Παράρτημα Β), ενώ οι τύποι που μας δίνουν την ταχύτητα ροής είναι οι εξής:

$$\text{για } n < 0.24 \quad u = 0.3744n + 0.0230$$

$$\text{για } n > 0.24 \quad u = 0.4786n - 0.0017$$

όπου: (n) οι στροφές ανά δευτερόλεπτο και (u) η ταχύτητα σε m/sec.



Εικόνα 2. 22. Ο μηλίσκος H-S OSS-B1.

Τα σημεία που έγιναν οι μετρήσεις επιλέχθηκαν πλησίον των τριών εγκατεστημένων τηλεμετρικών υδρομετρικών σταθμών.

Αναλυτικότερα μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν:

Α) Στον Υδρομετρικό σταθμό Η1 (Άγιος Γεώργιος), σημείο στο οποίο συγκεντρώνονται όλοι οι παραπόταμοι του ποταμού Κοιλιάρη.

Β) Στον Υδρομετρικό σταθμό Η3 (Φαράγγι), σημείο εισόδου στο φαράγγι του Δικτάμου, παραπόταμος Κεραμιώτης.

Γ) Στον Υδρομετρικό σταθμό Η2 (Στύλος), σημείο εξόδου από το φαράγγι του Δικτάμου, παραπόταμος Κεραμιώτης.

Διατομές στους σταθμούς παρακολούθησης

Πέραν από τη γνώση της ταχύτητας ροής, για την εκτίμηση της παροχής του ποταμού απαιτείται η γνώση της γεωμετρίας της υγρής διατομής (εμβαδό) όπου διεξάγονται οι μετρήσεις. Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αυτόνομη καταγραφή της στάθμης των υδάτων του ποταμού Κοιλιάρη και του παραπόταμου Κεραμιώτη εγκαταστάθηκαν τρεις τηλεμετρικοί υδρομετρικοί σταθμοί παρακολούθησης. Για τον υπολογισμό των παροχών του ποταμού Κοιλιάρη και του παραπόταμου Κεραμιώτη, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των υγρών διατομών στα σημεία του υδατορεύματος στα οποία έχουν γίνει οι εγκαταστάσεις των σταθμών αυτών.

Στην Εικόνα 2.23 περιγράφεται η σχηματική διατομή του ποταμού Κοιλιάρη στο σταθμό παρακολούθησης H1 (Άγιος Γεώργιος). Στις Εικόνες 2.24, 2.25 αντίστοιχα παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση των διατομών του ποταμού Κεραμιώτη στους σταθμούς παρακολούθησης H2 και H3.

Τηλεμετρικός Υδρομετρικός Σταθμός (H1) “Agios Georgios”



Εικόνα 2. 23. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός H1 (Άγιος Γεώργιος) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του ποταμού, [Σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη].



Εικόνα 2. 24. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός Η2 (Στύλος) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του.



Εικόνα 2. 25. Τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός Η3 (Φαράγγι) και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του.

Υπολογισμός των παροχών στον ποταμό Κοιλιάρη και στον παραπόταμο Κεραμιώτη

Το μήκος της διατομής του υδατορεύματος στους δύο σταθμούς παρακολούθησης Η2 και Η3 (παραπόταμος Κεραμιώτης) χωρίστηκε σε μικρότερα τμήματα των 50 cm στα οποία μετρήθηκε το μέγιστο βάθος και πραγματοποιήθηκαν οι βυθίσεις του μυλίσκου, προκειμένου να προσδιοριστεί η ταχύτητα ροής. Οι μετρήσεις ταχύτητας έγιναν με τη χρήση και των δύο ειδών μηλίσκων, που αναλύθηκαν παραπάνω. Καθορίζοντας το εμβαδό κάθε τμήματος και μετρώντας τη μέση ταχύτητα ροής σε κάθε κατακόρυφο, υπολογίστηκε η συνολική παροχή της διατομής μετρήσεων, εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας σε κάθε τμήμα και αθροίζοντας τις επιμέρους παροχές.

Λόγω του ότι ο παραπόταμος Κεραμιώτης είναι υδατόρευμα διαλείπουσας ροής οι μετρήσεις υγρής διατομής, μέγιστου βάθους και ταχυτήτων ροής πραγματοποιήθηκαν κατά τη χειμερινή περίοδο των υδρολογικών ετών 2007-2009 και κατά τις χρονικές εκείνες στιγμές όπου υπήρχε τόσο υψηλή όσο και χαμηλή ροή στο ποτάμι.

Πιο αναλυτικά, λόγω του ότι οι χρονικές περίοδοι όπου υπήρχε ροή, κυρίως για το κομμάτι του παραπόταμου Κεραμιώτη το οποίο βρίσκεται στην έξοδο του φαράγγιού του Δίκταμου (υδρομετρικός σταθμός Η2 - Στύλος), ήταν σύντομες και μικρές σε αριθμό, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 μετρήσεις στον υδρομετρικό σταθμό Η3 (Φαράγγι) και 4 μετρήσεις στον υδρομετρικό σταθμό Η2 (Στύλος).

Στον Υδρομετρικό σταθμό Η1 (Άγιος Γεώργιος) λόγω της μόνιμης ροής του ποταμού σε αυτό το σημείο, γίνονταν μετρήσεις υγρής διατομής, μέγιστου βάθους και ταχυτήτων ροής, σε μηνιαία βάση (Παλιατζίκη, 2006; Χατζηθεοχάρους, 2005). Μετά τη διεξαγωγή των μετρήσεων και τον υπολογισμό των ταχυτήτων και των εμβαδών του ποταμού, υπολογίστηκε η παροχή του ποταμού για κάθε σημείο χωριστά.

Για τον υπολογισμό της παροχής εφαρμόστηκε η καμπύλη αξιολόγησης (στάθμης-παροχής) (Τσακίρης, 1995). Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της καμπύλης χρησιμοποιεί την εκθετική εξίσωση της μορφής:

$$Q = a \times H^b, \quad (2.1)$$

Όπου:

Q = Παροχή (m³/sec),

H = Στάθμη του καταγραφέα (m),

(*a*) και (*b*) σταθερές.

Για τον υπολογισμό των παροχών απαραίτητη ήταν η εκτίμηση των σταθερών *a* και *b*.

Καμπύλη στάθμης – παροχής για τον τηλεμετρικό σταθμό παρακολούθησης H1 (Άγιος Γεώργιος)

Για τον τηλεμετρικό σταθμό παρακολούθησης H1, η καμπύλη στάθμης παροχής που προκύπτει είναι καμπύλη δύο τμημάτων με το πρώτο να ακολουθεί τον τύπο [$Q = a \times H^b$] για στάθμη μικρότερη των 40 cm, ενώ για στάθμη που ξεπερνά τα 40 cm χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που προέκυψε από τη γραμμική παρεμβολή της στάθμης με την παροχή και η οποία είναι της μορφής:

$$Q_{H1,A} = 29.54 \times H - 10.782 \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση που η στάθμη είναι μικρότερη των 40 cm οι σταθερές *a* και *b* υπολογίστηκαν ως $a=0.079$ και $b=0.343$. Οπότε η τελική παροχή σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με:

$$Q_{H1,B} = 0.079 \times H^{0.343} \quad (2.3)$$

Καμπύλη στάθμης – παροχής για τους τηλεμετρικούς σταθμούς παρακολούθησης H3 (Φαράγγι) και H2 (Στύλος)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι υδρομετρικοί σταθμοί H3 και H2, εγκαταστάθηκαν στον παραπόταμο Κεραμιώτη. Ο παραπόταμος αυτός είναι χειμαρικό ρέμα με διαλείπουσα ροή κατά του χειμερινούς μήνες, για το λόγο αυτό υπήρχε αντικειμενική δυσκολία στο να γίνουν αρκετές μετρήσεις πεδίου για όλο το φάσμα των παροχών στο συγκεκριμένο υδατόρευμα. Και σε αυτήν την περίπτωση η παροχή υπολογίστηκε με βάση την καμπύλη στάθμης-παροχής [$Q = a \times H^b$]

Λόγω του ότι δεν είχαμε αρκετές μετρήσεις πεδίου και προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την παραπάνω εκθετική εξίσωση, που προκύπτει κατά την εύρεση των σταθερών *a* και *b*, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο βελτιστοποίησης

‘παραμέτρων επίλυσης’ (Solver) του προγράμματος excel. Προέκυψε έτσι η τελική εκθετική εξίσωση μετατροπής στάθμης παροχής για τους υδρομετρικούς σταθμούς H3 και H2 αντίστοιχα.

Αναλυτικότερα για το σταθμό H3, η καμπύλη στάθμης παροχής που προκύπτει είναι καμπύλη δύο τμημάτων, με το πρώτο να ακολουθεί τον τύπο $[Q = a \times H^b]$ για στάθμη μικρότερη ή ίση των 35 cm, ενώ για στάθμη που ξεπερνά τα 35cm χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που προέκυψε από τη γραμμική παρεμβολή της στάθμης με την παροχή και η οποία είναι:

$$Q_{H3,A} = 49.734 \times H - 3.15 \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση που η στάθμη είναι μικρότερη ή ίση των 35 cm οι σταθερές a και b υπολογίστηκαν ως $a=1302.4$ και $b=4.5133$. Οπότε η τελική παροχή σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με:

$$Q_{H3,B} = 1302.4 \times H^{4.5133} \quad (2.5)$$

Για το σταθμό H2, η καμπύλη στάθμης παροχής που προκύπτει είναι της μορφής $[Q = a \times H^b]$, με τις σταθερές a και b να παίρνουν τιμές $a=11.412$ και $b=1.1532$. Οπότε η τελική παροχή σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με:

$$Q_{H2} = 11.412 \times H^{1.1532} \quad (2.6)$$

2.4. ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να αναφερθούμε στις δυνατότητες και στον τρόπο λειτουργίας των εγκαταστημένων τηλεμετρικών μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα μέτρησης των παρακάτω μετεωρολογικών παραμέτρων: α) θερμοκρασία αέρα, β) βροχόπτωση, γ) υγρασία ατμόσφαιρας, δ) ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ε) ταχύτητα ανέμου και ζ) διεύθυνση ανέμου.

Οι αντίστοιχοι υδρομετρικοί σταθμοί, έχουν εγκατασταθεί σε σταθερά και διαμορφωμένα σημεία της κοίτης του ποταμού και είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες μέτρησης στάθμης επιφανειακών υδάτων.

Η μετάδοση των δεδομένων από τους αντίστοιχους σταθμούς (Πλατφόρμα συλλογής δεδομένων) γίνεται μέσω κινητής τηλεφωνίας - τηλεμετρικού συστήματος (Υποσύστημα επικοινωνίας), ενώ η συγκέντρωση και επεξεργασία τους πραγματοποιείται σε κεντρικό υπολογιστή (Σταθμός βάσης) του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής - Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος (Πολυτεχνείο Κρήτης).

Παράλληλα θα πρέπει να επισημάνουμε ότι σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται έλεγχος λειτουργίας και συντήρηση των τηλεμετρικών σταθμών (Εικόνα 2, Παράρτημα Β).

Ανάπτυξη Συστήματος - Hardware

Η υλοποίηση ενός αποδοτικού και αξιόπιστου συστήματος πραγματικού χρόνου για τον επιτόπιο έλεγχο των περιβαλλοντικών διεργασιών αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα τα οποία θα πρέπει να περιγραφούν για την καλύτερη κατανόηση του όλου συστήματος. Οι πρόσφατες πρόοδοι των ασύρματων επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών συστημάτων έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη εξελιγμένων και παράλληλα χαμηλού κόστους δικτύων αισθητήρων (sensor networks) για τη συλλογή, ανάλυση και αποθήκευση δεδομένων και μετρήσεων. Ένα τέτοιο σύστημα το οποίο καταγράφει και μεταδίδει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο αποτελείται από δύο επιμέρους βασικά υποσυστήματα: α) την πλατφόρμα συλλογής δεδομένων και β) το σταθμό βάσης.

Αναλυτικότερα για κάθε ένα από τα δύο υποσυστήματα:

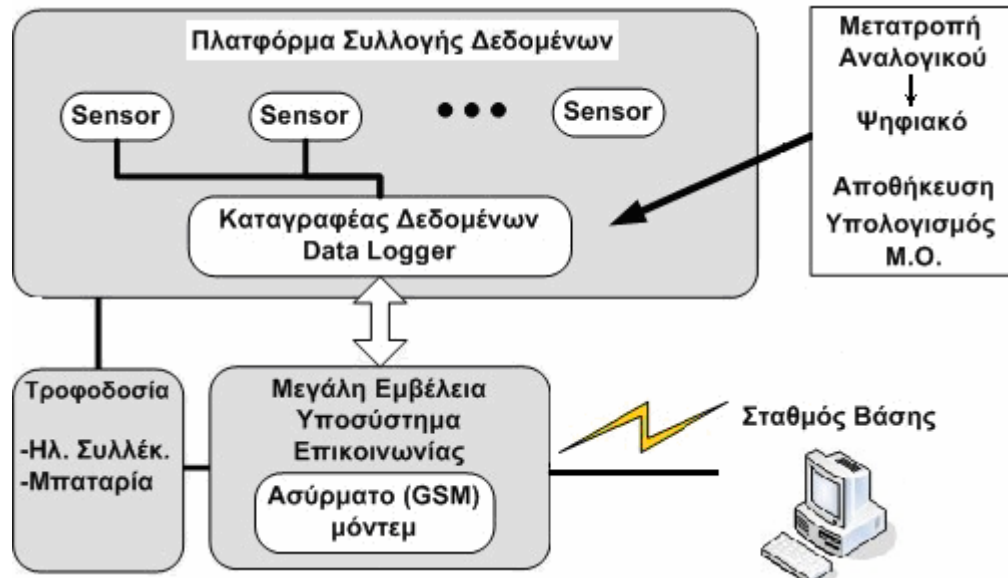
Πλατφόρμα συλλογής δεδομένων: Ο ρόλος της πλατφόρμας συλλογής δεδομένων είναι διττός. Λειτουργεί ως συλλέκτης δεδομένων και μετρήσεων (data logger) από αισθητήρες που είναι άμεσα συνδεδεμένοι σε αυτή, και ως μέσο επικοινωνίας και μεταφοράς των στοιχείων αυτών στον κεντρικό υπολογιστή του Εργαστηρίου (σταθμός βάσης) κατόπιν αιτήσεως. Αναλυτικότερα η πλατφόρμα συλλογής δεδομένων αποτελείται από το:

- *Συλλέκτη Δεδομένων (Data logger):* Ο data logger Delta-T DL2e είναι μια επαναπρογραμματιζόμενη συσκευή καταγραφής στοιχείων, ικανή να καταγράφει μετρήσεις από μια γκάμα αισθητήρων. Διαθέτει ανεξάρτητη τροφοδοσία και μπορεί να λειτουργεί σε υγρό περιβάλλον σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης έχει σειριακή διεπαφή (RS232) με το υποσύστημα επικοινωνίας. Ο data logger (με τη χρήση του ενσωματωμένου ρολογιού πραγματικού χρόνου, Real-Time Clock) αρχίζει την καταγραφή

στοιχείων από τους αισθητήρες περιοδικά (καταγραφεί σε ωριαία βάση ή σε μικρότερο χρονικό βήμα) και επιπρόσθετα, υπολογίζει τη μέση τιμή αυτών των μετρήσεων σε ωριαία βάση. Αυτές οι τιμές αποθηκεύονται έπειτα σε μία ενσωματωμένη μνήμη RAM 128K. Μπορεί να φαίνεται ότι το μέγεθος μνήμης είναι μάλλον μικρό αλλά αν λάβει κανείς υπόψη ότι (α) ο όγκος στοιχείων που αποθηκεύεται είναι μόνο μερικές δεκάδες bytes ανά ημέρα και (β) τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται στο σταθμό βάσης καθημερινά, έχει υπολογιστεί ότι το σύστημα μπορεί να συνεχίσει τη συλλογή και αποθήκευση δεδομένων χωρίς επικοινωνία με το σταθμό βάσης για τη μεταφορά αυτών, για τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους.

- *Υποσύστημα επικοινωνίας πλατφόρμας – βάσης:* Η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και της πλατφόρμας συλλογής δεδομένων, εκτελείται μέσω ενός GSM μόντεμ (Global System for Mobile Communications) (Wavecom, M2M modem Fastrack GSM/GPRS M1306B), (Εικόνα 2.26). Ο σταθμός βάσης στέλνει ένα αίτημα στην πλατφόρμα προκειμένου να αρχίσει η διαδικασία μεταφοράς των μετρήσεων. Το υποσύστημα επικοινωνίας διαβιβάζει αυτό το αίτημα στο data logger της πλατφόρμας, μέσω σειριακής. Εν συνεχεία, ο data logger αρχίζει την αποστολή των αποθηκευμένων δεδομένων. Το GSM είναι μια ανοικτή, ψηφιακή κυψελοειδής τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση φωνής και δεδομένων. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία GSM αντί της GPRS είναι κυρίως επειδή όταν ο σταθμός βάσης στέλνει ένα αίτημα για την ανάκτηση στοιχείων, το κανάλι επικοινωνίας ενεργοποιείται (ακριβώς όπως για τη μετάδοση φωνής) και έτσι γίνεται η μετάδοση των δεδομένων. Αυτό το κανάλι παραμένει ενεργό μόνο όσο διαρκεί η μετάδοση. Κατόπιν παραμένει ανενεργό, καταναλώνοντας έτσι ελάχιστη ενέργεια. Αντίθετα, με τη χρήση της υπηρεσίας GPRS, το κανάλι θα παρέμενε πάντα ενεργό με τις αντίστοιχες επιπτώσεις στην κατανάλωση ισχύος του όλου συστήματος. Ο ρυθμός επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού βάσης και της πλατφόρμας φτάνει τα 9600 bits ανά δευτερόλεπτο (<http://www.koiliaris.tuc.gr/>).
- *Τροφοδοσία:* Η πλατφόρμα συλλογής δεδομένων είναι εξοπλισμένη με μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία μολύβδου 12V. Η μπαταρία επαναφορτίζεται από ένα μικρό ηλιακό συλλέκτη (Shell, ST20). Ακόμη και με την παρουσία του ηλιακού συλλέκτη, η ανάγκη για χαμηλή κατανάλωση ισχύος στο σύστημα είναι επιτακτική. Σαν επιπρόσθετη δικλείδα ασφαλείας, ο data

logger είναι εξοπλισμένος με μια εφεδρική μπαταρία που του επιτρέπει να διατηρεί τα αποθηκευμένα δεδομένα στη μνήμη του ελλείψει άλλων παροχών ηλεκτρικού ρεύματος (δηλ. διακοπή ρεύματος) για περίπου 24 ώρες συνεχών αναγνώσεων (500.000 αναγνώσεις).



Εικόνα 2. 26. Υποσύστημα επικοινωνίας πλατφόρμας – βάσης.
(<http://www.koiliaris.tuc.gr/>)

Σταθμός βάσης: Στην ουσία είναι ένας Η/Υ (στο χώρο του Εργαστηρίου) με διπλό ρόλο. Ενεργεί ως βάση δεδομένων και ως web server για την αποθήκευση και την τυχόν παρουσίαση στο internet των περιβαλλοντικών μετρήσεων αντίστοιχα. Η διαδικασία αποθήκευσης στοιχείων κινείται από το σταθμό βάσης (όπως αναφέρθηκε νωρίτερα). Αυτή είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και μπορεί να εκτελεστεί πολλές φορές την ημέρα με ή χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Εκτελείται έτσι μια κλήση στο GSM modem της πλατφόρμας συλλογής δεδομένων. Σε περίπτωση αποτυχίας στην επικοινωνία με την πλατφόρμα, ο σταθμός βάσης μπορεί να εκτελέσει επιπρόσθετες προσπάθειες "να μιλήσει" στην απομακρυσμένη πλατφόρμα. Αυτό είναι σύννηθες φαινόμενο καθώς είναι αποδεδειγμένο ότι σε υγρά περιβάλλοντα η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να είναι αρκετά ασταθής. Κατόπιν, τα λαμβανόμενα στοιχεία αναλύονται (ανάλυση προτύπων & συστημάτων), ταξινομούνται σε μια βάση δεδομένων της Access και κατόπιν μπορούν να επεξεργαστούν και να αναλυθούν περαιτέρω από το χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.
ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ
&
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ GIS

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ο αριθμός των πλημμυρικών γεγονότων σε παγκόσμια βάση έχει αυξηθεί δραματικά. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών ανά πλημμυρικό γεγονός παράμενε σχεδόν σταθερός κατά τις δεκαετίες του '80 και του '90, ενώ από το 2000 ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών έχει μειωθεί εμφανώς, παρότι ο αριθμός των πλημμυρικών γεγονότων έχει σημειώσει σημαντική αύξηση (Parker et al., 2007).

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, σύμφωνα και με την Οδηγία 2007/60/EC ότι 100% αντιπλημμυρική προστασία δεν είναι εφικτή. Εφικτή είναι μόνο η αξιολόγηση και η διαχείριση της επικινδυνότητας των πλημμυρικών φαινομένων. Με βάση αυτή τη διαπίστωση θα αναλύσουμε ένα πλάνο διαχειριστικών μεθόδων αντιπλημμυρικής προστασίας.

Το βιώσιμο πλάνο πλημμυρικής διαχείρισης το οποίο προτείνεται απαρτίζεται από δύο αλληλένδετες συνιστώσες: α) Τη σωστή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων και β) Τη χωρική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής. Παρότι οι δύο παραπάνω συνιστώσες μπορούν να συγκωλυθούν, ο διαχωρισμός τους είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην προσπάθεια μας να δώσουμε έμφαση στον προσδιορισμό των επικινδυνών πλημμυρικά περιοχών.

α) Η Ορθή Στρατηγική Διαχείρισης Πλημμυρικών Φαινομένων – [The right strategy of flood management].

Περιλαμβάνει τις ακόλουθες δράσεις:

- i) Προ-πλημμυρικά Μέτρα (pre-flood measures),
- ii) Σύστημα Πρόβλεψης-Προειδοποίησης Πλημμυρικού Κινδύνου (flood forecasting warning system), και
- iii) Μετά-πλημμυρικά Μέτρα (after flood measures).

i) **Προ-πλημμυρικά Μέτρα:** Μέτρα που θα παράσχουν τη φυσική, θεσμική και κοινωνική υποδομή για μια βιώσιμη διαχείριση του κινδύνου από τις πλημμύρες. Οι στρατηγικές για την προληπτική διαχείριση του κινδύνου από τις πλημμύρες περιλαμβάνουν τα εξής μέτρα: *Τεχνικά μέτρα*, για τον έλεγχο και τη

διαχείριση των πλημμυρών (μικρά φράγματα και έργα διατήρησης και σταθεροποίηση της όχθης των καναλιών). *Ρυθμιστικά μέτρα*, μέσω της ανάπτυξης κανονισμών για τον προγραμματισμό των χρήσεων γης και της ορθής χωροταξίας αυτών (Water Directors, 2003). Σημαντικό είναι επίσης ο σχεδιασμός των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας να αρχίζει από τα ανάντη και να επεκτείνεται μέχρι και την κατάντη περιοχή.

ii) **Το Σύστημα Πρόβλεψης - Προειδοποίησης Πλημμυρικού Κινδύνου**, [The Flood Forecasting Warning System (FFWS)], περιλαμβάνει το σχεδιασμό δικτύου τηλεμετρικών σταθμών για την καταγραφή της βροχόπτωσης, των μετεωρολογικών παραμέτρων και της παροχής των υδατορευμάτων. Αυτό το σύστημα θα πρέπει επίσης να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης (warning system) και προγραμματισμού εκκένωσης (αξιολόγηση υπαρχόντων διοικητικών διαχειριστικών σεναρίων έκτακτης ανάγκης και προσαρμογή τους βάση των πιο πρόσφατων εμπειριών), (Green et al., 2000). Ένα σύστημα πρόβλεψης - προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου χρησιμοποιείται προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος κινητοποίησης, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελαχιστοποίησης των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές και περιορισμού των καταστροφών σε περιουσίες. Προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος απαιτούνται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όσον αφορά τις υδρο-μετεωρολογικές συνθήκες. Αυτό μπορεί να γίνει εφικτό με ένα σύστημα μετάδοσης που επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο την καταγραφή και αποθήκευση των ποσοτικών τιμών (βροχόπτωση, επίπεδο στάθμης νερού, παροχή) με τη μορφή βάσης δεδομένων, σε ένα κεντρικό σταθμό (Ford, 2001). Η αναγνώριση της πλημμυρικής απειλής μόνο μέσω παρατηρήσεων (βροχόπτωσης και στάθμης νερού) δεν κρίνεται ικανοποιητική σε λεκάνες απορροής που χαρακτηρίζονται από μικρό υδραυλικό χρόνο απόκρισης. Έτσι είναι απαραίτητο στη μεθοδολογία πρόβλεψης των πλημμυρών να συμπεριληφθεί ένα σύστημα προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου με βάση την υδρολογική μοντελοποίηση, ικανό να προβλέπει την παροχή και τη στάθμη λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που παρέχονται από τους υδρο-μετεωρολογικούς σταθμούς, μέσω ενός συστήματος μετάδοσης. Όταν η υδρολογική μοντελοποίηση έχει την ικανότητα να προσομοιώνει με τον πιο ρεαλιστικό τρόπο τις υδρολογικές διαδικασίες στην περιοχή μελέτης, τότε η χρησιμοποιούμενη υδρολογική μοντελοποίηση είναι και ικανή να προβλέπει με ακρίβεια τον πλημμυρικό κίνδυνο (Barbetta et al., 2006).

iii) **Μετά-Πλημμυρικά Μέτρα:** Αυτά τα μέτρα προωθούν τη γρήγορη αποκατάσταση των πληγείσων περιοχών από την πλημμύρα και συμπεριλαμβάνουν μέτρα ανακούφισης, μέτρα αποκατάστασης της ζημιωθείσας υποδομής και μέτρα αναθεώρησης της αποτελεσματικότητας του αντιπλημμυρικού συστήματος. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι Τοπικές Αρχές - Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) λόγω της ευελιξίας τους, μπορούν να συνεισφέρουν άμεσα, μέσω των κατάλληλων ενεργειών, στην ανακούφιση από τις συνέπειες των πλημμυρών (Wright and Monday, 1996).

B) Τρωτότητα πλημμυρικών φαινομένων και επικίνδυνες πλημμυρικά περιοχές – [The flood vulnerability and the flood hazardous areas].

Σύμφωνα με τον Adger (2006) η τρωτότητα περιγράφεται συνήθως με αρνητικούς όρους ως η ευαισθησία – ευπάθεια στη ζημιά. Η πλημμυρική τρωτότητα ορίζεται ως ο βαθμός ευαισθησίας στη ζημιά από τα επικίνδυνα σχετικά με το νερό φαινόμενα (Gallorín, 2006). Προκειμένου να καθοριστεί η πλημμυρική τρωτότητα είναι σημαντικό να αξιολογηθούν οι πηγές κινδύνου των πλημμυρικών φαινομένων και να βρεθούν οι επικίνδυνες περιοχές (περιοχές υψηλής επικινδυνότητας). Για αυτό το λόγο, η χρήση ενός εύχρηστου και γρήγορου εργαλείου προκειμένου να σκιαγραφηθούν – προσδιοριστούν οι περιοχές με υψηλή επικινδυνότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα (επιρρεπείς σε πλημμύρες περιοχές) είναι ιδιαίτερα σημαντική, ειδικότερα σε λεκάνες απορροής όπου δεν υπάρχει ένα επαρκές υδρομετεωρολογικό δίκτυο και σε περιοχές όπου οι ακριβείς και χρονοβόρες υδρολογικές-υδραυλικές προσομοιώσεις δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν (Manfreda et al., 2008). Επιπλέον σε μικρές υδρολογικές λεκάνες απορροής, όπου ο χρόνος προειδοποίησης των πλημμυρών είναι σύντομος, η προηγούμενη γνώση των περιοχών εκείνων με υψηλό κίνδυνο εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων είναι πολύ σημαντική.

Στο παρόν Κεφάλαιο η προτεινόμενη στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων και ο προσδιορισμός των επικίνδυνων πλημμυρικών περιοχών, εφαρμόζονται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

3.2. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ

3.2.1. Πλημμυρικά φαινόμενα

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη χαρακτηρίζεται από πλημμυρικά φαινόμενα χαμηλής συχνότητας αλλά μεγάλου μεγέθους - έντασης. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής συνεισφέρουν στη δημιουργία πολλών στιγμιαίων καρστικών και μη καρστικών πλημμυρικών γεγονότων (Kourgialas and Karatzas, 2009). Όπως έχουμε αναφέρει, ο ποταμός Κοιλιάρης αποτελείται από δύο παραποτάμους (Κεραμιώτης και Αναβρετή), (Εικόνα 3.1 Α). Ο υψηλός όγκος ροής από τον παραπόταμο Κεραμιώτη ευθύνεται για τη γένεση μεγάλων στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη. Προκειμένου να μελετήσουμε τα παραπάνω πλημμυρικά φαινόμενα οι τηλεμετρικοί υδρομετρικοί σταθμοί (H1, H2, H3) και οι αντίστοιχοι μετεωρολογικοί σταθμοί (M1, M2, M3), εγκαταστάθηκαν στη λεκάνη απορροής, (Εικόνα 3.1 Α), και παρέχουν ωριαία δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων. Οι καταγραφόμενες πλημμυρικές αιχμές - υδρογραφήματα σε όλους τους υδρομετρικούς σταθμούς ήταν οξείες με απότομους ανιόντες κλάδους και μικρούς χρόνους υστέρησης. Επιπρόσθετα, ο χρόνος απόκρισης της λεκάνης απορροής σε μια έντονη βροχόπτωση είναι μερικές ώρες.

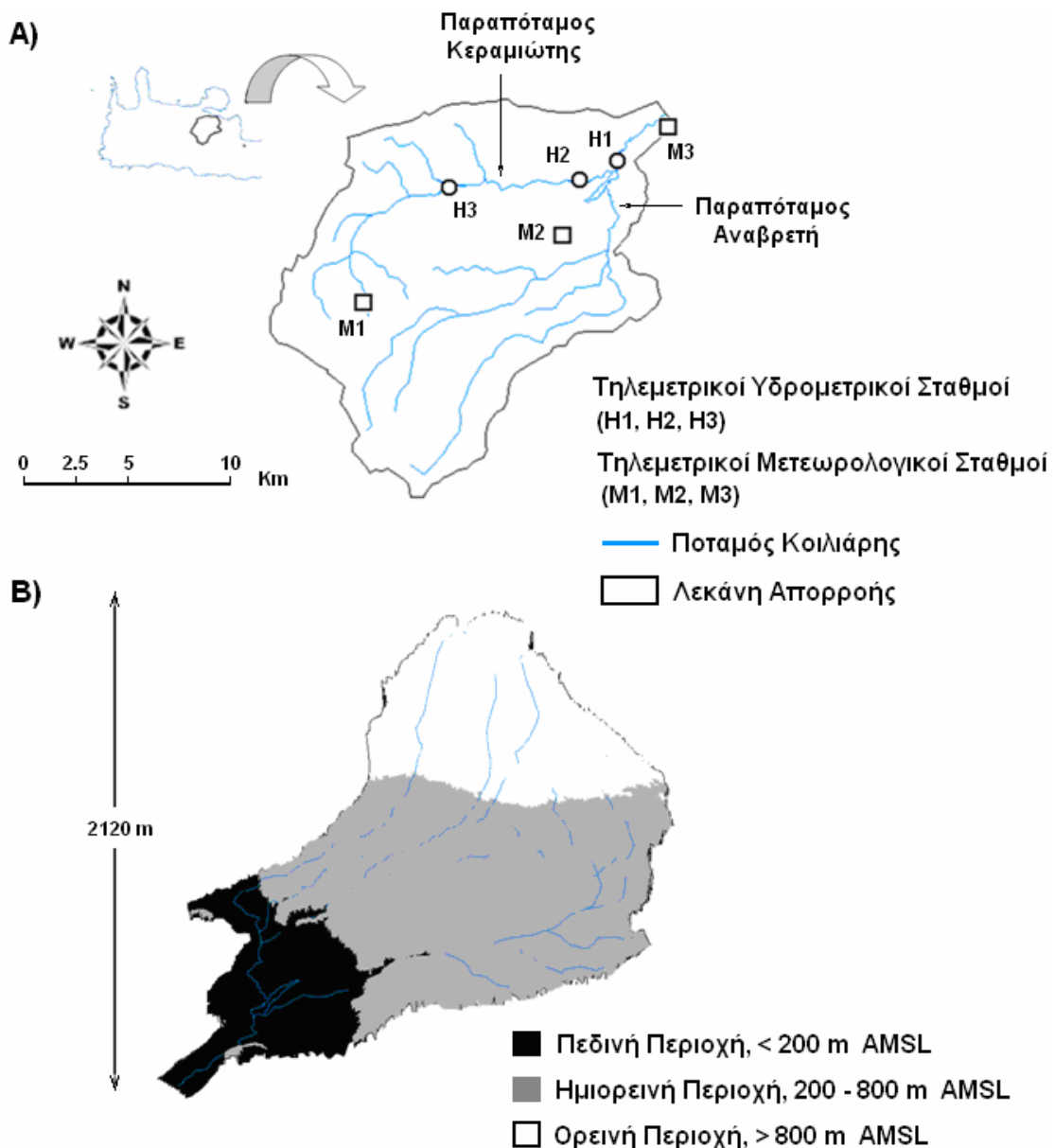
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών πολλά ακραία πλημμυρικά γεγονότα συνέβηκαν στη λεκάνη απορροής, ειδικότερα στην κατάντη περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη. Τα μεγαλύτερα από αυτά, σύμφωνα με ιστορικά δεδομένα, έλαβαν χώρα την 26η Οκτωβρίου 1968, την 11η Ιανουαρίου 1978, την 5η Νοεμβρίου 1999, την 4η Δεκεμβρίου 2001, και την 26η Δεκεμβρίου 2004. Όλα τα παραπάνω ακραία πλημμυρικά γεγονότα, προκάλεσαν πολλές και εκτεταμένες ζημιές σε περιουσίες και υποδομές.

3.2.2. Προτεινόμενα Προ-Πλημμυρικά Μέτρα

Τεχνικά μέτρα

Η αντιπλημμυρική προστασία πρέπει να ξεκινά από τις ορεινές περιοχές, έτσι ώστε να μετριάζεται το φαινόμενο στη γένεση του. Έτσι είναι πιο εύκολη η παρέμβαση. Αντίθετα, αν η αντιπλημμυρική προστασία εστιαστεί στις πεδινές περιοχές πρέπει να γίνουν παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας με αμφίβολα

αποτελέσματα και δυσανάλογο κόστος. Οι οδηγίες της Ε.Ε που αφορούν στην πολιτική διαχείρισης του νερού (2006/60/EC) και των πλημμυρών (2007/60/EC), περιλαμβάνουν τον καθορισμό των επιφανειακών και υπογείων υδάτινων σωμάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Ο διαχωρισμός των λεκανών σε υδάτινα σώματα προϋποθέτει την κατηγοριοποίηση της χωρικής έκτασης της λεκάνης σε υψομετρικά επίπεδα, έτσι με βάση το υψόμετρο, η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη κατηγοριοποιήθηκε σε τρεις ζώνες, την πεδινή (0-200m), την ημιορεινή (201-800 m) και την ορεινή (>801m) (Εικόνα 3.1 Β).



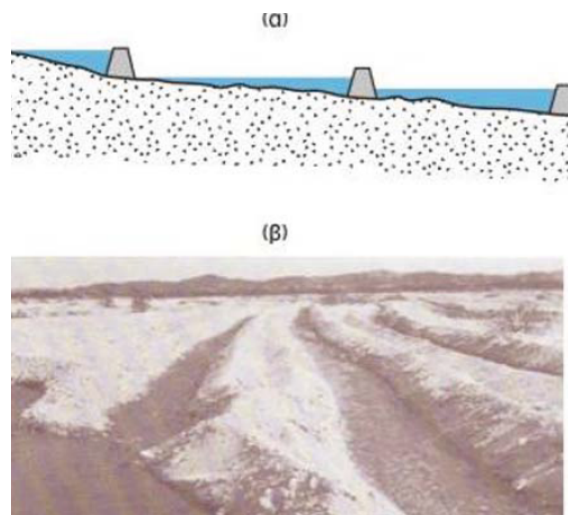
Εικόνα 3. 1. Υψομετρική διακύμανση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη και το υδρογραφικό δίκτυο αυτής.

Βασική φιλοσοφία της αντιπλημμυρικής προστασίας, είναι να μην αγνοείται η μακροχρόνια δυναμική των ρεμάτων, που εκφράζεται με τη

γεωμετρία της διατομής της φυσικής κοίτης και με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων προσχώσεων (μέγεθος και σύνθεση κλαστικών υλικών). Λαμβάνοντας υπόψη ότι: Τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας θα πρέπει να περιλαμβάνουν *παρεμβάσεις ήπιες και συνδυαστικές* (π.χ., μικρής κλίμακας φράγματα ανάσχεσης στα ρέματα, μικρές διώρυγες εκτροπής προς ζώνες υψηλής κατεισδυσης) ώστε να μην αλλοιώσουν το τοπίο της περιοχής αλλά και να μην διαταράσσεται το υδρολογικό καθεστώς αυτής, δημιουργώντας έτσι ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες σε άλλους τομείς της οικονομίας και του περιβάλλοντος.

Προτείνεται:

- **Στις υψηλές - ορεινές περιοχές**, οι οποίες καθορίζουν τον ορεινό όγκο των λεκανών απορροής, σημειώνεται απότομη αύξηση της ενέργειας των χειμάρρων, ενώ το φαινόμενο της πλημμύρας δεν έχει ακόμη ξεκινήσει. Αυτές οι περιοχές αποτελούν το χώρο συλλογής του κύριου όγκου του νερού που θα καταλήξει στις χαμηλές – πεδινές περιοχές. Εκεί μπορούν να γίνουν ουσιαστικές παρεμβάσεις για την ανάσχεση του φαινομένου των πλημμυρών. Πρέπει να θεωρούνται δεδομένα τα τεχνικά και θεσμικά μέτρα προστασίας από την αποψίλωση και τις πυρκαγιές, που διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, τόσο σε σχέση με τις πλημμύρες όσο και με άλλα φαινόμενα όπως η ξηρασία, η ανεπάρκεια νερού και η ερημοποίηση. Επιπλέον, στις περιοχές αυτές μπορεί να γίνει με τεχνικά μέτρα (όπως ταμιευτήρες και ανασχετικά φράγματα – Εικόνα 3.2) ο αποσυγχρονισμός της απόκρισης του υδρογραφικού δικτύου, έτσι ώστε να αποσυντονιστούν οι χρόνοι συγκέντρωσης του νερού στα σημεία όπου αυξάνεται η ενέργεια των χειμάρρων, και τελικά να μειωθεί ο ρυθμός εκτόνωσης της ενέργειας από τα στόμια των λεκανών προς τις χαμηλές περιοχές. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο όταν τα τεχνικά μέτρα είναι καλά σχεδιασμένα και τοποθετημένα σε σημεία όπου η δημιουργία ενός επερχόμενου μεγάλου πλημμυρικού κύματος μπορεί να αναχαιτισθεί. Ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης του νερού στις υπολεκάνες των περιοχών αυτών, μπορεί να καθοδηγήσει τις τεχνικές παρεμβάσεις ως προς το είδος και τα σημεία παρέμβασης. Βέβαια βασική προϋπόθεση όλων αυτών, είναι η πολύ καλή γνώση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 3. 2. Διευθετήσεις στις κοίτες χειμάρρων, α) μικρά φράγματα κατά μήκος, β) αυλάκια (κατά Todd). (www.geo.auth.gr)

- **Στις ενδιάμεσες - ημιορεινές περιοχές**, δηλαδή ανάμεσα στην υψηλή ζώνη των λεκανών απορροής, όπου αυξάνεται η ενέργεια των χειμάρρων και στις χαμηλές - πεδινές περιοχές, οι τεχνικές παρεμβάσεις είναι πιο περίπλοκες, γιατί πρόκειται συνήθως για τις περιοχές που η απορροή «φορτίζεται» με ενέργεια, λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς. Συνήθως πρόκειται για περιοχές που η απορροή έχει ήδη συγκεντρωθεί σε λίγους κλάδους με απότομη κλίση, οι οποίοι ξεκινούν από σχετικά μεγάλα υψόμετρα και καταλήγουν απευθείας στις χαμηλές περιοχές. Οι τεχνικές παρεμβάσεις αναμένεται να είναι μάλλον δύσκολες στις περιοχές αυτές, λόγω της μορφολογίας των χειμάρρων, αλλά και λόγω της υψηλής τους ενέργειας. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, όπου ένα μεγάλο τμήμα της ημιορεινής περιοχής έχει καρστική γεωμορφολογία (ζώνες φυσικού εμπλουτισμού των καρστικών υδροφόρων), θα πρέπει να διερευνηθεί το ενδεχόμενο της ενίσχυσης της κατεΐσδυσης με τεχνητό εμπλουτισμό, απάγοντας ταυτόχρονα τμήμα των πλημμυρικών παροχών των επικίνδυνων χειμάρρων. Σε αυτές τις περιοχές οι γεωλογικές συνθήκες διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και η γνώση τους, με κάθε λεπτομέρεια, είναι απαραίτητη (Green et al., 2000).
- **Στις χαμηλές - πεδινές περιοχές**, πολύ λίγα πράγματα μπορούν να γίνουν προς την κατεύθυνση της ανάσχεσης του ίδιου του φαινομένου εκτός από έργα προστασίας της όχθης από τη διάβρωση (Εικόνα 3.3) και καθαρισμό της κοίτης από αποθέσεις παλαιότερων πλημμυρών (κατόπιν

μελέτης και συγκεκριμένων προδιαγραφών). Γι' αυτό το σκοπό στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη έχουν κατασκευαστεί λιθοδομές κατά μήκος των όχθων του ποταμού, σε σημεία όπου είχαν δημιουργηθεί ιστορικά πλημμυρικά φαινόμενα (πλημμυρικές παροχές – υπερχειλίση των όχθων), (Εικόνα 3.4). Στις χαμηλές - πεδινές περιοχές ενδείκνυνται κυρίως θεσμικές και κανονιστικές παρεμβάσεις, κυρίως ως προς την εξασφάλιση της φυσικής λειτουργίας του πλημμυρικού πεδίου και την προστασία των ευαίσθητων περιοχών από ανθρώπινες δραστηριότητες (οικοδομική, βιομηχανική, αγροτική δραστηριότητα κ.λπ.). Η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη στα πλημμυρικά πεδία επιδρά καταλυτικά στην αύξηση του μεγέθους των καταστροφών, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει και το συνολικό διακύβευμα σε περιοχές εκ προοιμίου επικίνδυνες. Για να γίνουν οι θεσμικές παρεμβάσεις, είναι αναγκαία η οριοθέτηση και χαρτογράφηση του πλημμυρικού πεδίου, όπως και των κάθε μορφής τεχνικών και μη παρεμβάσεων σε αυτό. Έτσι στην περίπτωση του ποταμού Κοιλιάρη θα πρέπει να οριοθετηθούν ζώνες προστασίας πλημμυρών όπου θα καθορίζονται ή θα απαγορεύονται συγκεκριμένες δραστηριότητες προκειμένου να αποφεύγονται πιθανές καταστροφές αλλά να επιτρέπεται και η φυσική εκτόνωση της πλημμύρας.



Εικόνα 3. 3. Αποκατάσταση παρόχθιας ζώνης από τη διάβρωση και δημιουργία παρόχθιου δάσους από λεύκες για φυτο-εξυγίανση. (www.Envifriendly.tuc.gr)



Εικόνα 3. 4. Λιθοδομή κατά μήκος της όχθης του ποταμού Κοιλιάρη, σημείο εκδήλωσης παλαιότερου πλημμυρικού γεγονότος.

Ρυθμιστικά, Οικονομικά και Επικοινωνιακά Μέτρα

Δύο είναι συνήθως τα βασικά ερωτήματα που αφορούν την εμπλοκή των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) στην αντιμετώπιση των πλημμυρών: α) γιατί η Τοπική Αυτοδιοίκηση να εμπλακεί στην πρόληψη και την αντιμετώπιση των συνεπειών από τις πλημμύρες; και β) πώς μπορεί να το επιτύχει αυτό; Ένα από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της Τοπικής Αυτοδιοίκησης είναι ότι μπορεί να ενσωματώσει με μικρό σχετικά κόστος νέες καινοτομίες και πολιτικές.

Με βάση το μέγεθος της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής η πιλοτική εφαρμογή ενός καινοτόμου προγράμματος αντιμετώπισης των συνεπειών από τις πλημμύρες σε ένα ή μερικούς ΟΤΑ θα έχει πολύ μικρότερο κόστος σε περίπτωση αποτυχίας, από ότι εάν το ίδιο πρόγραμμα εφαρμοζόταν σε όλη την επικράτεια. Παράλληλα σε περίπτωση επιτυχίας του προγράμματος, η πιλοτική του εφαρμογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως «καλή πρακτική» και να διαχυθεί στο σύνολο της χώρας (Bouwen and Taillieu, 2004). Στην πρόληψη και αντιμετώπιση των πλημμυρών οι Ευρωπαϊκοί ΟΤΑ είχαν πάντα ένα σημαίνοντα ρόλο. Ιδιαίτερα τελευταία, που με τις νέες καινοτόμες αντιλήψεις για τη βιώσιμη διαχείριση, ο ρόλος τους αποκτά μεγαλύτερο ειδικό βάρος.

Το ειδικό αυτό βάρος είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος των ΟΤΑ. Αυτό γιατί το μικρό τους μέγεθος προσφέρει δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, σε σχέση με τη συγκεντρωτική, από το κεντρικό κράτος διαχείριση των πλημμυρών. Το μικρό μέγεθος επιτρέπει ευελιξία, προϋπόθεση που θεωρείται αναγκαία και ικανή συνθήκη για μία αποτελεσματική αντιμετώπιση, ενώ παράλληλα περιορίζει τους γραφειοκρατικούς μηχανισμούς, τα όργανα και τις διαδρομές που μία ανάλογη πολιτική θα είχε να διασχίσει κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της, από το κεντρικό κράτος. Τέλος δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι οι ΟΤΑ, ως η πλησιέστερη εξουσία προς τον πολίτη, έχει τόσα χρόνια αναπτύξει με τους δημότες αμφίδρομες σχέσεις- γνώσεις και μπορεί με τον καλύτερο τρόπο να εκφράσει τις ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες του κάθε τόπου (Pahl - Wahl C., 2006).

Μελετώντας όμως τη διεθνή εμπειρία των ΟΤΑ σε σχέση με το συγκεκριμένο θέμα εντοπίζεται μία μορφή διστακτικότητας εκ μέρους των τοπικών αρχών, φαινόμενο που παρατηρείται και στους εμπλεκόμενους ΟΤΑ των περιοχών που ενσωματώνει η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Η διστακτικότητα αυτή έχει να κάνει κυρίως με το πολιτικό κόστος και όφελος από την ανάληψη πρωτοβουλιών σχετικά με την πρόληψη και αντιμετώπιση των πλημμυρών. Στην περίπτωση που ένας ΟΤΑ δεν έχει υποστεί τις συνέπειες μιας πλημμύρας η προώθηση ενός σχεδίου δράσης για τέτοιες καταστάσεις πιθανόν να μη βρει την επιθυμητή ανταπόκριση. Οι προκλήσεις που θα αντιμετωπίσει ένας ΟΤΑ είναι:

- ✓ Το κοινό δεν αντιμετωπίζει την πιθανότητα πλημμύρας με ιδιαίτερη προσοχή θεωρώντας ότι η περιοχή του δεν απειλείται από ένα τέτοιο φαινόμενο,
- ✓ Το πολιτικό όφελος για την αντιμετώπιση μιας πιθανής πλημμύρας είναι συχνά πολύ μικρό, τουλάχιστον μέχρι ο ΟΤΑ να βρεθεί αντιμέτωπος με μια τέτοια κατάσταση. Είναι πολύ δύσκολο να δεσμεύσει κανείς χρηματικούς πόρους για την πρόληψη μια πλημμύρας. Στην περίπτωση όμως που αυτή συμβεί και τα προληπτικά μέτρα έχουν λειτουργήσει, τα πολιτικά οφέλη αυξάνονται,
- ✓ Αν και οι πολίτες δε δίνουν προτεραιότητα στην ετοιμότητα τους απέναντι σε μια πλημμύρα, αναμένουν ωστόσο από τους αιρετούς εκπροσώπους τους να περιορίσουν τις ζημιές και τις απώλειες, όταν αυτή συμβεί, οπότε το πολιτικό κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο.

Ίσως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να συνδυάσει κανείς τα κόστη με τα οφέλη και να αντιμετωπίσει τυχόν κριτική και αντιδράσεις, είναι να γνωστοποιήσει στο κοινό τόσο τους κινδύνους από μια ενδεχόμενη πλημμύρα, όσο και τα οφέλη που θα γευτεί ο ΟΤΑ από ένα προληπτικό σχέδιο δράσης. Για το λόγο αυτό πρέπει:

- ✓ Να δοθεί έμφαση στις διαστάσεις της δημόσιας ασφάλειας, που θα επιτευχθεί μόνο μέσω της λήψης μέτρων για τον περιορισμό των πλημμυρών,
- ✓ Να ενσωματωθεί εκ των προτέρων το σχέδιο διαχείρισης των περιοχών με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας στα μελλοντικά προγράμματα δράσης του ΟΤΑ,
- ✓ Να ενισχυθεί η σωστή και αποτελεσματική χρήση των περιοχών που είναι επιρρεπείς στις πλημμύρες, και να προβληθεί αυτή ώστε να γίνει γνωστή και στο ευρύ κοινό, μαζί με τις θετικές συνέπειες από μια τέτοια χρήση.

Τα τελευταία χρόνια δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε μέτρα και δράσεις που σχετίζονται με τα συστήματα και τους μηχανισμούς πρόληψης. Πολλές από τις τοπικές κοινωνίες, ιδιαίτερα στην ΕΕ και την Β. Αμερική έχουν λάβει μία σειρά μέτρων σχετικών με την πρόβλεψη των πλημμυρών. Είναι πολύ σημαντικό να αποτυπωθεί η υπάρχουσα κατάσταση και σε αυτό το επίπεδο. Ο εντοπισμός των αδυναμιών θα οδηγήσει πιθανώς σε διατύπωση ενδιαφερόντων προτάσεων. Αυτό που εξετάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το κατά πόσο οι τοπικές αρχές:

- ✓ Έχουν θεσμικές και κανονιστικές διατάξεις για εδαφικές υποδιαιρέσεις και άλλα μέτρα που ρυθμίζουν την ανάπτυξη στις περιοχές υψηλού κινδύνου,
- ✓ Έχουν σχέδια δράσης για την περίπτωση πλημμύρας,
- ✓ Έχουν επεξεργαστεί ανταποδοτικά συστήματα. Αυτό σημαίνει ότι οι κάτοικοι ή οι επιχειρήσεις επανατοποθετούνται σε νέες περιοχές, οι εγκαταστάσεις της περιοχής είτε κατεδαφίζονται, είτε μετακινούνται και η γη χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης των πλημμυρών,
- ✓ Έχουν δημιουργήσει εγκαταστάσεις ή συμμετέχουν στην κατασκευή ή συντήρηση εγκαταστάσεων, που αποσκοπούν στην προστασία από τις πλημμύρες, όπως είναι για παράδειγμα φράγματα, αντιπλημμυρικά αναχώματα και αλλαγές στην κατεύθυνση των καναλιών,
- ✓ Χρησιμοποιούν συστήματα που επιτρέπουν την πρόβλεψη των πλημμυρών.

Οι τυπικές αρμοδιότητες ενός ΟΤΑ αναφέρονται στον Κώδικα Δήμων και Κοινοτήτων. Υπάρχει όμως μία σειρά εξειδικευμένων πρωτοβουλιών που μπορούν να λάβουν οι ΟΤΑ προς την κατεύθυνση πρόληψης των συνεπειών των πλημμυρών. Θα πρέπει πχ να εξεταστεί εάν έχουν πραγματοποιηθεί και με ποια αποτελέσματα τα παρακάτω μέτρα:

- ✓ Ενίσχυση των ρυθμίσεων, που έχουν υιοθετηθεί από το δημοτικό συμβούλιο και αφορούν τις περιοχές με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας,
- ✓ Σχεδιασμός, ανάπτυξη και διαχείριση πάρκων, χώρων αναψυχής και άλλων ανοιχτών χώρων σε περιοχές επιρρεπείς στις πλημμύρες,
- ✓ Ενημέρωση της κοινής γνώμης για τους κινδύνους των πλημμυρών, καθώς και για τα προστατευτικά μέτρα που μπορεί να λάβει ο κάθε πολίτης,
- ✓ Ενσωμάτωση των κινδύνων που αντιμετωπίζει η τοπική κοινωνία, αλλά και των ενεργειών που αναλαμβάνει για να αντιμετωπίσει τις πλημμύρες στο μέλλον,
- ✓ Παροχή ευκαιριών για οικονομική ανάπτυξη, με παράλληλη ενημέρωση για την έκθεση στους κινδύνους της πλημμύρας,
- ✓ Λήψη μέτρων έκτακτης ανάγκης, έλεγχος για τη διάβρωση του εδάφους, επισκευές, διαχείριση υδάτινων πόρων.

Επιλογή κατάλληλων μέτρων - Στους Ευρωπαϊκούς κυρίως ΟΤΑ εντοπίζεται συνήθως πληθώρα μέτρων που αφορούν στη διαχείριση των περιοχών με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας. Παρακάτω δίνονται ορισμένες πρακτικές οδηγίες για τους παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται πριν αποφασιστούν τα μέτρα που τελικά θα υιοθετήσει ο ΟΤΑ, (Pahl - Wahl C., 2006):

- ✓ Μέτρα που θα ανταποκρίνονται σε περισσότερες από μια ανάγκες του ΟΤΑ έχουν μικρότερα οικονομικά κόστη και επιπλέον μπορούν να αντιμετωπίσουν πιο εύκολα τυχόν κριτικές (μέρη των λεκανών απορροής μπορούν ταυτόχρονα να λειτουργήσουν ως αθλητικά γήπεδα ή πάρκα αναψυχής, δημιουργώντας έτσι ερεθίσματα για οικονομική- κοινωνική ανάπτυξη).
- ✓ Μέτρα που θα επιτύχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα για τη μείωση των επιπέδων πλημμύρας, είναι εκείνα που θα συνδυαστούν με τη μελλοντική ανάπτυξη σε περιοχές που δεν είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες.

- ✓ Μέτρα που θα μειώσουν την έκθεση της περιοχής στους κινδύνους της πλημμύρας και παράλληλα θα βελτιώσουν τις συνθήκες διαβίωσης σ' αυτή.

Εφαρμόζοντας το πρόγραμμα δράσης- Σε πολλές περιπτώσεις, οι ΟΤΑ που διαθέτουν ένα πλήρες σχέδιο δράσης ανακαλύπτουν πως δεν μπορούν να το εφαρμόσουν ελλείψει τεχνικών και οικονομικών πόρων. Για να αντιμετωπιστεί μια τέτοια κατάσταση πρέπει να τεθούν προτεραιότητες και να εφαρμοστούν άλλοι τρόποι υποστήριξης. Τα διάφορα διαχειριστικά προγράμματα απαιτούν και διαφορετικές τεχνικές υλοποίησης. Ανάμεσα σε αυτές είναι και οι παρακάτω:

- ✓ Διοικητικές διαδικασίες: υιοθέτηση διατάξεων που θα καθορίζουν τη μελλοντική χρήση περιοχών με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας,
- ✓ Ανάθεση αρμοδιοτήτων σε ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες, που θα ασχοληθούν με την ενημέρωση της κοινής γνώμης και την προετοιμασία εκπαιδευτικού υλικού που θα αφορά στις πλημμύρες,
- ✓ Χρήση εθελοντών στις δράσεις των διαφόρων προγραμμάτων,
- ✓ Βελτίωση των προληπτικών συστημάτων και του τρόπου αντιμετώπισης ενδεχόμενης πλημμύρας,
- ✓ Επίσημες πολιτικές που θα περιορίζουν την ανεξέλεγκτη ανάπτυξη σε συγκεκριμένες περιοχές,
- ✓ Συνεργασία με γειτονικούς ΟΤΑ για την καλύτερη αντιμετώπιση των πλημμυρών.

Είναι αλήθεια ότι οι ΟΤΑ στην Ελλάδα έχουν πολύ μικρή εμπειρία από παρόμοιες πολιτικές. Ιδιαίτερα οι μικροί ΟΤΑ έχουν περιορισμένες δυνατότητες τόσο σε χρηματοδοτικούς πόρους, όσο και σε έμπυχο υλικό. Άρα οι απαντήσεις στις περισσότερες από τις παραπάνω ερωτήσεις θα είναι αρνητικές. Στην παρούσα Διδακτορική διατριβή, το πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται όχι μόνο για να υπάρχει μία ολοκληρωμένη εικόνα, αλλά και για να εισαχθεί ο αναγνώστης στα ζητήματα που θα έπρεπε ή πρέπει να αντιμετωπίσει ο τοπικός του δήμος. Οι πλημμύρες δεν είναι ένα φυσικό φαινόμενο που περιορίζεται στα διοικητικά όρια ενός ΟΤΑ. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου, η γεωγραφική του εξάπλωση, αλλά και η οργανωτική, διοικητική, τεχνική και χρηματοδοτική αδυναμία των «μικρών» ΟΤΑ επιτάσσει οι λύσεις να αναζητηθούν στο πλαίσιο ευρύτερων διαδημοτικών

συνεργασιών. Ενώ τα σχετικά χρηματοδοτικά προγράμματα, θα πρέπει να αναζητηθούν είτε από κοινοτικούς πόρους, είτε από εθνικούς.

Τι θα πρέπει να προσέξει κάθε ΟΤΑ για την καλύτερη πρόληψη των πλημμυρών

A) Μέσα στην τοπική κοινωνία οι πολίτες θα πρέπει:

- ✓ Να αναγνωρίζουν και να συμμορφώνονται με τα προειδοποιητικά σήματα,
- ✓ Να ακολουθούν τα διαμορφωμένα σχέδια εκκένωσης,
- ✓ Να μένουν μακριά από περιοχές επιρρεπείς στις κατολισθήσεις,
- ✓ Να γνωρίζουν αν η περιουσία τους βρίσκεται σε περιοχή υψηλού κινδύνου, καθώς και τα προληπτικά μέτρα τα οποία πρέπει να λάβουν σε τέτοια περίπτωση.

B) Οι υπηρεσίες διάσωσης θα πρέπει:

- ✓ Να διαθέτουν εξοπλισμό και εκπαίδευση,
- ✓ Να έχουν στη διάθεση τους τοπικούς χάρτες στους οποίους να σημειώνονται οι περιοχές υψηλού κινδύνου,
- ✓ Να παρακολουθούν τις αλλαγές στη γεωμορφολογία των ποταμιών, αλλά και τα μετεωρολογικά σήματα σε συνεχή βάση,
- ✓ Να εφαρμόζουν τα τοπικά σχέδια έκτακτης ανάγκης,
- ✓ Να αξιολογούν τις άμεσες ανάγκες σε περίπτωση εκκένωσης, καταφυγίου, ιατρικής περίθαλψης, και
- ✓ Να έχουν ανοιχτούς δίαυλους επικοινωνίας με τους πολίτες την ώρα της κρίσης.

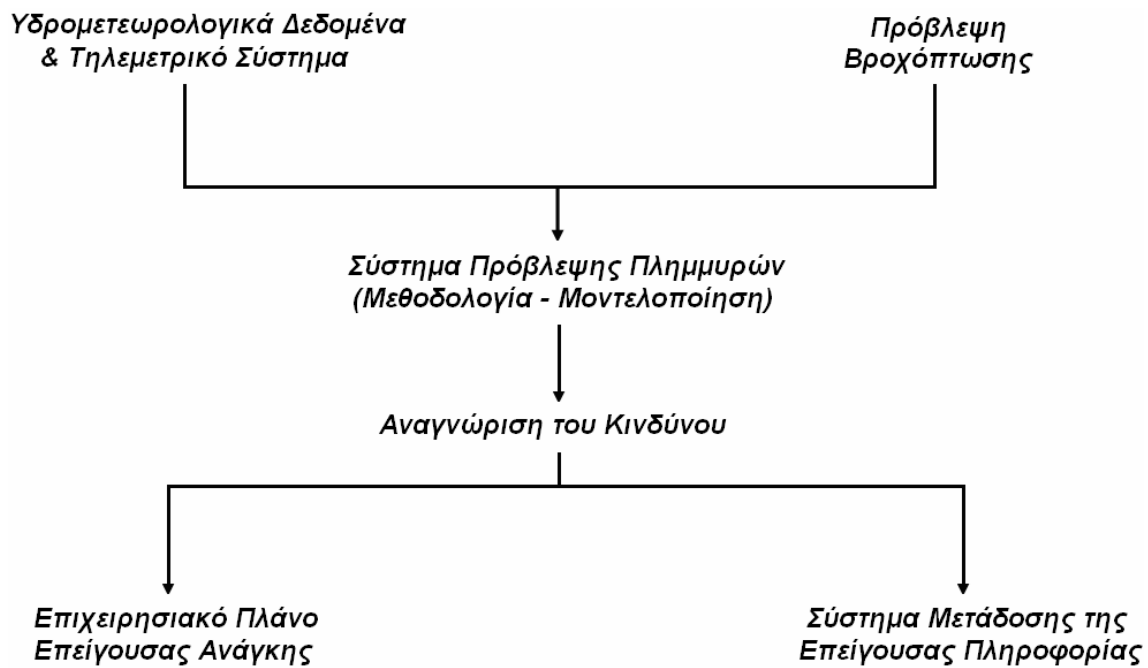
Γ) Οι τοπικές αρχές θα πρέπει:

- ✓ Να διαμορφώνουν πολιτικές για τη διαχείριση των περιοχών υψηλού κινδύνου, πολιτικές που θα ενσωματωθούν στο γενικότερο διαχειριστικό πλάνο των λεκανών απορροής,
- ✓ Να θεσπίσουν ή να ενδυναμώσουν την υπάρχουσα νομοθεσία και το σχεδιασμό ασφαλούς χρήσης γης, ώστε να είναι σε θέση να ρυθμίσουν την ανάπτυξη στις περιοχές υψηλού κινδύνου,

- ✓ Να δημοσιοποιήσουν και να διαθέσουν στο κοινό πληροφορίες για τους κινδύνους μιας πιθανής πλημμύρας,
- ✓ Να εκπαιδεύσουν τις υπηρεσίες εκτάκτου ανάγκης και ιατρικής περίθαλψης, ώστε να βρίσκονται σε ετοιμότητα σε περίπτωση πλημμύρας,
- ✓ Να βελτιώσουν την ετοιμότητα της τοπικής κοινωνίας ενισχύοντας τόσο την επαφή, όσο και τη συμμετοχή στα εθνικά προγράμματα διαχείρισης φυσικών καταστροφών.

3.2.3. Προτεινόμενο σύστημα πρόβλεψης - προειδοποίησης πλημμυρών

Το προτεινόμενο συστήματα προειδοποίησης πλημμυρών καθορίζεται από έξι συνιστώσες (Εικόνα 3.5), που ως τελικό στόχο έχουν τη δυνατότητα μείωσης των απωλειών σε ζωές και καταστροφών σε περιουσίες. Η σπουδαιότητα του προτεινόμενου συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών, έγκειται στο γεγονός ότι μέσω της προώθησης του στους αρμόδιους φορείς υπάρχει η δυνατότητα της έγκυρης εκκένωση οικισμών, στην περίπτωση ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος. Αναλυτικότερα, η αποτελεσματικότητα του συστήματος προειδοποίησης εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης, την επεξεργασία της πρόβλεψης σε προειδοποίηση για τις περιοχές που θα επηρεαστούν, καθώς επίσης και από την ερμηνεία της προειδοποίησης από τους αρμόδιους φορείς που τη λαμβάνουν (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3. 5. Συνιστώσες - Μεθοδολογία πρόβλεψης πλημμυρών.

Σύστημα Πρόβλεψης Πλημμυρών

Οι περισσότερες επιστημονικές αναλύσεις δίνουν έμφαση στο ότι η κατάλληλη μεθοδολογία πρόβλεψης πλημμυρών [Flood Forecasting Methodology] πρέπει να καθορίζει την πλημμυρική απειλή με μια έγκαιρη μέθοδο. Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια των προβλέψεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής πρέπει να ισορροπήσουμε την ανάγκη για ακρίβεια στην πρόβλεψη με τη σωστή ανάλυση της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης, της απορροής και της πορείας του πλημμυρικού κύματος. Για αυτό το λόγο μια έγκαιρη μέθοδος πρόβλεψης πλημμύρας απαιτεί, πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τις υδρομετεωρολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής. Τεχνικές για την απόκτηση βροχομετρικών δεδομένων μαζί με άλλα υδρο- μετεωρολογικά στοιχεία (αέρια θερμοκρασία, εδαφική υγρασία, παροχή) είναι απαραίτητες για την πρόβλεψη των πλημμυρών. Το επόμενο στάδιο αφορά τη διαχείριση των υδρομετεωρολογικών πληροφοριών από τα διαφορετικά συστήματα πρόβλεψης.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος πρόβλεψης έχει άμεση σχέση με τη γεωμορφολογία και το μέγεθος της μελετούμενης λεκάνης απορροής (O'Connell and Clarke, 1981; Franchini and Lamberti, 1994; Lamberti and Pilati, 1996; Moramarco et al., 2006). Αναλυτικότερα, όσον αφορά την πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων πρέπει να ερευνηθεί και να μελετηθεί η ποικιλία των συνιστωσών του

υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα οι μεταβολές στην επιφάνεια του εδάφους (soil level) και στη διάδοση της ροής είτε αυτή είναι επιφανειακή είτε υπόγεια. Είναι προφανές λοιπόν, ότι πρέπει να εκτιμηθεί η ατμοσφαιρική -εδαφική μεταβολή με περισσότερη λεπτομέρεια και ακρίβεια, στην προσπάθεια ερμηνείας των ποικίλων μηχανισμών που την επηρεάζουν. Όσον αφορά τη ροή θα πρέπει να σταθούμε στη δημιουργία των απορροών και στη διάδοση του πλημμυρικού κύματος. Έτσι η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα γενικότερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, θα μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την αντίδραση των πλημμυρικών φαινομένων στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι πληροφορίες αυτές θα εξαχθούν από τη χρήση των υδρολογικών μοντέλων ή με το συνδυασμό αυτών με μοντέλα πρόβλεψης πλημμυρών τα οποία και μελετούν αποκλειστικά τη ροή (πορεία) του πλημμυρικού φαινομένου μέσα σε συγκεκριμένο, κρίσιμο κομμάτι του ποταμού (Michaud and Sorooshian, 1994; Boyle et al., 2001).

Ένα άλλο σημείο στο οποίο πρέπει να σταθούμε είναι η δυνατότητα επέκτασης του χρόνου πρόβλεψης. Είναι θεμελιώδους σημασίας ο χρόνος πρόβλεψης να είναι μεγαλύτερος από το φυσικό χρόνο απόκρισης της λεκάνης απορροής. Όταν ο χρόνος ανταπόκρισης μιας λεκάνης απορροής είναι πολύ μικρός, για τη δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης, είναι απαραίτητο να επεκτείνουμε το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης, μέσω της πρόβλεψης της ποσότητας βροχής που θα πέσει στην περιοχή ενδιαφέροντος στις επόμενες ώρες. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση ντετερμινιστικών μοντέλων πρόβλεψης της ποσότητας της βροχόπτωσης, προερχόμενα από μετεωρολογικά μοντέλα ή με την εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω της ανάλυσης και της εξαγωγής συμπερασμάτων από μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Όταν ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι ίσος ή μικρότερος από 6 ώρες, προτείνεται η χρήση μετεωρολογικών τεχνικών που βασίζονται στο ιστορικό της περιοχής. Η χρήση των τεχνικών αυτών αναφέρονται ως βραχυχρόνια πρόβλεψη 'nowcasting' και οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες (Wilson, 2003):

α) Αλγόριθμοι που βασίζονται στα συμπεράσματα των πιο πρόσφατων παρατηρήσεων, β) Εννοιολογικά μοντέλα μετάδοσης της έναρξης και της απομάκρυνσης του φαινομένου, γ) Μέθοδοι 'nowcasting' βασιζόμενοι στην αριθμητική πρόβλεψη της καταιγίδας.

Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης μπορεί να διαφέρει από λεκάνη σε λεκάνη απορροής και αυτό οφείλεται σε λάθη σχετικά με τις μετρήσεις της βροχόπτωσης

και της απορροής. Γενικά, όσο αυξάνεται ο χρόνος πρόβλεψης τόσο μειώνεται η ακρίβεια, η αξιοπιστία του μεγέθους, της τοποθεσίας και του χρόνου του πλημμυρικού γεγονότος. Είναι εύκολα κατανοητό ότι στην ‘nowcasting’ (0-6 ώρες) πρόγνωση υπάρχει μεγάλη ακρίβεια, αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα πολλές φορές της έγκυρης προειδοποίησης.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της πρόβλεψης των πλημμυρών πρέπει να ερμηνεύονται και να μετατρέπονται σε δεδομένα κατάλληλα να καθορίσουν τους διαφορετικούς βαθμούς προειδοποίησης του κινδύνου. Η μεθοδολογία πρόβλεψης των πλημμυρών πρέπει να ενσωματώνει ένα σύστημα αναγνώρισης του κινδύνου και ένα πλάνο διάδοσης της πληροφορίας (επείγουσας προειδοποίησης του κινδύνου).

Αναγνώριση Κινδύνου και Σύστημα Μετάδοσης της Επείγουσας Πληροφορίας

Η αναγνώριση του κινδύνου μπορεί να γίνει είτε μέσω της ανθρώπινης παρατήρησης και επιθεώρησης είτε μέσω μιας αυτόματης διαδικασίας. Στην πρώτη περίπτωση η αναγνώριση του κινδύνου βασίζεται στην ανθρώπινη παρατήρηση των επιφανειακών ενδείξεων του συστήματος. Η αυτόματη αναγνώριση βασίζεται σε εφαρμογή λογισμικού (software) προκειμένου να καθορισθεί ο κίνδυνος πλημμύρας μέσω της σύγκρισης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (βάση δεδομένων) με μια προκαθορισμένη αφετηρία – κατώφλι κινδύνου. Αφού γίνει η αναγνώριση του πλημμυρικού κινδύνου, η πληροφορία προειδοποίησης πρέπει να μεταδοθεί στους διάφορους χρήστες. Τυπικά, όλοι οι αναγνωρισμένοι κίνδυνοι, αποθηκεύονται αυτόματα σε μια ηλεκτρονική λίστα μαζί με την ημερομηνία και το χρόνο αναγνώρισης. Το απλούστερο σύστημα μετάδοσης του κινδύνου, ειδοποιεί τους χρήστες δια μέσου προειδοποιητικών μηνυμάτων, που καθορίζουν το κίνδυνο (Ford, 2001).

Στο σύστημα πρόβλεψης - προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου η μετάδοση της επείγουσας πληροφορίας μπορεί να εκτελεστεί σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:

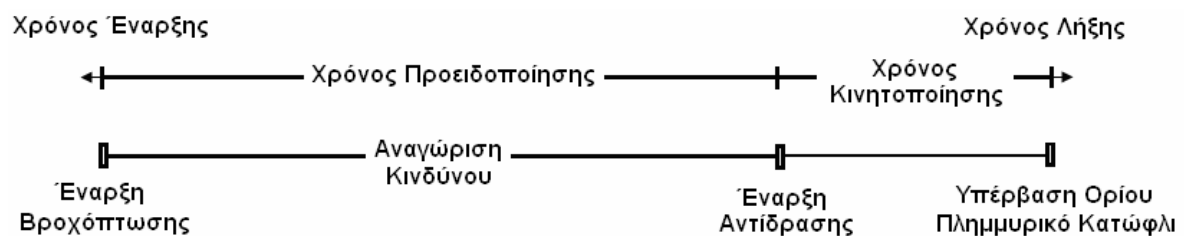
- Άνοιγμα ενός προπαρασκευασμένου αρχείου στο οποίο εισάγεται προειδοποιητικό σημείωμα, για το προσωπικό του δικτύου της τοπικής περιοχής, όταν το επίπεδο νερού στους υδρομετρικούς σταθμούς φτάσει σε μια προκαθορισμένη αφετηρία - κατώφλι κινδύνου.

- Αποστολή email όταν ο ρυθμός βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς υπερβεί τον κρίσιμο ρυθμό.
- Ειδοποίηση του προσωπικού όταν το επίπεδο νερού φτάσει στο κρίσιμο επίπεδο και η βροχή συνεχίζει να πέφτει.
- Δημιουργία και έκθεση χαρτών των πλημμυρισμένων περιοχών, της λεκάνης απορροής, από τις παρατηρηθείσες και/ή προβλεφθείσες τιμές του επιπέδου του νερού στους υδρομετρικούς σταθμούς.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να υπογραμμίσουμε ότι στην περίπτωση διεθνικών λεκανών απορροής (trans-national watersheds) χρειάζεται ειδική οργάνωση, διαχείριση και διεθνής συνεργασία, προκειμένου να έχουμε ένα αξιόπιστο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμυρικά φαινόμενα.

Ποσοτικοποίηση των ωφελιών από ένα σύστημα προειδοποίησης πλημμυρών – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

Το χρονικό διάστημα από την έναρξη της βροχόπτωσης μέχρι την εκδήλωση του πλημμυρικού γεγονότος, μπορεί να χωριστεί σε δυο χρονικές περιόδους: α) Το χρόνο προειδοποίησης (Warning time) που περιλαμβάνει τα χρονικά διαστήματα της συλλογής, εκτίμησης, ειδοποίησης και λήψης της τελικής απόφασης και β) Το χρόνο κινητοποίησης (mitigation time) του κρατικού μηχανισμού προκειμένου να μειώσει, κατά το δυνατό, τις επιπτώσεις της επερχόμενης πλημμύρας. Ο χρόνος κινητοποίησης αρχίζει από τη στιγμή της λήψης της τελικής απόφασης μέχρι την εκδήλωση του πλημμυρικού γεγονότος (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3. 6. Κατηγοριοποίηση του διαθέσιμου χρόνου μέχρι την εκδήλωση του πλημμυρικού γεγονότος (Flood timeline).

Έτσι για παράδειγμα αν ο χρόνος απόκρισης μιας λεκάνης απορροής σε ένα πλημμυρικό γεγονός είναι 12 h και ο χρόνος προειδοποίησης είναι 8 h, τότε

γίνεται αντιληπτό ότι ο υπολειπόμενος χρόνος μέχρι την εκδήλωση της πλημμύρας είναι 4h. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να κινητοποιηθεί και να προετοιμασθεί ο κρατικός μηχανισμός προκειμένου να λάβει τα κατάλληλα μέτρα (εκκένωση, ιατροφαρμακευτική περίθαλψη κ.τ.λ).

Περισσότερος χρόνος προετοιμασίας - κινητοποίησης, μέσω ενός εγκαίρου συστήματος προειδοποίησης πλημμύρας δημιουργεί περισσότερα ωφέλη. Τα οφέλη από ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών μπορούν να καταταγούν σε τέσσερις κατηγορίες (Carsell et al., 2004):

1. Άμεσα - πραγματικά οφέλη. Τα πραγματικά οφέλη είναι εκείνα στα οποία η νομισματική αξία μπορεί να οριστεί, και τα άμεσα οφέλη είναι εκείνα που προέρχονται από τους ανθρώπους και τις ιδιοκτησίες που προστατεύονται από το σύστημα. Τα οφέλη αυτά έγκεινται σε ενέργειες που θα παράγουν όφελος, είτε με τη μείωση της σχετικής με την πλημμύρα ζημιάς είτε με τη μείωση του οικονομικού κόστους μιας έκτασης που κινδυνεύει να πλημμυρίσει.

2. Άμεσα – μη πραγματικά οφέλη. Τα μη πραγματικά οφέλη είναι εκείνα που προκύπτουν μέσα στην πλημμυρική περιοχή και που δεν μπορούν να μετρηθούν εύκολα με νομισματικούς όρους.

3. Έμμεσα -πραγματικά οφέλη. Οικονομικά οφέλη για αυτούς που βρίσκονται έξω από τη ζώνη που προστατεύεται από το σύστημα προειδοποίησης.

4. Έμμεσο – μη πραγματικό όφελος. Είναι τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν για εκείνους που βρίσκονται εκτός των πλημμυρισμένων περιοχών και που προκύπτουν ως συνέπεια της μείωσης του στρες. Για παράδειγμα, η ψυχολογική πίεση των οικογενειών και των φίλων μπορεί να είναι σημαντική εάν η είδηση μιας πλημμύρας φθάσει και δεν υπάρχει δυνατότητα επαφής με τους κατοίκους των πλημμυρισμένων περιοχών. Η διακοπές των δικτύων επικοινωνίας που πιθανόν να δημιουργηθούν από τις πλημμύρες μπορούν να περιοριστούν με ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, παρέχοντας έτσι ένα επιπλέον όφελος.

Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουμε τα οφέλη ενός συστήματος πρόβλεψης - προειδοποίησης πλημμυρικών φαινομένων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, είναι αναγκαία η εγκατάσταση τηλεμετρικών μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών. Με αυτό τον τρόπο όλα τα βροχομετρικά και υδρομετρικά δεδομένα καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο, και χρησιμοποιούνται μετέπειτα σε υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης για την πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων. Στην περίπτωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εγκαταστάθηκαν τρεις τηλεμετρικοί υδρομετρικοί και τρεις τηλεμετρικοί μετεωρολογικοί σταθμοί. Το παραπάνω τηλεμετρικό σύστημα μεταφοράς δεδομένων σε πραγματικό χρόνο παρέχει σε μας τη δυνατότητα να γνωρίζουμε ανά πάσα στιγμή της μετεωρολογικές και υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στους αντίστοιχους σταθμούς. Προκειμένου να προσομοιώσουμε την υδρολογία της σύνθετης γεωμορφολογικά λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, δημιουργήθηκε και εφαρμόστηκε ο συνδυασμός πολλών μοντέλων όπως του υδρολογικού μοντέλου HSPF, ενός καρστικού μοντέλου και ενός μοντέλου ρυθμού τήξης χιονιού. Αναλυτικότερα η μοντελοποίηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη θα παρουσιαστεί στο επόμενο, (Κεφάλαιο 4).

Τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης έδειξαν μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και των δεδομένων πεδίου (Kourgialas et al., 2008; Kourgialas et al., 2010). Επιπρόσθετα μέσω της ανάλυσης των υδρογραφημάτων και των αντίστοιχων βροχοπτώσεων (σταθμοί H1 και M1), (Εικόνα. 3.1 A) υπολογίστηκε ότι ο χρόνος συγκέντρωσης (Χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης) για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι περίπου 19 ώρες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο παραπάνω χρόνος είναι επαρκής - ικανοποιητικός για την αναγνώριση του κινδύνου και την ενημέρωση των αρμοδίων φορέων για την εμφάνιση ενός ακραίου πλημμυρικού γεγονότος (Kourgialas & Karatzas, 2009). Στην περίπτωση όμως, που ο χρόνος δεν είναι επαρκής, η προηγούμενη γνώση των περιοχών εκείνων που εμφανίζουν πολύ υψηλό δείκτη επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Καθώς οι πλημμύρες είναι πολύπλοκα και εκ φύσεως υψηλής αβεβαιότητας φαινόμενα, κατ' επέκταση και η πρόβλεψη τους εμπεριέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη έγκειται σε τρεις κυρίως πηγές σφαλμάτων: α) Αβεβαιότητα στις μετρήσεις, β) Αβεβαιότητα στην πρόγνωση

του καιρού, και γ) Αβεβαιότητα των υδρολογικών μοντέλων (Krzysztofowicz, 2001). Η πρώτη και η δεύτερη πηγή σφάλματος εξαρτώνται από την ποιότητα των δεδομένων, ενώ η τρίτη έχει σχέση με το ίδιο το μοντέλο. Στη λεκάνη απορροή του ποταμού Κοιλιάρη, εξαιτίας του μικρού της μεγέθους, της γνώσης σε πραγματικό χρόνο των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων και λόγω της πολύ καλής υδρολογικής προσομοίωσης μέσω των χρησιμοποιούμενων μοντέλων, η συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητική.

Είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να υπολογίσουμε με ένα πρακτικό τρόπο το κατά πόσον οι ζημιές μπορούν να μειωθούν με τη χρήση ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν τρόποι υπολογισμού των ωφελειών από ένα σύστημα προειδοποίησης μέσω της μείωσης των ζημιών που δύναται να προκληθούν από πλημμύρες.

Το Flood Hazard Research Center (FHRC) του Ηνωμένου Βασιλείου, μέσω πολυάριθμων παρατηρήσεων, προτείνει ότι η πραγματική ζημιά Da που μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών, μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω εξίσωση (Carsell et al., 2004):

$$Da = Dp \times R \times Pa \times Pr \times Pe \quad (3.1)$$

Όπου:

Dp = Μέγιστη πραγματική ζημιά που μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών (*maximum potential flood damage avoided with a fully effective system*),

R = Αξιοπιστία του συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών (*reliability of the flood warning system*),

Pa = Δυνατότητα απόκρισης των κατοίκων στην προειδοποίηση (*fraction of residents available to respond to a flood warning*),

Pr = Δυνατότητα των νοικοκυριών να αποκριθούν σε μια προειδοποίηση για πλημμύρα, ή έχουν κάποιους άλλους να το κάνουν για αυτούς (*fraction of households who will respond to a flood warning or have others who will do so for them*),

Pe = Δυνατότητα των νοικοκυριών να αποκριθούν αποτελεσματικά (*fraction of households who respond effectively*).

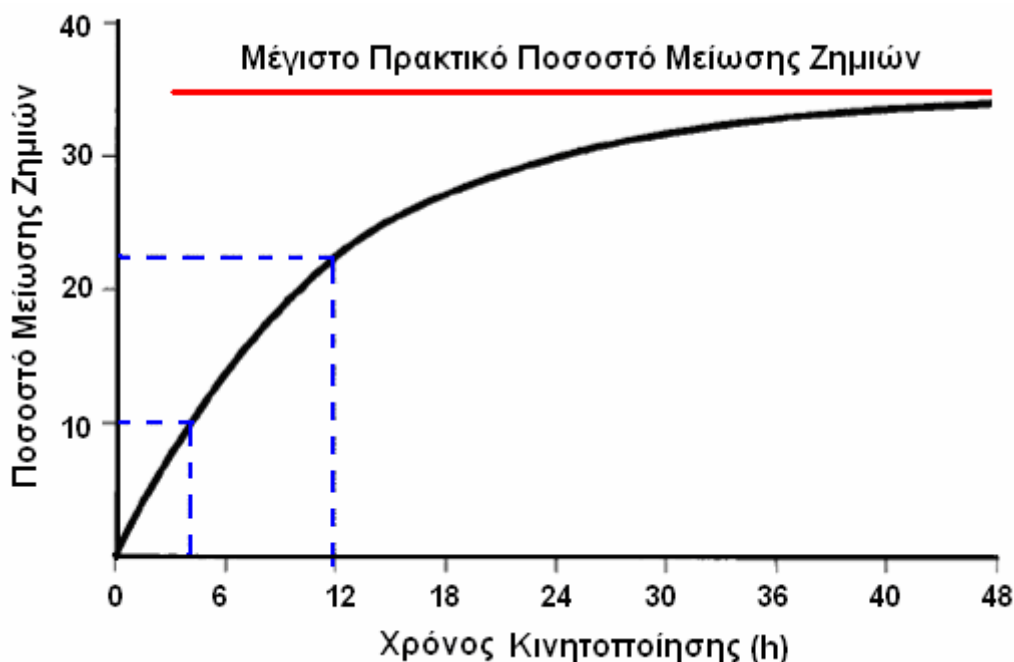
Η τιμή καθενός από τους παραπάνω παράγοντες κυμαίνεται από 0.0 έως 1.0, αντιπροσωπεύοντας την αποδοτικότητα των επιμέρους παραμέτρων.

Σχετικά με την παράμετρο Pa , αν η προειδοποίηση βασίζεται σε μεγάφωνα ή μέσω σειρήνας, η τιμή είναι ίση με 0.55. Στην περίπτωση ύπαρξης προσωπικού παρατήρησης και αναγνώρισης του κινδύνου (προσωπικό πολιτικής προστασίας) “flood wardens” σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους προειδοποίησης, η τιμή της παραμέτρου είναι ίση με 0.65. Όταν ο χρόνος υλοποίησης της προειδοποίησης είναι μεταξύ 6 και 8 ωρών, η τιμή της παραμέτρου είναι ίση με 0.80.

Για την παράμετρο Pr , χωρίς βοήθεια από φίλους ή την οικογένεια, η τιμή της παραμέτρου είναι ίση με 0.75. Με βοήθεια από φίλους ή την οικογένεια, η τιμή της παραμέτρου είναι ίση με 0.80. Επίσης η τιμή της παραμέτρου Pe κυμαίνεται μεταξύ 0.70 και 0.95, ενώ η τιμή της παραμέτρου R κυμαίνεται μεταξύ 0.0 και 1.0, ανάλογα με την αξιοπιστία του συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου. Η παραπάνω αξιολόγηση είναι κατά γενική ομολογία υποκειμενική, εντούτοις, επιτρέπει μια ενδεικτική αξιολόγηση του συστήματος.

Προκειμένου να προσδιοριστεί τη μέγιστη πραγματική ζημιά που μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών, Dp , χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Day’s. Ο Day (1970) πρότεινε ότι τα απτά οφέλη από ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμύρες μπορούν να υπολογιστούν σε σχέση με το χρόνο προειδοποίησης. Όσο μειώνεται ο χρόνος προειδοποίησης, τόσο αυξάνεται ο διαθέσιμος χρόνος κινητοποίησης του κρατικού μηχανισμού μέχρι την εκδήλωση του πλημμυρικού φαινομένου. Έτσι δημιουργήθηκε η καμπύλη Day (Εικόνα 3.7) μείωσης των ζημιών με όρους ποσοστού, της μέγιστης πιθανής ζημιάς, σε σχέση με το χρόνο μεταξύ της προειδοποίησης και της δημιουργίας του πλημμυρικού φαινομένου. Αν ο χρόνος κινητοποίησης είναι ίσος με 0 ώρες, η καμπύλη προβλέπει ότι το σύστημα προειδοποίησης δεν αποδίδει απτά οφέλη. Αν ο χρόνος κινητοποίησης είναι ίσος με 12 ώρες, η καμπύλη προβλέπει ότι η ζημιά θα μειωθεί κατά 23%.

Στην καμπύλη Day επίσης φαίνεται ότι ανεξάρτητα του πόσο μεγάλος είναι ο χρόνος μεταξύ της προειδοποίησης και της δημιουργίας του πλημμυρικού φαινομένου, η μέγιστη δυνατή μείωση των ζημιών φτάνει το 35% των συνολικών ζημιών, εξαιτίας της πλημμύρας. Αυτό είναι λογικό καθώς αρκετά περιουσιακά στοιχεία συμπεριλαμβανομένου των περισσότερων κτιρίων δεν μπορούν να μετακινηθούν.



Εικόνα 3. 7. Καμπύλη Day's. (Day, 1970)

Καθώς από το 2007, στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη υπάρχουν τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί, τοποθετημένοι στρατηγικά σε σημεία τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικά για την ακριβή προσέγγιση της χωρικής μεταβλητότητας της βροχοπτώσης (υψόμετρα των 0, 400 και 1000 m AMSL).

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, η υψηλή αξιοπιστία του συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου, μπορεί να διασφαλιστεί α) από την πυκνότητα του τηλεμετρικού συστήματος μετάδοσης των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, β) την πολύ καλή υδρολογική προσομοίωση της απόκρισης της λεκάνης απορροής μέσω του υδρολογικού μοντέλου HSPF, και γ) μέσω του συνεπακόλουθου προσδιορισμού του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης ενός επικείμενου πλημμυρικού γεγονότος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη έχει ένα αρκετά ικανοποιητικό σύστημα πρόβλεψης – προειδοποίησης

πλημμυρικού κινδύνου (Flood Forecasting Warning System). Προκειμένου να υπολογίσουμε την πραγματική ζημία D_a που μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος προειδοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν η Εξίσωση 3.1, και η μέθοδος Day's.

Έτσι, θεωρώντας ότι η αξιοπιστία του παρόντος συστήματος πρόβλεψης – προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου (R) για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι ίση με 0.9 (αβεβαιότητα πλημμυρικής πρόβλεψης εκκρίπτει κατά 0.1), εφαρμόζοντας την Εξίσωση 3.1, έχουμε ότι:

$$D_a = D_p \times R \times P_a \times P_r \times P_e$$

$$D_a = 0.35 \times 0.9 \times 0.65 \times 0.8 \times 0.9 = 14.74\%$$

Η εκτιμώμενη τιμή του ποσοστού 14.74% σημαίνει ότι, αν ένα πλημμυρικό γεγονός συνέβαινε στη λεκάνη απορροής πριν την εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος πρόβλεψης – προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου (Flood Forecasting-Warning System), και προκαλούσε ζημιές αξίας 100.000 Ευρώ, το οικονομικό όφελος από την ύπαρξη του παρόντος συστήματος θα ανέρχονταν στο ποσό των 14,740 Ευρώ.

3.3.4. Μετά-Πλημμυρικά Μέτρα

Η τρίτη δράση της προτεινόμενης ορθής στρατηγικής διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων αφορά τα μετά-πλημμυρικά μέτρα. Αυτά τα μέτρα προωθούν τη γρήγορη αποκατάσταση των πληγεισών περιοχών από την πλημμύρα και συμπεριλαμβάνουν μέτρα ανακούφισης, μέτρα αποκατάστασης της ζημιωθείσας υποδομής και μέτρα αναθεώρησης της αποτελεσματικότητας του αντιπλημμυρικού συστήματος. Ένας ΟΤΑ που έχει υιοθετήσει τόσο ένα πρόγραμμα ετοιμότητας, όσο και ένα σχέδιο άμβλυσης των συνεπειών μιας ενδεχόμενης πλημμύρας, μπορεί να ανταποκριθεί πολύ πιο εύκολα σε ένα τέτοιο φαινόμενο. Δύο είναι οι πρώτες κινήσεις στις οποίες πρέπει να προχωρήσει η τοπική αρχή σε μια τέτοια κατάσταση (Penning-Rowsell et al., 2005b):

Άμεση ανταπόκριση - Η επιτυχημένη λειτουργία ενός προγράμματος ετοιμότητας είναι αποτέλεσμα καλής προετοιμασίας. Η εμπειρία δείχνει ότι όταν τα μέτρα και οι διαδικασίες έκτακτης ανάγκης έχουν σχεδιαστεί, έχουν γίνει κατανοητά και έχουν χρησιμοποιηθεί, ο χρόνος ανταπόκρισης και αντίδρασης

των μηχανισμών ενός ΟΤΑ μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, ο συντονισμός βελτιώνεται και συνολικά το πρόγραμμα απολαμβάνει μια πιο αποτελεσματική εφαρμογή.

Αμβλυση συνεπειών - Όταν οι πρώτες ώρες μετά από την πλημμύρα έχουν περάσει, ένας μεγάλος αριθμός ενεργειών πρέπει να ληφθεί προκειμένου να αμβλυνθούν οι συνέπειες της:

- ✓ Να γίνουν γνωστές οι αιτίες της πλημμύρας, οι περιοχές που έχουν πληγεί και ο βαθμός καταστροφής.
- ✓ Επαφή με τους συναισθηματικά φορτισμένους πολίτες που ζητούν άμεσες πράξεις και απαντήσεις.
- ✓ Να αξιολογηθεί η πιθανότητα και το είδος της εξωτερικής βοήθειας που μπορεί να αναμένει ένας ΟΤΑ σε παρόμοιες καταστάσεις. Οι ΟΤΑ θα πρέπει να συμπληρώσουν τους δικούς τους περιορισμένους πόρους μέσω έκτακτων επιχορηγήσεων. Για το λόγο αυτό οι τοπικές αρχές θα πρέπει να γνωρίζουν τόσο τα υπάρχοντα υποστηρικτικά προγράμματα, όσο και τις προϋποθέσεις που έχει θέσει το κράτος ή η Ευρωπαϊκή Ένωση, ώστε να μπορούν να απευθυνθούν σε αυτά.
- ✓ Να δρομολογηθούν άμεσα οι δράσεις που απευθύνονται στη «μετά-πλημμυρική» περίοδο. Η καλύτερη χρονική στιγμή για να εξασφαλίσει κανείς ότι το ενδεχόμενο της πλημμύρας δεν θα επαναληφθεί είναι ακριβώς πριν αρχίσουν οι επιδιορθώσεις στις κατεστραμμένες δομές. Είναι η πιο κατάλληλη στιγμή για να εφαρμοστούν τα απαραίτητα βήματα για να μειωθεί ο κίνδυνος μελλοντικών πλημμύρων, κάτι που όμως προϋποθέτει την καλή προετοιμασία των τοπικών αρχών, ώστε να είναι σε θέση να προτείνουν τα επόμενα μέτρα.

Η προσέγγιση αυτή συνοδεύεται από τα παρακάτω μέτρα:

- ✓ Απομάκρυνση των κατεστραμμένων δομών από τις περιοχές που έχουν πλημμυρίσει.
- ✓ Θέσπιση διατάξεων που θα ορίζουν τις αντιπλημμυρικές τεχνικές στην κατασκευή.
- ✓ Έλεγχος των χρήσεων γης που θα κατευθύνει την ανάπτυξη στις ασφαλείς περιοχές.
- ✓ Καμπάνιες ενημέρωσης του κοινού.

- ✓ Λήψη μέτρων για την ενίσχυση της αντιπλημμυρικής προστασίας στα ήδη υπάρχοντα κτίρια.
- ✓ Έργα για τη συγκράτηση των υδάτων που εμπεριέχουν κινδύνους πρόκλησης πλημμύρας.

3.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS

3.4.1.Γενικά

Η ανάγκη εκτίμησης της επικινδυνότητας μιας περιοχής όσον αφορά διάφορα φαινόμενα και ιδιαίτερα τις φυσικές καταστροφές (ρύπανση υπόγειου νερού, πλημμύρες, διάβρωση εδαφών, κτλ.) υπήρχε από πολύ παλιά αλλά άρχισε να εφαρμόζεται σαν πρακτική τη δεκαετία του 60 με την ισοχυροποίηση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία εξειδικευμένου λογισμικού χαρτογραφίας. Αρχικά εφαρμόστηκε για την εκτίμηση επικινδυνότητας ρύπανσης του υπόγειου νερού και μετέπειτα εξαπλώθηκε σε άλλες διεργασίες με έμφαση τις φυσικές καταστροφές (σεισμούς, πλημμύρες, διάβρωση εδαφών, κτλ.), (Adget, 2006).

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας είναι η ταξινόμηση των μοναδιαίων τμημάτων της υπό μελέτη περιοχής σε κατηγορίες επικινδυνότητας ως προς την εξεταζόμενη παράμετρο (Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή και Πολύ Χαμηλή). Η ταξινόμηση αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που διαμορφώνουν και επηρεάζουν τη διεργασία που αποτιμάται και δίνοντας σχετικούς συντελεστές βαρύτητας σε αυτούς. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται συνήθως σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) από όπου παράγονται θεματικοί χάρτες για κάθε μια παράμετρο που εξετάζεται. Η αλγεβρική συνένωση των θεματικών χαρτών και η κατάλληλη κατηγοριοποίηση των τιμών βαρύτητας δίνει το χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας για την εξεταζόμενη διεργασία. Οι σύγχρονες επιστημονικές, διαχειριστικές αλλά και νομοθετικές πρακτικές, όπως η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EC, επιβάλλουν την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας ως μια σημαντική προσέγγιση για την αποτελεσματικότερη διαχείριση και προστασία του ανθρωπογενούς και φυσικού περιβάλλοντος (Gallorín, 2006). Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η μεθοδολογία χωρικού προσδιορισμού της πλημμυρικής επικινδυνότητας, θα ήταν χρήσιμο στην

επόμενη ενότητα να αναφερθούμε στα γενικά χαρακτηριστικά των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

3.4.2. Ορισμός και γενική περιγραφή του GIS

Η ανάγκη για αξιοπιστία και επεξεργασία των πληροφοριών οδήγησε το σύγχρονο άνθρωπο στη δημιουργία και ανάπτυξη εργαλείων που του επιτρέπουν να συλλέγει και να επεξεργάζεται αξιόπιστες πληροφορίες, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη ζωή του και το φυσικό περιβάλλον. Ένα σύστημα (ηλεκτρονικοί υπολογιστές και σχετικές περιφερειακές μονάδες) το οποίο διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για την καλύτερη δυνατή συλλογή, επεξεργασία και διαχείριση των πληροφοριών ονομάζεται Σύστημα Πληροφοριών. Όταν οι πληροφορίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με γεωγραφικές συντεταγμένες τότε χαρακτηρίζονται ως γεωγραφικές. Κατά επέκταση τα συστήματα πληροφοριών που διαχειρίζονται τις πληροφορίες αυτές (αυτό δεν αποκλείει το γεγονός να περιέχουν και μη γεωγραφικές πληροφορίες) ονομάζονται Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Ένας ευρύς ορισμός για τα ΓΣΠ δόθηκε από τον Goodchild το 1985 σύμφωνα με τον οποίο: *Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης πληροφοριών σχετικών με ζητήματα γεωγραφικής φύσης.*

Από τον ορισμό αυτό γίνεται κατανοητό ότι τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών δεν είναι απλά ένα μέσο δημιουργίας χαρτών, διαγραμμάτων και πινάκων ποιοτικών δεδομένων, αλλά μία καινοτόμος τεχνολογία, η οποία ως κύριο σκοπό έχει την ανάλυση και τη μελέτη του τρισδιάστατου χώρου στον οποίο ζούμε, καθώς και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το φυσικό περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την εκπόνηση μελετών με χρήση κάποιου Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών είναι οι ακόλουθες (Τσουκλαράκη 2000-2001):

- Κωδικοποίηση και εισαγωγή της πληροφορίας στο ΓΣΠ
- Αποθήκευση και διαχείριση της πληροφορίας
- Ανάκτηση της πληροφορίας
- Ανάλυση και επεξεργασία της πληροφορίας
- Απεικόνιση της πληροφορίας

Τα είδη των διαφόρων πληροφοριών που μπορούν να καταχωρηθούν από ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ανάλογα με το αντικείμενο ή φαινόμενο της εκάστοτε μελέτης είναι ποικίλα. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από πολλαπλές πηγές οπότε ενδέχεται να έχουν διαφορετική τυποποίηση και δομή. Όσον αφορά στους διαφορετικούς τύπους των δεδομένων, αυτοί μπορεί να είναι χάρτες, εικόνες, φωτογραφίες, ψηφιακά δεδομένα, πίνακες, κείμενα κλπ. Όλα τα δεδομένα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο μεγάλες κύριες κατηγορίες, τα χωρικά και τα ποιοτικά δεδομένα. Τα χωρικά δεδομένα αφορούν στη θέση, στη μορφή των αντικείμενων, δομών ή φαινομένων που μελετώνται. Η χωρική πληροφορία αποδίδει τη γεωγραφική ταυτότητα κάθε στοιχείου που εισάγεται στα ΓΣΠ, η οποία υλοποιείται με κάποιο σύστημα συντεταγμένων ή με κάποιο ψηφιακό χάρτη. Τα ποιοτικά ή περιγραφικά δεδομένα περιλαμβάνουν τιμές και χαρακτηριστικά διαφόρων στοιχείων, τα οποία παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων ή καταλόγων αναφορών και δε σχετίζονται με την τοποθέτηση του εκάστοτε στοιχείου στο χώρο. Μέσω των δομών λειτουργίας των ΓΣΠ είναι εφικτή η αμφίδρομη σχέση μεταξύ χωρικών και ποιοτικών δεδομένων.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΓΣΠ (GIS)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ΓΣΠ είναι (Καρτέρης 2002-2003):

- Διατήρηση των δεδομένων (κλίσεις, κάλυψη γης κ.λ.π.) σε ψηφιακή μορφή με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν μικρό χώρο και να είναι εύχρηστα.
- Οι γεωγραφικές βάσεις δεδομένων είναι ποσοτικές πληροφορίες οι οποίες είναι δυνατόν να καταχωρούνται κατά οποιαδήποτε γεωγραφική μονάδα ή διάταξη.
- Οι γεωγραφικές βάσεις δεδομένων είναι δυνατόν να δημιουργηθούν για οποιοδήποτε αντικείμενο, χαρακτηριστικό, ιδιότητα ή συνδυασμό αυτών.
- Τα υπάρχοντα λογισμικά επιτρέπουν διάφορες μορφές επεξεργασίας, μετατροπών κ.α. διότι παρουσιάζουν συμβατότητα με τους τύπους αρχείων των ΓΣΠ.
- Οι διάφορες μορφές εξαγόμενων αποτελεσμάτων παράγονται πολύ γρήγορα, αποτελούνται από μεμονωμένα ή σύνθετα θέματα, για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση της βάσης δεδομένων και σε οποιαδήποτε κλίμακα.

- Η βάση δεδομένων μπορεί να ενημερώνεται εύκολα και επιτρέπει τον αποτελεσματικό εντοπισμό και ανάλυση των αλλαγών που έγιναν σε δύο ή περισσότερες περιόδους.
- Οι διάφορες μορφές ανάλυσης πραγματοποιούνται με πολύ μικρότερο κόστος και πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με κλασικές μεθόδους.
- Όλες οι αναλύσεις γίνονται με αντικειμενικό τρόπο και υπάρχει πλήρης αυτοματισμός στην παραγωγή αποτελεσμάτων.
- Υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού λογισμικών Τηλεπισκόπησης με λογισμικά GIS, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία ενημερωμένων κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο, βάσεων δεδομένων καθώς και την εισαγωγή, ανάλυση και εξαγωγή συγκεκριμένων δεδομένων (τοπογραφικά, υδρολογικά, εδαφολογικά κ.α.).
- Υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης δεδομένων GPS (Global Positioning System) με GIS, παρέχοντας on – line και real – time δεδομένα.
- Η παραγωγή χαρτών μέσω του GIS μπορεί να προσαρμοσθεί στις ιδιαίτερες ανάγκες ενός προβλήματος.

Εκτός όμως, από τα εμφανή πλεονεκτήματα τους, τα ΓΣΠ έχουν και κάποια μειονεκτήματα που σχετίζονται κυρίως με το κόστος απόκτησης τους, τη χρήση τους που απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και τη μετατροπή και καταχώρηση ορισμένων υπάρχοντων δεδομένων σε συγκεκριμένη βάση δεδομένων. Εντούτοις, το κυριότερο πρόβλημα στην Ελλάδα είναι η εύρεση ενημερωμένων χαρτογραφικών υλικών, όπως χάρτες βλάστησης, κάλυψης γης, δημογραφικών πληροφοριών κ.α. Παρόλα αυτά, η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού έχει αρχίσει να παράγει ψηφιοποιημένα δεδομένα (χάρτες ισοϋψών, χρήσεων γης, γεωλογικούς χάρτες κ.α.) τα οποία μπορούν να εισαχθούν εύκολα σε ένα ΓΣΠ και να εξαχθούν τα απαραίτητα χαρτογραφικά δεδομένα.

Χαρτογραφικό και πληροφοριακό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διδακτορική διατριβή

Το χαρτογραφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από:

1. Ένα χάρτη της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:50.000. Ο χάρτης αποτελείται από τα φύλλα HATT 65, 75, 380. Ο χάρτης χρησιμοποιήθηκε

για τη ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών με στόχο την τελική παραγωγή του Τρισδιάστατου Μοντέλου Εδάφους, των θέσεων των οικισμών, του οδικού δικτύου και τη ψηφιοποίηση του ποταμού Κοιλιάρη.

2. Ένα γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) κλίμακας 1:50.000.

3. Αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:5.000, οι οποίες συντέθηκαν σε ένα μωσαϊκό αεροφωτογραφιών συνολικής κλίμακας 1:50.000 και χρησιμοποιήθηκαν για να γίνουν διορθώσεις των ψηφιοποιημένων στοιχείων.

4. Ένας ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης από το πρόγραμμα CORINE LAND COVER 2000.

Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Η γεωαναφορά (georeferencing), η ψηφιοποίηση των δεδομένων εισόδου, η εισαγωγή περιγραφικών πληροφοριών και η παραγωγή του Τρισδιάστατου Μοντέλου Εδάφους έγινε σε περιβάλλον ArcView 9.2. Για την πραγματοποίηση τους χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω extensions:

- 3-D Analyst
- Spatial Analyst
- Image Analysis
- Geoprocessing
- JPEG image support
- Projection Utility Wizard και
- TIFF 6.0 image support

Η ανάλυση των δεδομένων εισόδου έγινε σε περιβάλλον ArcGIS 9.2, της εταιρίας Marathon Data Systems (MDS). Το λογισμικό αυτό, διαχωρίζεται σε εφαρμογές λογισμικών (ESRI, 2006).

- το ArcMap, που αποτελεί την κεντρική εφαρμογή για την εισαγωγή, ανάλυση, επεξεργασία και χαρτογράφηση των δεδομένων,
- το ArcCatalog που είναι μια εφαρμογή οργάνωσης και διαχείρισης των αρχείων, και
- το ArcScene που αποτελεί μια εφαρμογή επεξεργασίας και προβολής τρισδιάστατων γεωγραφικών πληροφοριών.

Για τη μοντελοποίηση των δεδομένων εισόδου χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή ModelBuilder που αποτελεί ένα γραφικό πλαίσιο μοντελοποίησης για την εφαρμογή και υλοποίηση γεωαναλυτικών μοντέλων.

Προβολικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε

Προβολικό σύστημα ονομάζεται ένα σύστημα που επιτρέπει την απεικόνιση του ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο. Οι προβολές διακρίνονται σε ισαπέχουσες, σύμμορφες, και ισοδύναμες, ανάλογα με το βαθμό παραμόρφωσης των μεγεθών επί του ελλειψοειδούς. Ανάλογα με την επιφάνεια που χρησιμοποιείται, οι προβολές διακρίνονται σε αζιμουθιακές, κωνικές και κυλινδρικές (Καρτέρης 1995).

Οι τοπογραφικοί χάρτες, ήταν αρχικά προβεβλημένοι στο σύστημα HATT (Πίνακας 3.1), (η περιοχή μελέτης ανήκει στα Φύλλα Χαρτών HATT 65, 75 και 380 τα οποία αποτελούν ισαπέχουσα αζιμουθιακή προβολή). Στην ουσία χρησιμοποιείται ένα επίπεδο αναφοράς, το οποίο εφάπτεται σε ένα σημείο του ελλειψοειδούς που ονομάζεται Κέντρο Φύλλου Χάρτη (Κ.Φ.Χ.). Έτσι, για τον Ελλαδικό χώρο ορίζονται συνολικά 130 σφαιροειδή τραπέζια μεγέθους 30'Χ30' για την κάλυψη του. Κάθε τραπέζιο έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, με αρχή των αξόνων το Κ.Φ.Χ.

Το Προβολικό Σύστημα ΕΓΣΑ 87 είναι το πλέον πρόσφατο προβολικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και είναι προϊόν συνεργασίας του Εργαστηρίου Ανωτέρας Γεωδαισίας του Τμήματος Αγρονόμων – Τοπογράφων του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου και της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Θεωρείται μια ενιαία ζώνη για όλη την Ελλάδα με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda_0=24^\circ$ και χρησιμοποιείται ενιαίος συντελεστής κλίμακας 0.9996. Οι παραμορφώσεις με αυτό τον τρόπο μπορούν να φτάσουν μέχρι και 1:1000 στα άκρα της χώρας (1 m σε απόσταση 1 Km). Για να αποφευχθούν αρνητικές τιμές, ο κεντρικός μεσημβρινός έχει ως τετμημένη 500000 μέτρα και αρχή των τεταγμένων θεωρείται ο ισημερινός ($\varphi=0^\circ$). Το ΕΓΣΑ 87 τείνει να γίνει το επίσημο προβολικό σύστημα συντεταγμένων καθώς προσφέρει ενιαία αναφορά για το σύνολο της χώρας και έχει ήδη υιοθετηθεί από τις περισσότερες δημόσιες υπηρεσίες και οργανισμούς καθώς και από ιδιωτικές εταιρίες (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3. 1. Προβολικό σύστημα HATT. (Γ.Υ.Σ.)

Προβολικό σύστημα HATT	
Όνομα προβολικού συστήματος:	Ισαπέχουσα Αζιμουθιακή προβολή του HATT
Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum):	Ελληνικό, με αφετηρία το Αστεροσκοπείο Αθηνών ($\lambda_0=23^{\circ}42' 58''.815$)
Ελλειψοειδές αναφοράς:	Bessel
Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a:	6377397.155m
Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1/f):	1/299.1528128
Διαστάσεις φύλλων χάρτη:	30° x 30°
Αριθμός φύλλων χάρτη:	189

Πίνακας 3. 2. Προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87. (Γ.Υ.Σ.)

Προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87	
Επίσημη ονομασία :	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87
Προβολή:	Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (UTM)
Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum):	Ε.Γ.Σ.Α. 87 με αφετηρία το μετατεθειμένο γεώκεντρο (βάθρο Διονύσου)
Ελλειψοειδές αναφοράς:	GRS'80
False Easting:	500000
False Northing:	0
Latitude of origin:	0
Prime Meridian:	Athens (23.71633)
Central Meridian:	24
Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a:	6378137.000 m
Μικρός ημιάξονας ελλειψοειδούς	6356752,3141m
Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1/f):	1/298.25722101
Συντελεστής κλίμακας K ₀	0.9996

Τόσο οι τοπογραφικοί χάρτες που εισήχθησαν ως εικόνες (με επέκταση .tiff, .jpeg ή image analysis) στο λογισμικό, όσο και τα στοιχεία που ψηφιοποιήθηκαν πάνω στους χάρτες και τις αεροφωτογραφίες, γεωαναφέρθηκαν στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87 (ΕΓΣΑ 87) με τη βοήθεια του align tool του ArcView 9.2, ενώ οι νέες συντεταγμένες των άκρων των φύλλων HATT παρέχονται στο έντυπο «Πίνακας Συντελεστών Μετατροπής Συντεταγμένων Ελληνικού Χώρου» από το σύστημα HATT (παλαιό Datum) στο σύστημα ΕΓΣΑ 87 (νέο Datum) (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3. 3. Μετατροπή συντεταγμένων περιοχής μελέτης από HATT σε ΕΓΣΑ 87.

ΦΥΛΛΟ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΑΚΡΑ	X	Ψ
65	ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ	1	477,117,405	3,924,411,643
65	ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ	2	499,801,084	3,924,382,969
65	ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ	3	499,801,143	3,896,656,643
65	ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ	4	477,047,485	3,896,685,225
ΦΥΛΛΟ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΑΚΡΑ	X	Ψ
75	ΒΡΥΣΑΙ	1	499,799,958	3,915,140,895
75	ΒΡΥΣΑΙ	2	522,507,010	3,915,169,556
75	ΒΡΥΣΑΙ	3	522,576,817	3,887,443,527
75	ΒΡΥΣΑΙ	4	499,799,930	3,887,414,951
ΦΥΛΛΟ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΑΚΡΑ	X	Ψ
380	XANIA	1	499,799,983	3,942,868,001
380	XANIA	2	522,436,767	3,942,896,749
380	XANIA	3	522,507,010	3,915,169,556
380	XANIA	4	499,799,958	3,915,140,895

3.4.3. Μεθοδολογία χωρικής εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου

Για την εκτίμηση των πλημμυρικά επικινδυνών περιοχών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον GIS Arc Map ο χωρικός χάρτης διαβάθμισης της πλημμυρικής επικινδυνότητας. Ο τελικός αυτός χωρικός χάρτης προέκυψε από το συνδυασμό των 6 επιμέρους θεματικών χαρτών - μεταβλητών (παραγόντων), που σχετίζονται άμεσα με τα πλημμυρικά φαινόμενα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες (Green et al., 2000): α) Υψόμετρο (Elevation), β) Κλίση (Slope), γ) Χρήσεις γης (Land use), δ) Συγκέντρωση ροής (Flow accumulation), ε) Γεωλογία (Geology), ζ) Ένταση Βροχόπτωσης (Rainfall Intensity). Όλοι αυτοί οι παράγοντες γεωαναφέρθηκαν στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα ΕΓΣΑ'87. Οι δημιουργούμενοι χάρτες τύπου raster – κάρναβου είχαν διαστάσεις κελιού 20×20 m, με αντίστοιχο εμβαδό μονάδας κελιού – κάρναβου 400 m². Οι λόγοι επιλογής των άνωθεν μεταβλητών – παραγόντων, περιγράφονται παρακάτω.

Η συγκέντρωση ροής είναι ένας έμμεσος τρόπος υπολογισμού της όγκου ροής που συσσωρεύεται στη λεκάνη απορροής (σε μονάδες raster) και αυξάνεται σταδιακά από τα ανάντη όρια της λεκάνης απορροής – υπολεκάνες προς το υδρογραφικό δίκτυο και την εκβολή του ποτάμιου συστήματος της περιοχής μελέτης (Schäuble et al., 2008). Επίσης οι τοπογραφικοί παράμετροι της κλίσης και του υψομέτρου είναι παράμετροι που επηρεάζουν αντιστρόφως ανάλογα την εμφάνιση των πλημμυρικών φαινομένων (Kwak and Kondoh, 2008). Σε μικρές λεκάνες απορροής, η ένταση της βροχόπτωσης και οι συνθήκες της εδαφικής

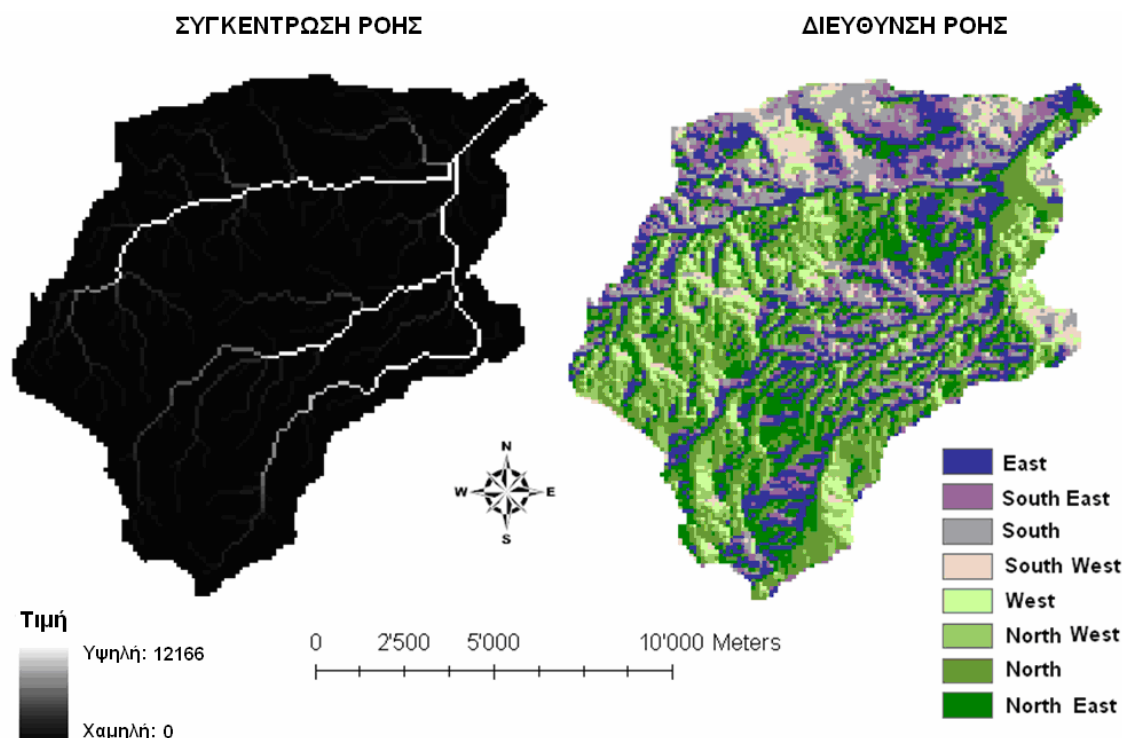
υγρασίας, είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι για τη δημιουργία στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων (Camarasa Belmonte and Segura Beltran, 2001). Επιπρόσθετα, η εδαφική υγρασία συνδέεται άμεσα με τις χρήσεις γης, καθώς η φυτική κάλυψη – βλάστηση ρυθμίζει την ποσότητα βροχόπτωσης και το χρόνο που χρειάζεται αυτή για να φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους. Η γεωλογία επίσης διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στη γένεση της απορροής, για παράδειγμα οι καρστικοί γεωλογικοί σχηματισμοί ελαττώνουν σημαντικά την επιφανειακή ροή.

Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν α) τοπογραφικούς χάρτες (ΓΥΣ, κλίμακας 1:50000 και 1:5000), β) μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης από 7 σταθμούς που βρίσκονται κατανεμημένοι είτε εντός είτε στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη για τα έτη 1975-2007, γ) χάρτες χρήσεων γης (δημιουργήθηκαν βάση της συνδυασμένης χρήσης του προγράμματος Corine 2000 και αεροφωτογραφιών μέσω της τεχνικής Remote Sensing), (Su Z., 2000), δ) Γεωλογικοί χάρτες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Όπως αναφέρθηκε για την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GIS και το σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87. Έτσι, αρχικά δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους [Digital Elevation Model (DEM) - (χωρικής ανάλυσης 20x20 m)] της περιοχής μελέτης και ακολούθως προέκυψε με τη συμβολή του λογισμικού 3-D Analyst ο χάρτης κλίσεων εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Το τρισδιάστατο αρχείο DEM χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης - διεύθυνσης ροής σε κάθε κελί του καννάβου (raster cell). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε από τον καθορισμό της συγκέντρωσης νερού σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης (Κουργιαλάς Ν., & Καρατζάς Γ., 2009).

Ο χάρτης συγκέντρωσης ροής (σημεία σημαντικής συγκέντρωσης του επιφανειακού νερού), καθορίζει τον αριθμό των κελιών τα οποία συνεισφέρουν υδρολογικά σε κάθε ένα κελί τύπου raster της περιοχής μελέτης (Schäuble et al., 2008). Ο εν λόγω ο χάρτης συγκέντρωσης ροής δημιουργήθηκε με βάση το χάρτη διεύθυνσης ροής σε συνδυασμό με τον κατάλληλο αλγόριθμο (Flow accumulation - ArcHydro). Στο δημιουργούμενο χάρτη συγκέντρωσης ροής, τα κελιά με υψηλή τιμή συγκέντρωσης ροής (pixels), είναι περιοχές σημαντικής συγκέντρωσης του επιφανειακού νερού. Ο χάρτης αυτός είναι ιδιαίτερα

σημαντικός αφού δείχνει το φορτίο νερού που δέχεται κάθε σημείο της περιοχής μελέτης, Εικόνα 3.8.



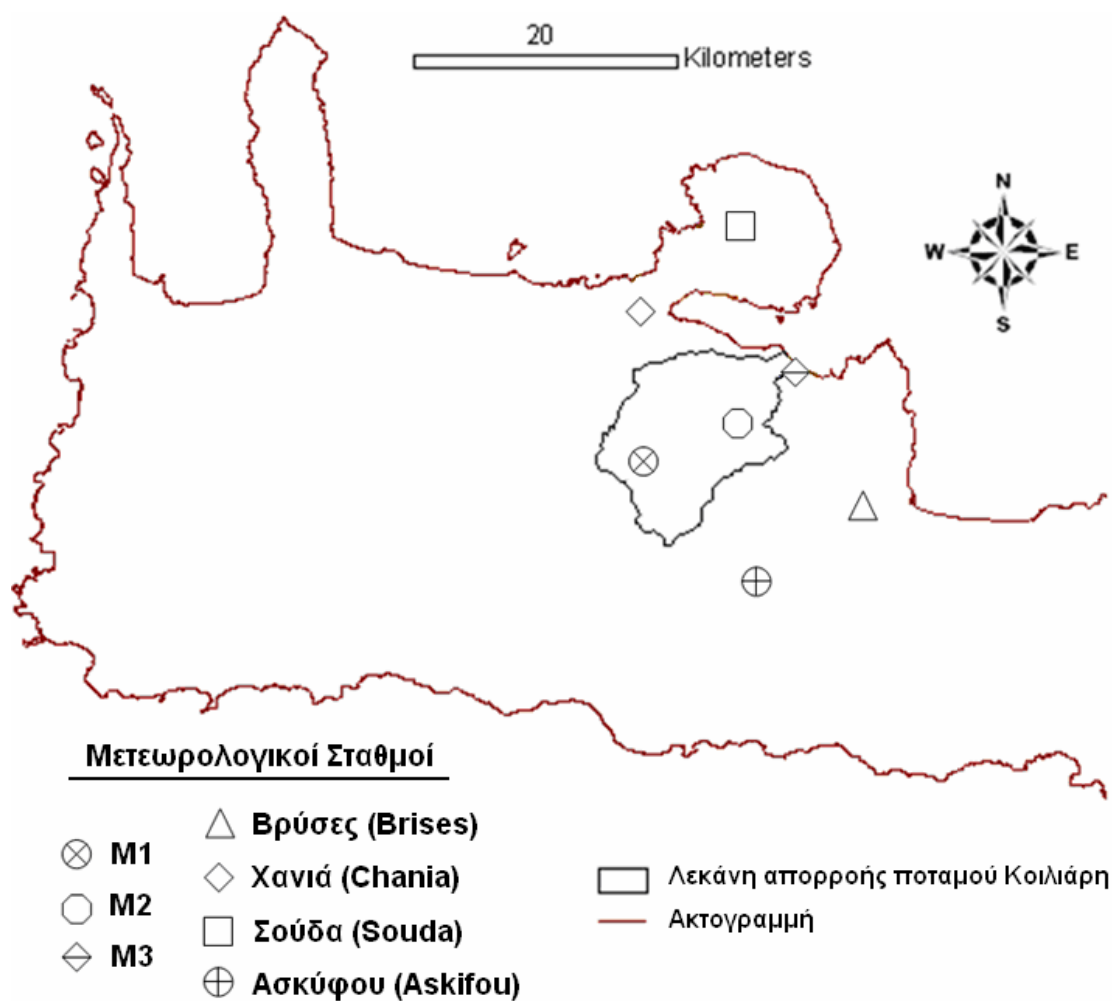
Εικόνα 3. 8. Χωρική απεικόνιση της συγκέντρωσης και της διεύθυνσης ροής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, χρήση του αλγορίθμου ArcHydro σε περιβάλλον GIS.

Προκειμένου να προσδιορίσουμε τη χωρική επίδραση της έντασης της βροχόπτωσης στη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων, χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από επτά σταθμούς εντός και εκτός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, για την περίοδο 1975-2009 (Εικόνα 3.9.).

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να αναφερθούμε στη βροχοβαθμίδα και αλλά στη θερμοβαθμίδα της περιοχής μελέτης, η οποία και προέκυψε με βάση τα δεδομένα των επτά μετεωρολογικών σταθμών.

Αναλυτικότερα, προκειμένου να προσδιορίσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία τη βροχοβαθμίδα - θερμοβαθμίδα που αφορά τη λεκάνη απορροής, επιλέχτηκαν οι πιο κοντινοί στην περιοχή ενδιαφέροντος και σε ενεργεία μετεωρολογικοί σταθμοί. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί έχουν ικανοποιητική υψομετρική και χωροταξική κατανομή μεταξύ τους, επιπλέον μας δίνουν αξιόπιστες και συνεχείς μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, οι πλησιέστεροι υπάρχοντες

μετεωρολογικοί σταθμοί εντός και εκτός της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη, που ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, είναι οι μετεωρολογικοί σταθμοί M1, M2, M3, Σούδας, Χανίων, Βρυσών και Ασκύφου, (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3. 9. Χωρική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών εντός και εκτός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των παραπάνω σταθμών, όπως το υψόμετρο, οι συντεταγμένες, το χρονικό διάστημα λειτουργίας και συλλογής δεδομένων καθώς και οι τιμές των μετρήσεων αυτών (βροχόπτωση) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Με βάση την ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων από τους παραπάνω σταθμούς, προκύπτει μια εκτίμηση της θερμοκρασιακής μεταβολής αλλά και της μεταβολής της βροχόπτωσης σε σχέση με το υψόμετρο, για το βόριο - ανατολικό τμήμα του νομού Χανίων, στο οποίο ανήκει και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 3. 4. Βροχομετρικά δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Κουιλιάρη, [Στοιχεία Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ) & Εργ. Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής Π.Κ.]

<i>ΒΡΥΣΕΣ</i>	<i>Υψόμετρο = 240 m</i>	<i>1975-1996</i>	<i>35° 25',, 24° 14'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH (mm)	143.46	141.03	99.81	39.69	11.61	7.47	0.36	3.78	31.68	90.99	118.71	142.11	830.7
<i>ΑΣΚΥΦΟΥ*</i>	<i>Υψόμετρο = 800 m</i>	<i>1960-2006</i>	<i>35° 18',, 24° 11'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	249.876	186.488	141.520	45.534	23.254	8.129	3.052	11.423	25.789	92.334	152.68	242.00	1182.08
<i>ΣΟΥΔΑ</i>	<i>Υψόμετρο = 150 m</i>	<i>1958-2006</i>	<i>35° 33', 24° 07'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	137.2	107.7	83.1	32.5	13.4	4.3	1.1	1.1	16.1	72.6	73.1	100.3	642.5
<i>ΧΑΝΙΑ</i>	<i>Υψόμετρο = 62 m</i>	<i>1961-2006</i>	<i>35° 30',, 24° 02'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	122.9	108.6	71.9	31.9	13.9	6.6	0.5	2.7	18.2	82.1	70.9	91.3	621.5
<i>Μ3</i>	<i>Υψόμετρο = 24 m</i>	<i>1975-2006</i>	<i>35° 27', 24° 10'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	124.254	100.494	83.547	29.439	9.603	4.437	0.477	1.224	14.193	53.757	98.613	124.983	645.021
<i>Μ2 (ΣΑΜΩΝΑΣ)</i>	<i>Υψόμετρο = 385 m</i>	<i>2007-2009</i>	<i>35° 25' 23'' 24° 06'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	104.2	164.7	47.080952	43.2	33	0	0	0	39.333	82.066	38.666	154.713	706.96
<i>Μ1 (ΨΥΧΡΟ ΠΗΓΑΔΙ)</i>	<i>Υψόμετρο = 1000 m</i>	<i>2007-2009</i>	<i>35° 23' 62'', 24° 02'</i>										
ΜΗΝΑΣ	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	SUM
BPOXH(mm)	251.3	304.7	63	70.9	15.4	0	0	2.2	39.733	146.533	115.064	282.333	1291.165

*Η βροχοπτώση στο μετεωρολογικό σταθμό Ασκήφου, λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας της περιοχής εγκατάστασης του (ασυνήθιστα υψηλές τιμές βροχής σε σχέση με το υψόμετρο), υπολογίστηκε με βάση διορθωτικό συντελεστή.

Θερμοβαθμίδα

Μετά από ανάλυση των θερμοκρασιακών δεδομένων, από τους παραπάνω μετεωρολογικούς σταθμούς για τα έτη (1975-2009), προκύπτει η μηνιαία θερμοκρασιακή μεταβολή ανά 100 m υψομέτρου, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3. 5. Μέσος όρος μηνιαίας θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με το υψόμετρο για την περιοχή της λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη.

Μηνιαία Θερμοκρασιακή Μεταβολή (°C) \ 100 m Υψομέτρου για τη Λεκάνη Απορροής του Κοιλιάρη											
ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡΤ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕ.	ΔΕΚ.
0,817	0,75	0,738	0,559	0,248	0,275	0,173	0,719	0,616	0.682	0.935	0.7

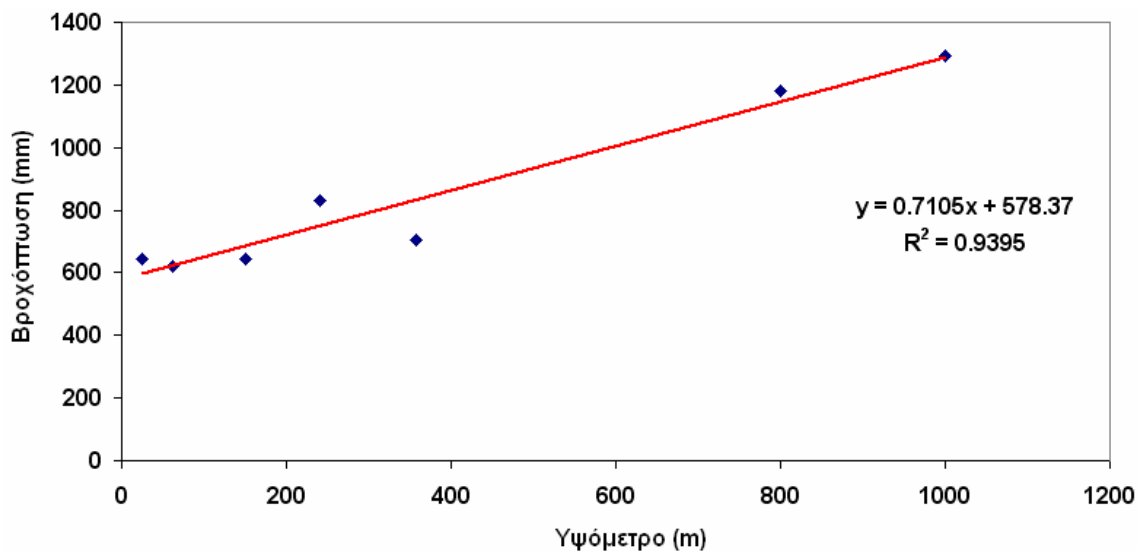
Ο μέσος όρος της ετήσιας θερμοκρασιακής μεταβολής ανά 100 m υψομέτρου, στην περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα καθορίζεται στην τιμή 0.60129 °C.

Βροχοβαθμίδα

Ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης μιας περιοχής είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους. Άλλοι παράγοντες μικρότερης όμως σημασίας θεωρούνται η έκθεση του σταθμού στις αέριες μάζες, ο προσανατολισμός και η υψομετρική διαφορά μεταξύ σταθμού και υψηλότερου σημείου από το σταθμό σε ακτίνα 5 μιλίων.

Η μαθηματική σχέση που συνδέει το ύψος βροχόπτωσης με το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους είναι μία εξίσωση πρώτου βαθμού, της μορφής $y = ax + b$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το απόλυτο υψόμετρο των σταθμών και εξαρτημένη μεταβλητή το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης. Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση της βροχοβαθμίδας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του βροχομετρικού χάρτη μιας περιοχής. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της σχέσης αυτής γίνεται με τον υπολογισμό του συντελεστή προσαρμογής R^2 των δύο μεγεθών, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η σχέση αυτή θεωρείται ικανοποιητική εφόσον ο συντελεστής προσαρμογής (R^2) είναι μεγαλύτερος ή ίσος από 0.8 (Coulibaly and Baldwin, 2005).

Όσον αφορά τη βροχοβαθμίδα της περιοχής ενδιαφέροντος, με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα των παραπάνω σταθμών, προκύπτει η εξίσωση βροχοβαθμίδας για το βόριο-ανατολικό τμήμα του νομού Χανίων, στο οποίο ανήκει και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3. 10. Εξίσωση μεταβολής της βροχόπτωσης σε σχέση με τη μεταβολή του υψόμετρου, για το βόριο-ανατολικό τμήμα του νομού Χανίων.

Το επόμενο στάδιο, με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα των επτά μετεωρολογικών σταθμών, ήταν η δημιουργία του χάρτη έντασης βροχόπτωσης (rainfall intensity). Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του δείκτη MFI (Modified Fournier Index), σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Morgan (2005):

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p^2}{P}, \quad (3.2)$$

Όπου:

MFI = Modified Fournier Index,

$\sum_{i=1}^{12}$ = Το άθροισμα των 12 μηνών του έτους,

p = μέση μηνιαία βροχόπτωση, και

P = η μέση ετήσια βροχόπτωση.

Ο δείκτης MFI εκφράζει το άθροισμα της ισχύος της μέσης μηνιαίας βροχής κάθε σταθμού και χρησιμοποιείται συχνά για τη μελέτη έντονων φυσικών καταστροφών όπως πλημμυρών και διάβρωσης εδαφών. Στη συγκεκριμένη

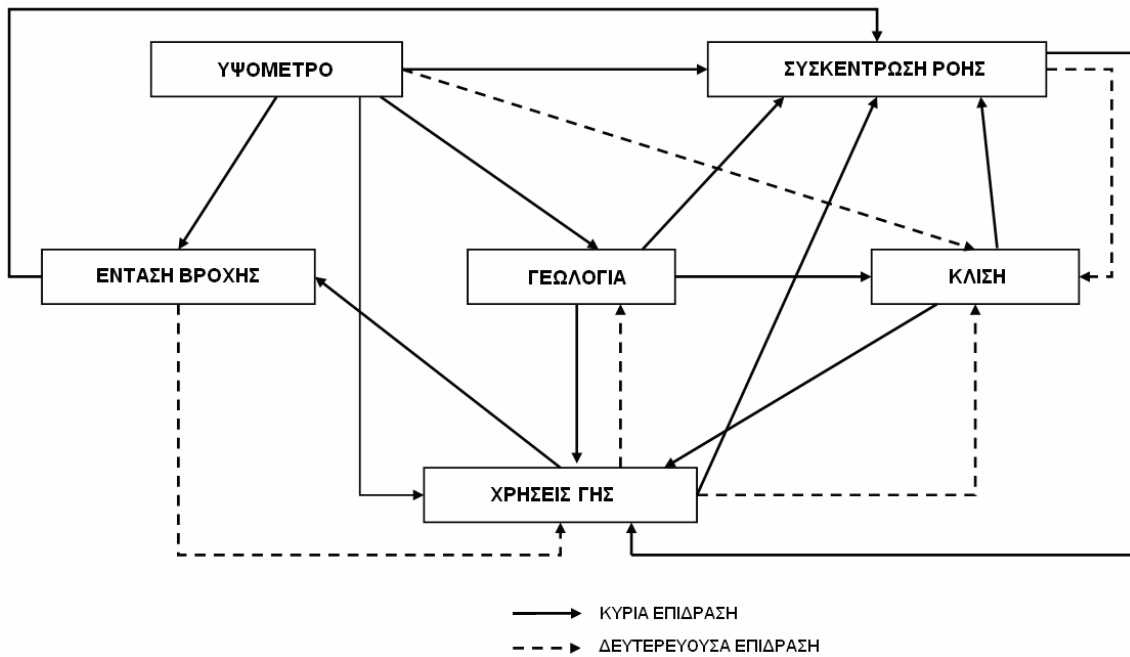
μελέτη ο χωρικός χάρτης έντασης βροχόπτωσης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο παρεμβολής (interpolation) spline των σημειακών τιμών του δείκτη MFI για κάθε ένα από τους επτά μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρεμβολής, ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου τα σημειακά δεδομένα είναι σχετικά λίγα σε αριθμό (Burrough P., 1986).

3.4.4. Αποτελέσματα μεθοδολογίας εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου

Για κάθε παράγοντα που επιδρά στη χωρική επικινδυνότητα των πλημμυρικών φαινομένων ορίζουμε πέντε επίπεδα επικινδυνότητας: Πολύ Υψηλή, Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή και Πολύ Χαμηλή. Τα διαφορετικά επίπεδα των παραγόντων εκφράζονται είτε α) σε αριθμητικές τιμές: Υψόμετρο (Elevation), Κλίση (Slope), Συγκέντρωση ροής (Flow accumulation), Ένταση Βροχόπτωσης (Rainfall Intensity), είτε β) περιγραφικά: Χρήσεις γης (Land use), Γεωλογία (Geology), (Πίνακας 3.6). Η διακύμανση των αριθμητικών τιμών βασίστηκαν στη Natural Breaks (Jenks) μέθοδο κατάταξης - classification method (Smith, 1986).

Προκειμένου να καθορισθεί ο συντελεστής βαρύτητας (A) κάθε επιπέδου στο συγκεκριμένο παράγοντα, προτάθηκε μια κλίμακα τιμών διακύμανσης (points) από το 1-10, για το κάθε επίπεδο, αρχίζοντας με 10 points για την Πολύ Υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα (Πολύ Υψηλή) = 10 pts, μέχρι την Πολύ Χαμηλή πλημμυρική επικινδυνότητα, που καταλαμβάνει και το χαμηλότερο επίπεδο, (Πολύ Χαμηλή) = 1 pts (Shaban et al., 2001).

Εύκολα γίνεται κατανοητό ότι ο κάθε παράγοντας έχει διαφορετική επίδραση στην εκτίμηση της τελικής πλημμυρικής επικινδυνότητας. Ο καθορισμός της επίδρασης του κάθε παράγοντα χωριστά στην πλημμυρική επικινδυνότητα δεν δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα της ολικής επίδρασης. Έτσι, η ολοκληρωμένη συσχέτιση όλων των παραγόντων μαζί είναι απαραίτητη προκειμένου να δημιουργηθεί ο τελικός χωρικός χάρτης πλημμυρικού κινδύνου. Καθώς οι διάφοροι παράγοντες δεν έχουν το ίδιο βαθμό επίδρασης, μια σταθμισμένη προσέγγιση θα πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να ενσωματωθούν αυτές οι αλληλεπιδράσεις. Για την εκτίμηση των τελικών βαρών των εμπλεκόμενων παραγόντων, μελετήθηκε η επίδραση του κάθε παράγοντα στους υπόλοιπους (αλληλεπίδραση) και η σχηματική αυτή επίδραση φαίνεται στην Εικόνα 3.11.



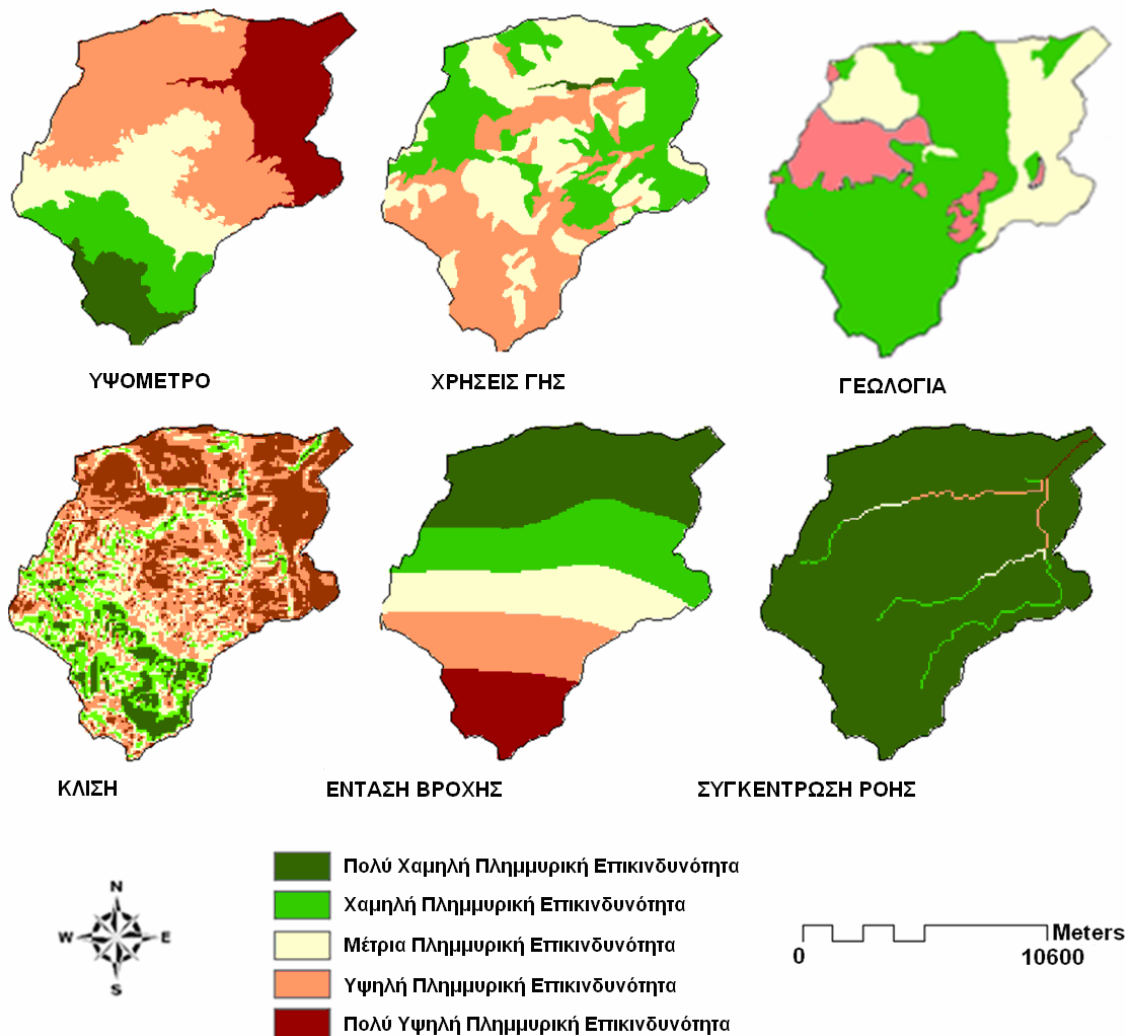
Εικόνα 3. 11. Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων που επηρεάζουν την πλημμυρική επικινδυνότητα.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχηματική απεικόνιση και συγκρίνοντας την επίδραση του κάθε παράγοντα σε σχέση με τους υπόλοιπους, θεωρήσαμε δυο ειδών επιδράσεις α) την κύρια επίδραση, κατά την οποία η μεταβολή ενός παράγοντα έχει άμεση επίδραση σε ένα άλλον παράγοντα και β) τη δευτερεύουσα επίδραση, κατά την οποία η μεταβολή ενός παράγοντα έχει έμμεση (δευτερεύουσα) επίδραση σε έναν άλλον παράγοντα. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν αυτές οι δυο μορφές επιδράσεων μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, ορίσαμε ότι ο παράγοντας εκείνος που επιδρά άμεσα σε έναν άλλο αποσπά (1) point, ενώ η δευτερεύουσα επίδραση ενός παράγοντα σε έναν άλλο αποσπά (1/2) point. Σύμφωνα με την Εικόνα 3.11, ο κάθε παράγοντας που αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους αποσπά ένα συγκεκριμένο αριθμό points, έτσι προκύπτει ο ρυθμός επίδρασης (B) του κάθε παράγοντα, Πίνακας 3.6. (Shaban et al., 2006).

Προκειμένου να έχουμε μια ικανοποιητικότερη αποτίμηση της επίδρασης του κάθε παράγοντα στην πλημμυρική επικινδυνότητα, προσδιορίζουμε τον παράγοντα ($A*B$), ο οποίος προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή βαρύτητας (A) του κάθε επιπέδου με το ρυθμό επίδρασης (B) του κάθε παράγοντα (Shaban et al., 2006), (Πίνακας 3.6). Έτσι προκύπτει το συνολικό βάρος (total weight) για κάθε παράγοντα και το άθροισμα αυτών παρέχει το ολικό συνολικό βάρος (grand

total weight) όλων των παραγόντων που στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ίσο με: $39+52+78+39+46.5+117= 371.5$. Το τελικό ποσοστό με το οποίο ο κάθε παράγοντας επιδρά στην πλημμυρική επικινδυνότητα προκύπτει από τη διαίρεση του συνολικού βάρους (total weight) του κάθε παράγοντα με το ολικό συνολικό βάρος (grand total weight).

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 3.4.3, δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα (χάρτες) της επίδρασης του κάθε παράγοντα στην πλημμυρική επικινδυνότητα (Εικόνα 3.12). Οι χάρτες αυτοί βάση των αντίστοιχων ποσοστών επίδρασης του κάθε παράγοντα (Πίνακας 3.6), συνδυάστηκαν με τη μέθοδο της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων σε περιβάλλον GIS, (Gemitzis et al., 2006) με στόχο τη δημιουργία του τελικού χάρτη επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.



Εικόνα 3. 12. Χωρική πλημμυρική επικινδυνότητα για κάθε ένα παράγοντα – θεματικό χάρτη.

Με βάση την τεχνική της σταθμισμένης επικάλυψης, κάθε χάρτης (παράγοντας) πολλαπλασιάζεται με το ποσοστό συνεισφοράς του, και μετέπειτα όλοι οι χάρτες αθροίζονται αποδίδοντας το τελικό χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας S , για την περιοχή ενδιαφέροντος (Gemitzi et al., 2006):

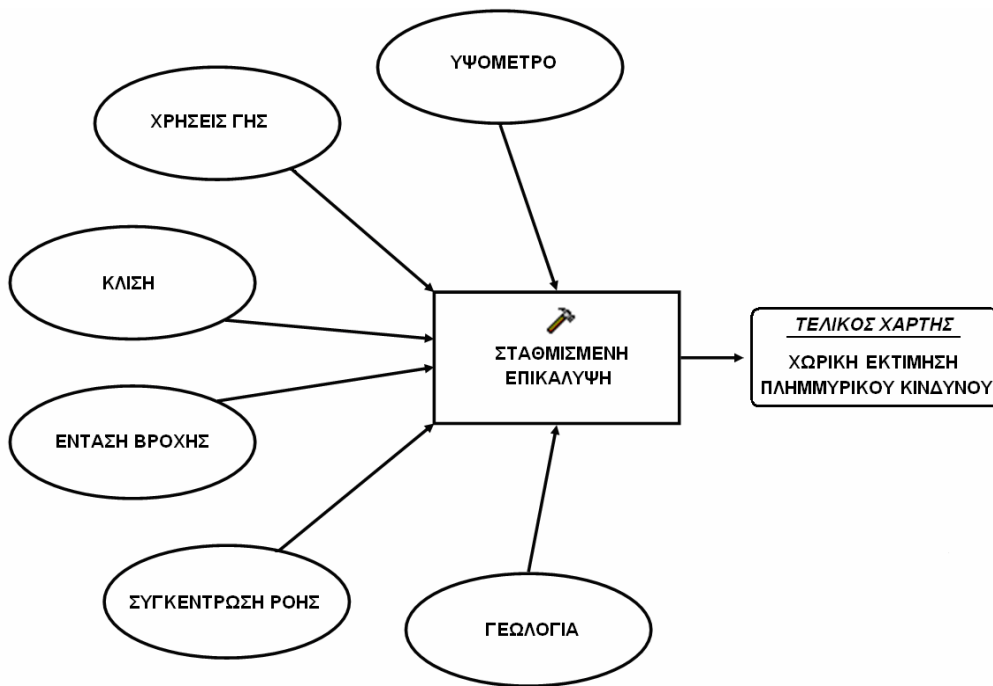
$$S = \sum w_i x_i, \quad (3.3)$$

Όπου:

w_i = συνολικό βάρος - ποσοστό συνεισφοράς του κάθε παράγοντα i και

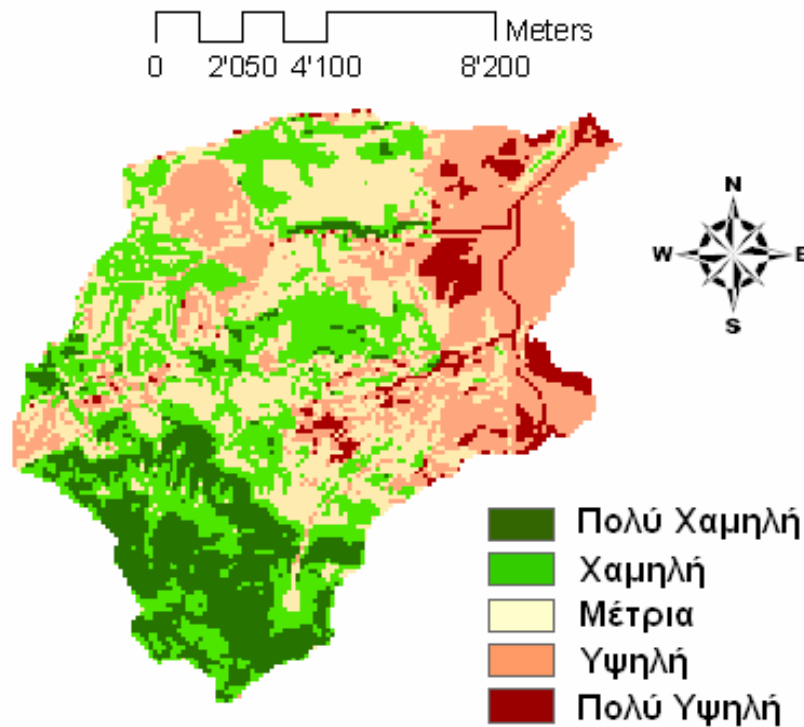
x_i = χάρτης - παράγοντας (factor map) i .

Οι παράγοντες (θεματικά επίπεδα) συνδυάστηκαν σύμφωνα με την Εξίσωση 3.3, στο περιβάλλον Model Builder του GIS. Η εφαρμογή ModelBuilder είναι ένα από τα εργαλεία γεωεπεξεργασίας στη νέα έκδοση του Arc View GIS 9.2. Πρόκειται για μια εφαρμογή που διευκολύνει την υλοποίηση ενός διαγράμματος εργασίας, θεματικών επιπέδων (work flow). Δημιουργείται έτσι ένα μοντέλο που περιλαμβάνει επεξεργασίες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους και εκτελούνται ταυτόχρονα (Εικόνα 3.13). Αναλυτικότερα, τα θεματικά επίπεδα (χάρτες) της επίδρασης του κάθε παράγοντα στον τελικό χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας, (Πίνακας 3.6), δημιουργήθηκαν με βάση την Εξίσωση 3.3, και συνδυάστηκαν με τη μέθοδο της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων (GIS Model Builder).



Εικόνα 3. 13. Σχηματική απεικόνιση (διάγραμμα εργασίας) της μεθόδου της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων, (Model Builder GIS).

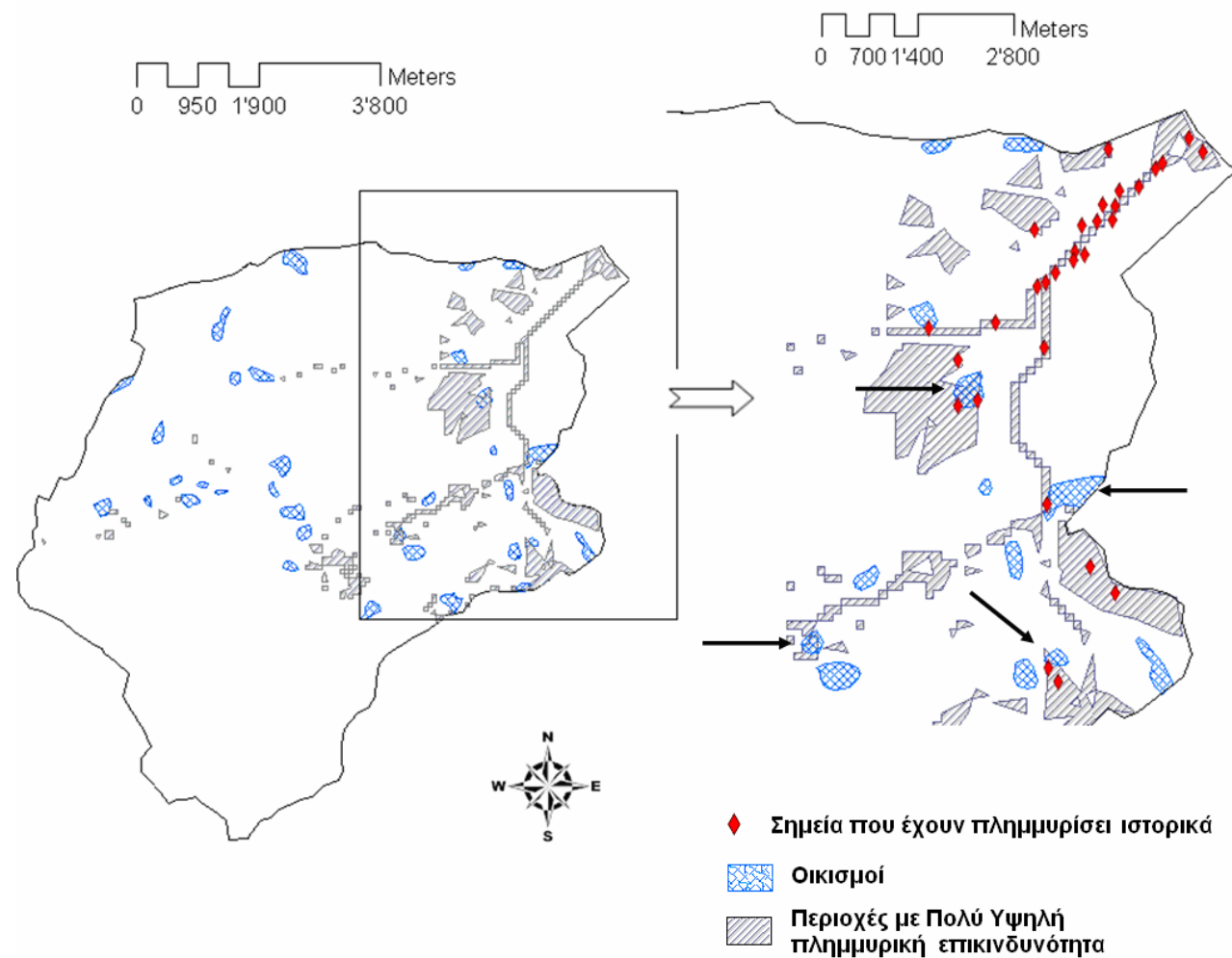
Δημιουργήθηκε έτσι ο τελικός χωρικός χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για την περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Εικόνα 3.14).



Εικόνα 3. 14. Τελικός χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας στη λεκάνη απορροής το ποταμού Κοιλιάρη.

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία χωρικής εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου σε περιβάλλον GIS (modeling methodology) προσδιορίζεται η περιοχή της λεκάνης απορροής που χαρακτηρίζεται από Πολύ Υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο, (Εικόνα 3.15). Επίσης στην ίδια εικόνα απεικονίζονται τα σημεία στην περιοχή ενδιαφέροντος που έχουν πλημμυρίσει ιστορικά, για την περίοδο 1960-2009. Σχεδόν όλα τα καταγεγραμμένα ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα έχουν λάβει χώρα στην περιοχή εκείνη η οποία έχει καθοριστεί με Πολύ Υψηλό δείκτη πλημμυρική επικινδυνότητας, με μόνον λίγα ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα να έχουν λάβει χώρα στην περιοχή με Υψηλό δείκτη πλημμυρική επικινδυνότητας. Το παραπάνω γεγονός επαληθεύει την αξιοπιστία της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας.

Τα μαύρα βέλη στην Εικόνα 3.15, καθορίζουν τους οικισμούς που βρίσκονται σε περιοχές με Πολύ Υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο. Στις περιοχές αυτές οι τοπικές αρχές, εκτός από τα τεχνικά μέτρα, οφείλουν να δημοσιοποιήσουν τις πληροφορίες – χάρτες σχετικά με τις επικίνδυνες πλημμυρικά περιοχές και να λάβουν όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Ειδικότερα, οι ΟΤΑ οφείλουν να οργανώσουν εκστρατείες ενημέρωσης - campaigns (πόστερς, χάρτες, φυλλάδια, κ.τ.λ.) και συσκέψεις σε σχολεία, δημαρχεία ή σε άλλους δημόσιους χώρους, προκειμένου να ενημερωθούν οι κάτοικοι για τις περιοχές εκείνες που διατρέχουν άμεσο πλημμυρικό κίνδυνο σε μια ενδεχόμενη μεγάλη σε διάρκεια και ένταση βροχόπτωση.



Εικόνα 3. 15. Απεικόνιση των περιοχών με Πολύ Υψηλό δείκτη πλημμυρικής επικινδυνότητας, ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 3. 6. Βαθμονόμηση παραγόντων που συμβάλλουν στην πλημμυρική επικινδυνότητα.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ (Πλημμυρικής Επικινδυνότητας)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (A)	ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (B)	(A*B)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (%)
ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΡΟΗΣ (pixels)	5868-12166	Πολύ Υψηλή	10		15	39.00	10.50
	3244-5868	Υψηλή	8		12		
	1908-3244	Μέτρια	5	1.5	7.5		
	620-1908	Χαμηλή	2		3		
	0-620	Πολύ Χαμηλή	1		1.5		
ΚΛΙΣΗ (degree)	0 - 11.4	Πολύ Υψηλή	10		20	52.00	14.00
	11.4 - 23.2	Υψηλή	8		16		
	23.2 - 36.3	Μέτρια	5	2	10		
	36.3 - 51.9	Χαμηλή	2		4		
	51.9 - 88.3	Πολύ Χαμηλή	1		2		
ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	Παραλιακή Ζώνη	Πολύ Υψηλή	10		30	78.00	21.00
	Θαμν. - Άγονες Εκτάσεις.	Υψηλή	8		24		
	Βοσκότοποι - Αραιή Φυτοκάλυψη	Μέτρια	5	3	15		
	Γεωργικές Εκτάσεις	Χαμηλή	2		6		
	Δασώδεις Εκτάσεις	Πολύ Χαμηλή	1		3		
ΕΝΤΑΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ (Units MFI)	282-344	Πολύ Υψηλή	10		15	39.00	10.50
	237-282	Υψηλή	8		12		
	197-237	Μέτρια	5	1.5	7.5		
	159-197	Χαμηλή	2		3		
	103-159	Πολύ Χαμηλή	1		1.5		
ΓΕΩΛΟΓΙΑ	Φλύσχις	Πολύ Υψηλή - Υψηλή	9		27	46.50	12.52
	Νεογενή – Τεταρτογενή Ιζήματα	Μέτρια	5	3	15		
	Καρστική Περιοχή	Χαμηλή - Πολύ Χαμηλή	1.5		4.5		
ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	0 - 241	Πολύ Υψηλή	10		45	117.00	31.49
	241 - 523	Υψηλή	8		36		
	523 - 922	Μέτρια	5	4.5	22.5		
	922 - 1471	Χαμηλή	2		9		
	1471 - 2120	Πολύ Χαμηλή	1		4.5		
						371.5	100

3.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η ολοκληρωμένη και βιώσιμη στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων. Αναλυτικότερα, αναλύθηκε μια μέθοδος εκτίμησης των ωφελειών από ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου, καθώς επίσης και η σπουδαιότητα της πρότερης γνώση, μέσω της κατάλληλης μεθοδολογίας, των περιοχών εκείνων που κινδυνεύουν άμεσα από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό γεγονός. Ο προσδιορισμός των πλημμυρικά επικίνδυνων περιοχών, είναι μια θεμελιώδης συνιστώσα της στρατηγικής διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων.

Ο στρατηγικός σχεδιασμός στα θέματα των φυσικών καταστροφών οφείλει να καταλήγει σε ένα πολυεπίπεδο σχέδιο προγραμματισμού και δράσεων με χωρικές και χρονικές διαστάσεις. Η κατανομή του φυσικού κινδύνου στην περιοχή είναι μόνο το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση αυτή. Η διαβάθμιση του πλημμυρικού κινδύνου καταλήγει σε μια ιεράρχηση σπουδαιότητας των επικίνδυνων περιοχών, η οποία όμως δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ιεράρχηση των δράσεων. Η τελική ιεράρχηση του σχεδιασμού οφείλει να λάβει υπόψη αφενός τη χωρική κατανομή της επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων στην περιοχή μελέτης, αλλά και τις προτεραιότητες που προκύπτουν από το αναπτυξιακό σχεδιασμό της περιοχής, ή τις σχετικές τάσεις (π.χ. επεκτάσεις σχεδίων πόλεων, βιομηχανικών ζωνών, νέες καλλιέργειες κ.λπ.).

Για την ιεράρχηση των περιοχών πρώτης προτεραιότητας όσον αφορά στο σχεδιασμό της πρόληψης και της αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων, δεν σημαίνει ότι πρέπει όλων των ειδών οι δράσεις να ξεκινήσουν ταυτόχρονα, ή ότι είναι δυνατό να υλοποιηθούν αμέσως. Για κάθε επικίνδυνη περιοχή πρέπει να γίνει διαχείριση τόσο των ανάντη λεκανών, όσο και του πλημμυρικού πεδίου και μάλιστα με διαφορετική προσέγγιση. Είναι λοιπόν προφανές ότι πρέπει να ακολουθηθεί μια σειρά δράσεων ωρίμανσης που θα οδηγεί στη σταδιακή εφαρμογή των τεχνικών και θεσμικών μέτρων και τελικά στην πλήρη ανάπτυξη του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού σε βάθος χρόνου.

Τονίζεται ιδιαίτερα ότι τα τεχνικά μέτρα που γίνονται χωρίς να προηγηθεί η κατάλληλη ερευνητική – μελετητική προεργασία (πάντα από τις υψηλές προς τις χαμηλές περιοχές) έχουν συνήθως καταστροφικές συνέπειες ή, στην καλύτερη περίπτωση, αποτελούν σπατάλη χρόνου και πόρων. Αντιστοίχως, θεσμικά μέτρα που εξαγγέλλονται χωρίς να αποσαφηνίζονται πλήρως στο κοινό

με πειστικό και εύληπτο τρόπο η τεκμηρίωση, η φιλοσοφία, τα αναμενόμενα αποτελέσματα, οι στόχοι και οι περιοχές εφαρμογής τους, δεν γίνονται κοινωνικά αποδεκτά και επιφέρουν μεγάλες αντιδράσεις, ή θεσμοθετούνται μεν αλλά δεν ενεργοποιούνται.

Μια από τις πιο θεμελιώδεις προσεγγίσεις στη διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων είναι η εκτίμηση της χωρικής επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων με τη χρήση GIS. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη όπου καθόρισθηκαν οι περιοχές και οι αντίστοιχοι οικισμοί που δύναται να υποστούν καταστροφές από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό φαινόμενο, με άλλα λόγια καθορίστηκαν οι περιοχές εκείνες, που είναι πιο επιρρεπείς στην εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων. Τα αποτελέσματα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας επαληθεύτηκαν με ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα, στη λεκάνη απορροής.

Δεδομένου ότι στην περιοχή μελέτης πλημμυρικά φαινόμενα εμφανίζονται συχνά, η παρούσα μεθοδολογία θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο πρόβλεψης των περιοχών εκείνων που εμφανίζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στην καλύτερη οργάνωση ενός διαχειριστικού σχεδίου αντιπλημμυρικής προστασίας, σύμφωνα και με την Οδηγία 2007/60/EC.

Επιπλέον, ο συνδυασμός της παραπάνω μεθοδολογίας με ένα αποτελεσματικό σύστημα πρόβλεψης και προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου (Forecasting-Warning System) με βάση τη μέθοδο Day's, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή των πλημμυρικών καταστροφών και την εξασφάλιση του δημόσιου αισθήματος ασφάλειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ
ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

4.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Γενικά με τον όρο «Μοντέλο» θεωρούμε μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος, η οποία προσεγγιστικά προσομοιώνει τη συμπεριφορά του τελευταίου σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή τάσεις. Τα συμβολικά ή μαθηματικά μοντέλα είναι αυτά που οι ιδιότητες της πραγματικότητας μετασχηματίζονται σε αριθμούς, εξισώσεις και σχέσεις. Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από μια συναρτησιακή σχέση της μορφής: Εξαρτημένη μεταβλητή = f (ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου)

Η εξαρτημένη μεταβλητή, περιγράφει την κατάσταση του συστήματος. Σαν ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται ο χρόνος και ο χώρος, σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Οι παράμετροι περιγράφουν τις ιδιότητες και την κατάσταση του συστήματος και οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν τις εξωτερικές επιδράσεις και τις τάσεις. Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να χαρακτηριστούν με διάφορους τρόπους (Μιμίκου, 1994; Τσακίρης, 1995; Ζορρου, 1999):

1. Συνεχή ή ενός συμβάντος μοντέλα: Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι τα μοντέλα ενός γεγονότος αναπαριστούν μια καταιγίδα, ενώ τα συνεχή μοντέλα προσημειώνουν γεγονότα μεγαλύτερων χρονικών περιόδων, προβλέποντας την απόκριση της λεκάνης και ανάμεσα στα διάφορα επεισόδια βροχής. Τα συνεχή μοντέλα απαιτούν τη γνώση των αλλαγών των υδρολογικών συνθηκών του τοπίου που επηρεάζει τη σχέση βροχής-επιφανειακής απορροής ανάμεσα στα μεσοδιαστήματα μεταξύ των γεγονότων βροχής.
2. Ενιαία ή κατανεμημένα. Τα κατανεμημένα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τις χωρικές συσχετίσεις ανάμεσα στις μεταβλητές και στις παραμέτρους του μοντέλου, ενώ τα ενιαία αποτελούν μέσους όρους χωρικών παραμέτρων, απλοποιούν την πολυπλοκότητα ενός μοντέλου, διατηρώντας ένα βαθμό χωρικής ανάλυσης.
3. Εμπειρικά ή εννοιολογικά: Τα εννοιολογικά μοντέλα βασίζονται στη γνώση των σχετικών φυσικών διαδικασιών που διέπουν τα στοιχεία εισόδου και παράγουν τα τελικά αποτελέσματα, ενώ τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται στην παρατήρηση των δεδομένων εισόδου και εξόδου, χωρίς να αναπαριστούν αναλυτικά τη διαδικασία της μετατροπής τους.

4. Προσδιοριστικά ή στοχαστικά: Τα στοχαστικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα στις παραμέτρους του μοντέλου ενώ τα προσδιοριστικά χαρακτηρίζουν τις διεργασίες με συγκεκριμένες τιμές και η αβεβαιότητα δε λαμβάνεται υπόψη, οπότε το ίδιο σύνολο τιμών εισόδου δίνει πάντα το ίδιο σύνολο τιμών εξόδου. Επίσης πολλά προσδιοριστικά μοντέλα θεωρούν ότι η ροή είναι σταθερή σε σχέση με το χρόνο (steady), ενώ άλλα θεωρούν ότι η ροή αλλάζει κατά το χρονικό διάστημα που προσομοιώνει το μοντέλο (unsteady).

5. Μετρούμενων παραμέτρων ή εκτιμώμενων παραμέτρων μοντέλα: Τα μετρούμενων παραμέτρων μοντέλα χρησιμοποιούν παραμέτρους οι οποίες προσδιορίζονται από τις ιδιότητες του συστήματος που μελετάται, είτε με απευθείας μετρήσεις είτε έμμεσα με μεθόδους που βασίζονται στις μετρήσεις. Τα εκτιμώμενων παραμέτρων μοντέλα περιλαμβάνουν παραμέτρους που δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές τους. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι τιμές αυτές πραγματοποιείται προσαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα εισόδου και εξόδου.

Η κατανόηση και η εκτίμηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής αποτελεί πρόβλημα και πρόκληση για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς. Τα μαθηματικά μοντέλα προσημειώνουν αυτές τις περίπλοκες διεργασίες, και αποτελούν εργαλεία για τη δημιουργία διαχειριστικών σχεδίων και τη λήψη αποφάσεων. Είναι δυνατό επίσης με διάφορα σενάρια τα οποία μπορούν να εκτελεστούν τα μαθηματικά μοντέλα να προβλεφθεί η απόκριση του συστήματος σε πλημμυρικά φαινόμενα. Βέβαια η προσομοίωση της υδρολογικής απόκρισης για μια λεκάνη απορροής και η επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, κυρίως λόγω της μοναδικότητας κάθε λεκάνης απορροής. Η κάθε λεκάνη απορροής αποτελεί ένα ξεχωριστό ζωντανό οργανισμό, όπου η ανθρώπινη παρέμβαση παίζει καθοριστικό ρόλο (Barbetta et al., 2006).

4.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των υδρολογικών μοντέλων, για την εκτίμηση της παροχής σε υδατορεύματα, είναι το γεγονός ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων η συνεισφορά της υπόγειας παροχής αγνοείται.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η συνεισφορά της υποεπιφανειακής – υπόγειας παροχής είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές με καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο. Στις καρστικές περιοχές το μεγαλύτερο μέρος της επιφανειακής απορροής και της απορροής προερχόμενη από την τήξη του χιονιού μετατρέπεται σε υπόγεια ροή, η οποία μπορεί να εκφορτιστεί δια μέσου πηγών. Σε άλλες περιπτώσεις η εν λόγω υπόγεια ροή συνεισφέρει κατευθείαν στη βασική απορροή του ποταμού (Jaquet et al., 2004). Η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε καρστικούς υδροφορείς παραμένει ένα σύνθετο εγχείρημα το οποίο, δεν έχει προσεγγιστεί με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα στο παρελθόν (White, 2002). Οι σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής έχουν πολλές ιδιαιτερότητες και η υδρολογική τους συμπεριφορά είναι ιδιαίτερα σύνθετη, πράγμα που κάνει δύσκολη τη μοντελοποίηση της σημαντικής συνεισφοράς της υπόγειας ροής, στη συνολική απορροή. Συνήθως σε καρστικές περιοχές εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός εφήμερων (διαλείπουσας ροής) υδατορευμάτων, στα οποία η βασική απορροή προέρχεται από την εκφόρτιση των διαφόρων πηγών (Rimmer, A. and Salingar, Y., 2006). Η βασική καρστική απορροή, η οποία δεν μπορεί να προσομοιωθεί με τα παραδοσιακά μοντέλα λεκάνης απορροής ποταμού, αποτελεί μια σημαντική συνιστώσα της υδρολογίας των ποταμών και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα υδρολογικά μοντέλα. Πρόσφατα, οι Viswanathan et al., 2005 και Tzoraki and Nikolaidis, 2007 χρησιμοποίησαν το υδρολογικό μοντέλο HSPF για να περιγράψουν την υδρολογική συμπεριφορά καρστικών λεκανών απορροής.

Πέραν όμως από την καρστική απορροή, ο ρυθμός τήξης του χιονιού διαδραματίζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην τελική παροχή των μελετούμενων υδατορευμάτων (Anderson, 1968). Σε προηγούμενες μελέτες η εκτίμηση του ρυθμού τήξης του χιονιού βασίστηκε σε δείκτες (εμπειρικές εξισώσεις) με πιο γνωστή την degree-day μέθοδο, όπου η αέρια θερμοκρασία χρησιμοποιείται ως δείκτης όλων των ενεργειακών ροών κατά τη διάρκεια της τήξης του χιονιού (Bras, 1989). Σε άλλες μελέτες η ποσοτικοποίηση της τήξης του χιονιού υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου για να προσομοιωθούν οι ενεργειακές ροές – μεταβολές εντός της μάζας του χιονιού (snow pack), (Mazurkiewicz et al., 2008; Sensoy et al., 2006; Ganju et al., 1999). Σε όλες αυτές τις μελέτες η επίδραση της τοπογραφίας στο ρυθμό τήξης του χιονιού δεν λαμβάνεται υπόψη. Στις επόμενες ενότητες, θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στον παράγοντα του ρυθμού τήξης του χιονιού και πώς αυτός επηρεάζεται από τα

τοπογραφικά χαρακτηριστικά των ορεινών όγκων. Ο λόγος που επικεντρωνόμαστε ιδιαίτερα στον παράγοντα τήξης χιονιού είναι ότι ο συγκεκριμένος παράγοντας διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην επιφανειακή και υπόγεια υδρολογία καθώς επίσης και στον έλεγχο των πλημμυρικών φαινομένων.

4.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου είναι η προσομοίωση της επιφανειακής και υπόγειας ροής σε πολύπλοκα γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής όπως είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, όπου πλημμυρικά φαινόμενα εμφανίζονται κατά καιρούς. Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη έχει σύνθετη γεωμορφολογία, η οποία αποτελείται από παραποτάμους διαλείπουσας ροής (εφήμερους παραποτάμους), υψηλές ορεινές αλλά και πεδινές καρστικές περιοχές, πηγές και καρσικά κανάλια-υδατορεύματα. Προκειμένου να προσομοιώσουμε με ακρίβεια τα παραπάνω υδρολογικά χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής, δημιουργήσαμε ένα συνδυασμό τεσσάρων μοντέλων (Kourgialas et al., 2010), (Εικόνα 4.1). Τα τέσσερα αυτά μοντέλα και ο σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

α) Εφαρμογή του καρστικού μοντέλου Maillet (δύο μονάδων), το οποίο εφαρμόστηκε προκειμένου να προσδιοριστεί η εκφόρτιση των πηγών στην περιοχή μελέτης.

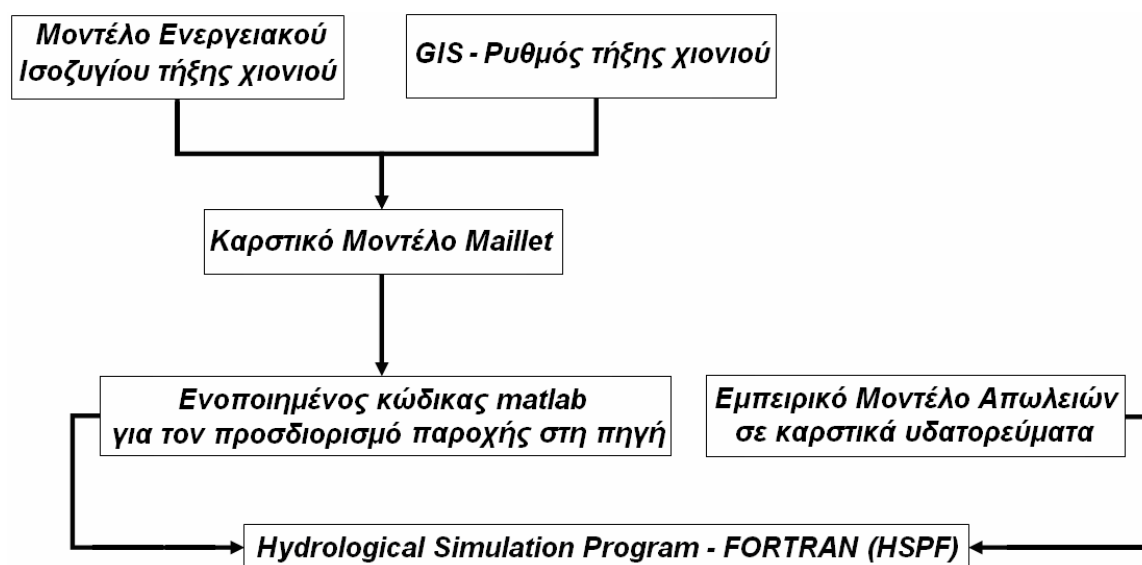
β) Δημιουργία μοντέλου εκτίμησης ρυθμού τήξης του χιονιού το οποίο λαμβάνει υπόψη του εκτός από το ενεργειακό ισοζύγιο και την τοπογραφία της περιοχής μελέτης, με τη βοήθεια του GIS (GIS-based Energy Budget Snow Melt model),

Τα παραπάνω δυο μοντέλα συνδυάστηκαν σε ένα ενιαίο κώδικα μοντελοποίησης (matlab code).

γ) Δημιουργία εμπειρικού μοντέλου υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικού καναλιού, με σκοπό να προσδιοριστεί η παροχή στο κατάντη καρστικό τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, και

δ) Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HSPF (Hydrological Simulation Program – FORTRAN), στο οποίο εισάγονται τα αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων, προκειμένου να προσομοιωθεί με ακρίβεια η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Αναλυτικότερα, οι επιμέρους συνιστώσες – μοντέλα του προτεινόμενου πακέτου μοντελοποίησης της υδρολογικής συμπεριφοράς σύνθετων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες:



Εικόνα 4. 1. Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης της υδρολογίας πολύπλοκων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής.

4.4. ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ

Τα εφήμερα υδατορεύματα είναι ο κυρίαρχος τύπος ποταμών στη Μεσόγειο εξαιτίας της υπάρχουσας μικροκλιματικής ποικιλίας που κυμαίνεται από υγρό έως ημί-ξηρό. Τα εφήμερα υδατορεύματα χαρακτηρίζονται από περιοδικές ξηρές φάσεις με ποικίλη διάρκεια και χωρική έκταση. Τα συγκεκριμένα ποτάμια συστήματα είναι σημαντικές πηγές νερού στην περιοχή της Μεσογείου καθώς αυτά καλύπτουν το 26% της εδαφικής περιοχής της Νότιας Μεσογείου. Οι περιοχές που καταλαμβάνουν οι λεκάνες απορροής παροδικών ποταμών που εκχέονται στη θάλασσα υπολογίζεται ότι είναι το 42,5% της συνολικής έκτασης της Ελλάδας (Τζωράκη, 2007).

Επιπλέον όπως έχουμε αναφέρει, ένας μεγάλος αριθμός παροδικών υδατορευμάτων βρίσκονται σε καρστικές περιοχές. Η ανακοπή της πορείας του νερού μέσα στους καρστικούς υδροφορείς από ένα λιγότερο διαπερατό γεωλογικό στρώμα, όπως είναι οι νεογενείς αποθέσεις, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των διαφόρων πηγών, οι οποίες και τροφοδοτούν τα εφήμερα υδατορεύματα με νερό. Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι έχουν γίνει αρκετές μελέτες όσο αφορά την προσομοίωση της ροής μέσα στις διόδους του καρστικού υδροφορέα όχι όμως και στον προσδιορισμό της ροής που εκχέεται από τις πηγές (Κουργιαλάς et al., 2007).

Περιγραφή Καρστικού Μοντέλου για τη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη

Στο παρελθόν η μοντελοποίηση καρσικών υδροφορέων εστιάστηκε στην προσομοίωση της ροής στα ρήγματα, τα οποία θεωρούντο ως αγωγοί μεταφοράς της ροής και όχι ως συνεισφορά της εκφόρτισης των πηγών στην παροχή των ποταμών (Jaquet et al., 2004, Manda and Gross, 2006).

Ο μεγαλύτερος όγκος νερού στην περιοχή μελέτης εκφορτίζεται μέσω του καρστικού συστήματος των Λευκών Ορέων, διαμέσου πηγών και εφήμερων υδατορευμάτων. Το βασικό σημείο εκφόρτισης του καρστικού συστήματος για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι οι πηγές του Στύλου. Οι συγκεκριμένες πηγές είναι η σημαντικότερη πηγή τροφοδοσίας νερού για την περιοχή και η κύρια πηγή τροφοδοσίας του ποταμού Κοιλιάρη. Η εμφάνιση των πηγών του Στύλου οφείλεται στην παρεμπόδιση της ροής του υπόγειου νερού - καρστικού υδροφορέα από τις μαργαϊκές (νεογενείς) αποθέσεις, εξαιτίας της τεκτονικής επαφής, (Kourgialas et al., 2010).

Γενικότερα, η βιώσιμη αξιοποίηση της υδροφορίας ενός καρστικού συστήματος προϋποθέτει τη βαθιά και ακριβή γνώση του υδατικού δυναμικού, των ποσοτικών και ποιοτικών διακυμάνσεων της διαίτας του, στο χρόνο και το χώρο, όπως επίσης και την κατανόηση και αποσαφήνιση των υδρογεωλογικών συνθηκών της αντίστοιχης περιοχής. Έχει μελετηθεί ότι το καρστικό σύστημα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, είναι ένα σύστημα δυο ταμιευτήρων, του ανώτερου ταμιευτήρα που παρουσιάζει γρήγορη απόκριση και του κατώτερου ταμιευτήρα που παρουσιάζει αργή απόκριση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι πηγές τροφοδοτούνται από δυο γεωλογικούς σχηματισμούς

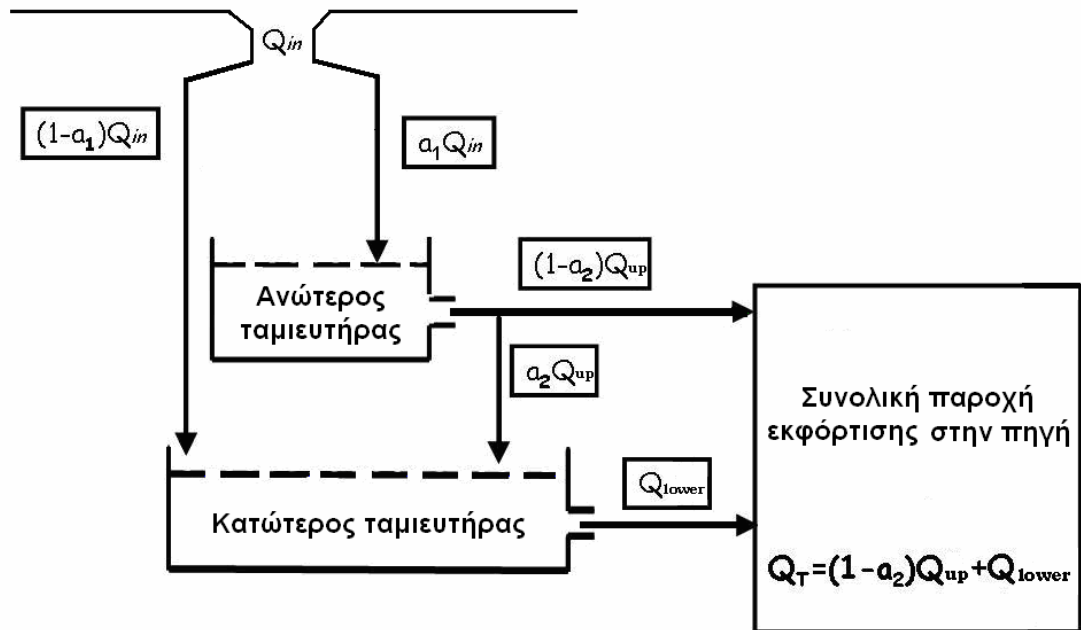
με διαφορετικά υδραυλικά χαρακτηριστικά: τους ασβεστόλιθους ζώνης Τρίπολης και την παλαιότερη καρστική ομάδα ασβεστόλιθων, τους πλακώδεις ασβεστόλιθους. Η γρήγορη ή αργή εκφόρτιση ερμηνεύεται με την ικανότητα του καρστικού συστήματος να ελευθερώνει νερό (Stamati et al., 2006).

Η γρήγορη εκφόρτιση αντιπροσωπεύει καλά ανεπτυγμένο κάρσι (μεγάλες ρωγμές και αγωγούς), ενώ η αργή αντιπροσωπεύει μικρές ρωγμές και το πρωτογενές πορώδες των πετρωμάτων. Υδρογεωλογικές παρατηρήσεις κατατάσσουν τους ασβεστολίθους της ενότητας Τρίπολης ως πετρώματα που έχουν καλά ανεπτυγμένο κάρσι και εμφανίζουν γρήγορες εκφορτίσεις, ενώ τους Πλακώδεις ασβεστολίθους της αυτόχθονης ενότητας ως πετρώματα που έχουν λιγότερο ανεπτυγμένο κάρσι και εμφανίζουν γενικά αργές εκφορτίσεις.

Το καρστικό μοντέλο του Maillet προσομοιώνει τις καμπύλες στείρευσης καρσικών πηγών (Maillet, 1905). Ο λόγος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ότι βασίζεται στην εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου κατά την περίοδο στείρευσης (χωρίς βροχοπτώσεις) και υποθέτει ότι οι πηγές εκφορτίζουν σε διακριτά σημεία και όχι σε μέτωπο. Το παραπάνω μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει ικανοποιητικά τη ροή σε καρσικές γεωλογικές δομές καθόλη τη διάρκεια του χρόνου. Έχουμε έτσι τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε ικανοποιητικά την κάμψη της ροής κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου.

Το καρστικό μοντέλο Maillet, εφαρμόστηκε σε δύο τμήματα, αντιπροσωπεύοντας τον ανώτερο και τον κατώτερο ταμιευτήρα αντίστοιχα (Εικόνα 4.2). Δύο εξισώσεις υδρολογικού ισοζυγίου δημιουργήθηκαν για να εκφράσουν τον ανώτερο και τον κατώτερο ταμιευτήρα. Η Εικόνα 4.2 απεικονίζει τη βασική δομή του καρστικού μοντέλου καθώς και τα επιμέρους υδρολογικά μονοπάτια κατά τη διαδρομή του νερού (βροχόπτωση και τήξη χιονιού) από την είσοδο του στο καρστικό σύστημα των Λευκών Ορέων (Εικόνα 3, Παράρτημα Β), μέχρι την τελική εκφόρτιση δια μέσου των πηγών του Στύλου.

Αρχική παροχή που εισέρχεται στο καρστικό σύστημα
(βροχοπτώση - τήξη χιονιού)



Εικόνα 4. 2. Σχηματική διάταξη του καρστικού μοντέλου των δυο ταμιευτήρων.

Η μεταβολή του όγκου του νερού στον ανώτερο ταμιευτήρα V_{up} είναι ίση με την ημερήσια εισροή νερού στον ταμιευτήρα $Q_{in,up}$ μείων την ημερήσια εκροή από τον ταμιευτήρα Q_{up} :

$$\frac{dV_{up}}{dt} = Q_{in,up} - Q_{up} \quad (4.1)$$

Ομοίως για τον κατώτερο ταμιευτήρα:

$$\frac{dV_{lower}}{dt} = Q_{in,lower} - Q_{lower} \quad (4.2)$$

Η ημερησία εισροή νερού στον ανώτερο και κατώτερο ταμιευτήρα μπορεί να υπολογιστεί βάση των παρακάτω εξισώσεων:

$$Q_{in,up} = a_1 Q_{in} = a_1 \times (P_w + M_s) \times \varepsilon \times A_{Karst} \quad (4.3)$$

$$Q_{in,lower} = (1 - a_1) Q_{in} + a_2 Q_{up} = (1 - a_1) \times (P_w + M_s) \times \varepsilon \times A_{Karst} + a_2 Q_{up} \quad (4.4)$$

Όπου:

a_1 = Το ποσοστό του συνολικού νερού που εισέρχεται στον ανώτερο ταμιευτήρα, από τη βροχή και την τήξη του χιονιού,

Q_{in} = Η αρχική παροχή εισόδου στο καρστικό σύστημα μέσω της βροχοπτώσης και της τήξης του χιονιού,

a_2 = Το ποσοστό της παροχής από τον ανώτερο ταμιευτήρα το οποίο εισέρχεται στον κατώτερο ταμιευτήρα (Εικόνα 4.2),

P_w = Η ημερήσια βροχοπτώση (m/d),

M_s = Ο ημερήσιος ρυθμός τήξης του χιονιού (m/d) (Αναλυτικά ο υπολογισμός του παρουσιάζεται στην Ενότητα 4.5.

ε = Ρυθμιστική παράμετρος που λαμβάνει υπόψη τις υδατικές απώλειες από το χιόνι, και

A_{Karst} = Η καρστική περιοχή - εμβαδό (m²).

Θεωρώντας την παράμετρο $Q_{in,up}$ ως σταθερά η αναλυτική λύση της Εξίσωσης (4.1) αποδίδεται ως εξής:

$$\lambda_1 \frac{dQ_{up}}{dt} + Q_{up} = Q_{in,up} \Rightarrow \frac{dQ_{up}}{dt} + \frac{1}{\lambda_1} Q_{up} = \frac{Q_{in,up}}{\lambda_1} \Rightarrow Q_{up} = Q_{up-1} e^{-\frac{t}{\lambda_1}} + e^{-\frac{t}{\lambda_1}} \int \frac{Q_{in,up}}{\lambda_1} e^{\frac{t}{\lambda_1}} dt$$

$$\Rightarrow Q_{up} = Q_{up-1} e^{-\frac{t}{\lambda_1}} + \frac{Q_{in,up}}{\lambda_1} e^{-\frac{t}{\lambda_1}} \int e^{\frac{t}{\lambda_1}} dt \Rightarrow Q_{up} = Q_{up-1} e^{-k_u t} + Q_{in,up} (1 - e^{-k_u t}).$$

Ομοίως, η αναλυτική λύση της Εξίσωσης (4.2) αποδίδεται ως εξής:

$$Q_{lower} = Q_{lower-1} e^{-k_l t} + Q_{in,lower} (1 - e^{-k_l t})$$

Επομένως, συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (4.3) και (4.4) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$Q_{up} = Q_{up-1} e^{-k_u t} + a_1 Q_{in} (1 - e^{-k_u t}), \quad (4.5)$$

$$Q_{lower} = Q_{lower-1}e^{-k_l t} + [a_2 Q_{up} + (1 - a_1) Q_{in}](1 - e^{-k_l t}), \quad (4.6)$$

$$Q_T = (1 - a_2) \times Q_{up} + Q_{lower}, \quad (4.7)$$

Όπου:

Q_T = Η συνολική εκφόρτιση των πηγών,

Q_{up} και Q_{lower} έχουν καθοριστεί παραπάνω,

Q_{up-1} = Η τιμή της παροχής Q_{up} ακριβώς στο προηγούμενο χρονικό βήμα, $t-1$,

$Q_{lower-1}$ = Η τιμή της παροχής Q_{lower} στο προηγούμενο χρονικό βήμα, $t-1$, και $k_u, k_l, (1/d)$ = Οι συντελεστές στείρευσης (the recession coefficients) για τον ανώτερο και τον κατώτερο ταμιευτήρα, αντίστοιχα.

Το χρονικό βήμα (t), του μοντέλου ορίστηκε στην 1 ημέρα (Tzoraki and Nikolaidis, 2007).

Στην παράμετρο Q_{in} συμπεριλαμβάνεται η ημερήσια βροχόπτωση και ο ημερήσιος ρυθμός τήξης του χιονιού από τον ορεινό καρστικό όγκο των Λευκών Ορέων.

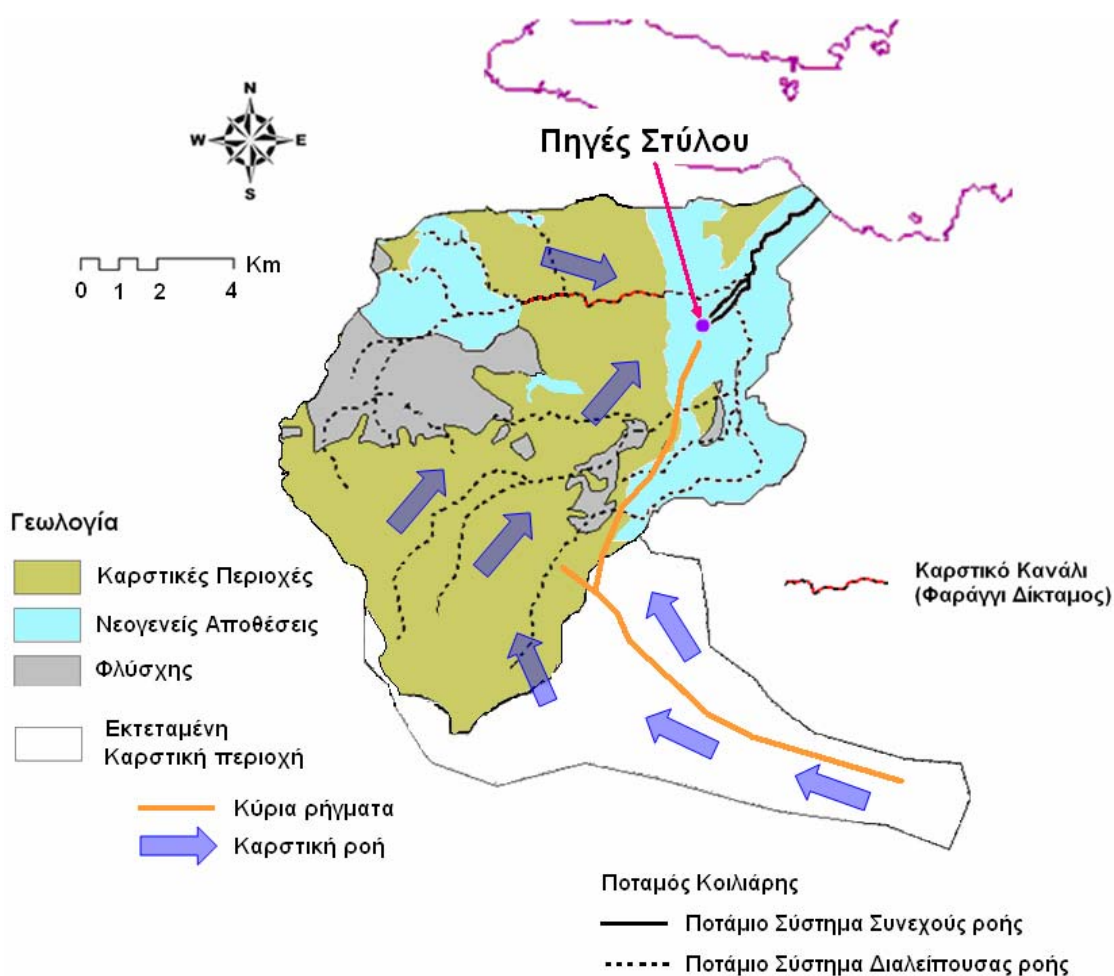
Στην περίπτωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του καρστικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση τις παροχές κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου των ετών 2005 και 2006 (Stamati et al., 2006). Οι τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης του καρστικού μοντέλου περιγράφονται παρακάτω:

Παράμετρος	Τιμή	Επεξήγηση
k_u	0.0996	Συντελεστής στείρευσης για τον ανώτερο ταμιευτήρα (1/d)
k_l	0.0261	Συντελεστής στείρευσης για τον κατώτερο ταμιευτήρα (1/d)
α_1	0.35	Ποσοστό του νερού από τη βροχή και την τήξη του χιονιού που εισέρχεται στον ανώτερο ταμιευτήρα
α_2	0.3	Ποσοστό του νερού του ανώτερου ταμιευτήρα που εισέρχεται στον κατώτερο

Το νερό από τις πηγές του Στύλου (Εικόνα 4.3) εκφορτίζεται σε υψόμετρο 17 m MSL με την αντίστοιχη παροχή να παρουσιάζει έντονη εποχιακή

διακύμανση. Το καρστικό μοντέλο, λαμβάνει ως αρχεία εισόδου τη βροχόπτωση και την τήξη του χιονιού, ενώ οι ρυθμιστικοί παράμετροι προσδιορίζονται κατά τη βαθμονόμηση, με βάση χρονοσειρές παροχής πεδίου.

Η καρστική περιοχή η οποία συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου, λόγω έλλειψης προηγούμενων δεδομένων, εκτιμήθηκε από προηγούμενη υδρογεωλογική μελέτη για την περιοχή ενδιαφέροντος. Βάση αυτής της μελέτης, ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής, υπάρχουν δυο κύρια καρστικά ρήγματα. Αυτά τα ρήγματα συνδέονται σύμφωνα με την Εικόνα 4.3 και οδηγούν - καταλήγουν απευθείας στις πηγές του Στύλου.



Εικόνα 4. 3. Οι πηγές του Στύλου και η εκτεταμένη καρστική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Σύμφωνα λοιπόν με την Εικόνα 4.3 εκτός από την καρστική περιοχή που βρίσκεται εντός της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη, μια εκτεταμένη καρστική περιοχή εκτός λεκάνης απορροής, συνεισφέρει στην τελική εκφόρτιση μέσω των πηγών του Στύλου (Kourgialas et al., 2008).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η συνολική παροχή των πηγών του Στύλου Q_T , είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί ο ημερήσιος ρυθμός τήξης του χιονιού M_s , ο οποίος είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου του ρυθμού τήξης χιονιού (the Energy Budget Snow Melt model). Το ενεργειακό μοντέλο ρυθμού τήξης χιονιού, το οποίο χρησιμοποιήσαμε, περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

4.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

4.5.1. Γενικές πληροφορίες

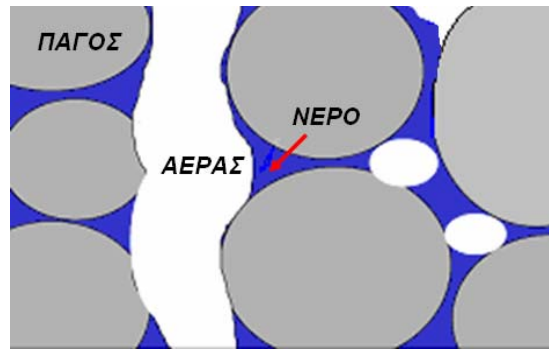
Ο ορεινός όγκος της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη έχει καρστική γεωμορφολογία, έτσι ο κύριος όγκος νερού που δημιουργείται από την τήξη του χιονιού εισέρχεται στο καρστικό σύστημα και εκφορτίζεται διαμέσου των πηγών του Στύλου. Ένα μοντέλο εκτίμησης του ρυθμού τήξης του χιονιού βασιζόμενο στο ενεργειακό ισοζύγιο δημιουργήθηκε και εφαρμόστηκε για να υπολογίσει τον παράγοντα ρυθμού τήξης χιονιού M_s , στις Εξισώσεις (4.3) και (4.4).

Σε αντίθεση με τη βροχόπτωση, η τήξη του χιονιού έχει πιο αργή απόκριση στην παροχή των υδατορευμάτων. Για το λόγο αυτό, η ορεινή υδρολογία είναι πολύ σημαντική στη μελέτη και τη γνώση της παροχής των ποτάμιων συστημάτων σε περιοχές ιδίως με υψηλά υψόμετρα. Η τήξη του χιονιού και η γνώση της ποσότητας νερού που παρέχεται κατά τη διαδικασία αυτή, στη διάρκεια του έτους, είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της τελικής παροχής του ποτάμιου συστήματος. Είναι γνωστό ότι η ποσότητα νερού με την οποία τροφοδοτούνται τα ποτάμια προέρχεται τόσο από την επιφανειακή απορροή (κατακρημνίσματα) όσο και από την υπόγεια ροή. Σε λεκάνες απορροής που διαθέτουν μεγάλα υψόμετρα οι ποσότητες χιονιού που βρίσκεται πάνω σε αυτές είναι πολύ σημαντικές. Με τη διαδικασία της τήξης οι σημαντικές αυτές ποσότητες χιονιού μετατρέπονται σε νερό, το οποίο άμεσα ή μέσω του υπόγειου υδροφορέα και ανάλογα με τη γεωλογία της λεκάνης απορροής δύναται να εμπλουτίσει το ποτάμια συστήματα απευθείας ή μέσω πηγών. Η συσσώρευση του χιονιού συμβαίνει κυρίως κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, ενώ κατά τη διάρκεια της άνοιξης η τήξη αυτού μπορεί να προκαλέσει σημαντικές πλημμύρες κυρίως όταν συνοδεύεται από

ανοιξιάτικες βροχές (Anderson, 1973).

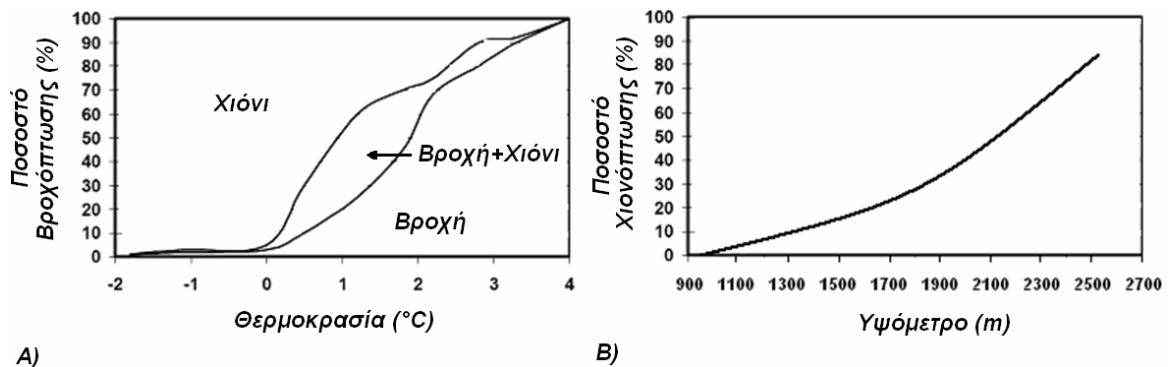
Η χρήση του GIS είναι ένα πολύτιμο εργαλείο προκειμένου να εκτιμήσουμε το ρυθμό τήξεως του χιονιού σε ορεινούς όγκους, όπου πολλές φορές είναι δύσκολες οι μετρήσεις πεδίου, κυρίως λόγω των συνήθως άσχημων καιρικών συνθηκών που επικρατούν σε πολύ υψηλά υψόμετρα κατά τους χειμερινούς μήνες. Η εφαρμογή του GIS σε συνδυασμό με διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους (π.χ. θερμοβαθμίδα, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας) μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό τήξεως του χιονιού στον ορεινό όγκο της περιοχής ενδιαφέροντος.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε τι ακριβώς είναι το χιόνι και πώς αυτό δημιουργείται. Το χιόνι είναι ένα από τα στερεά κατακρινίσματα. Το χιόνι εμφανίζεται όταν οι παγοκρύσταλλοι που δημιουργούνται μέσα σε ένα νέφος μεγεθυνθούν, οπότε αυτοί πέφτουν με μεγάλη ταχύτητα και τελικά εγκαταλείπουν το νέφος. Στην περίπτωση όπου αυτοί προλάβουν να φτάσουν στην επιφάνεια του εδάφους, προτού λιώσουν, τότε δημιουργείται το φαινόμενο του χιονιού. Για το σκοπό αυτό, απαραίτητη προϋπόθεση είναι το στρώμα του αέρα, που ορίζεται από τη βάση του νέφους μέχρι και το έδαφος, να έχει θερμοκρασία μικρότερη ή πολύ κοντά στους 0 °C. Όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι πολύ χαμηλή (από -8 έως -10 °C), τότε το χιόνι πέφτει με τη μορφή μικρών λευκών διάφανων παγοκρυστάλλων, με διάμετρο που φτάνει μέχρι τα 3 mm. Απεναντίας αν η θερμοκρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη και μάλιστα όταν αυτή ανήκει στην πρώτη αρνητική δεκάδα, τότε οι παγοκρύσταλλοι του χιονιού παρουσιάζουν υγρή επιφάνεια και με τη σύγκρουση μεταξύ τους, κατά την πτώση, ενώνονται και σχηματίζουν τις γνωστές νιφάδες χιονιού. Η διάμετρος των νιφάδων μπορεί να φτάσει και τα 5-10 cm (Φλόκας Α, 1994). Μια ιδεατή τομή χιονοκάλυψης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4, όπου όπως βλέπουμε συνυπάρχουν ποσότητες πάγου, αέρα και νερού.



Εικόνα 4. 4. Ιδεατή τομή χιονοκάλυψης.

Η θερμοκρασία του αέρα είναι ο κυρίως υπεύθυνος για τους διαφορετικούς τύπους των κατακρημνισμάτων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 Α, η ποσοστιαία κατανομή βροχής και χιονιού εμφανίζεται μεταξύ 4 και -2°C. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες 4°C τα κατακρημνίσματα εμφανίζονται αποκλειστικά ως βροχή, ενώ σε θερμοκρασίες μικρότερες από -2 °C έχουμε αποκλειστικά χιόνι (Εικόνα 4.5 Α).



Εικόνα 4. 5 Α, Β. Ποσοστά Βροχόπτωσης - Χιονόπτωσης σε διάφορες θερμοκρασίες και σχέση Χιονόπτωσης - Υψόμετρο. (U.S. Army Corps of Engineers, 1956 and Dingman, 1994)

Είναι απαραίτητο να καθορίσουμε την κρίσιμη θερμοκρασία κάτω από την οποία τα κατακρημνίσματα μετατρέπονται από βροχή σε χιόνι. Η θερμοκρασία αυτή καθορίστηκε στους 2.2 °C (Yang and Dickinson, 1997). Εκτός από την αέρια θερμοκρασία, το υψόμετρο είναι ιδιαίτερα κρίσιμος παράγοντας για την τήξη του χιονιού. Με βάση βιβλιογραφικές αναφορές, το ποσοστό χιονόπτωσης αυξάνεται με την αύξηση του υψόμετρο (Εικόνα 4.5 Β) και συνήθως εμφανίζεται σε υψόμετρα άνω των 900 m (Dingman, 1994).

4.5.2. Ενεργειακό μοντέλο τήξης χιονιού (Energy Budget Snow Melt Model)

Η πυκνότητα του στρώματος χιονιού (snow pack) αυξάνεται με το βάθος και τη διαδικασία της συμπίεσης που προκαλείται από την εναπόθεση του νέου χιονιού. Καθώς η χιονόπτωση συνεχίζεται, το νέο βάθος του στρώματος χιονιού εκφράζεται ως:

$$D_2 = D_1 - \Delta D + D_N, \quad (4.8)$$

Όπου:

D_1 και D_2 = Τα βάθη του παλιού και το νέο στρώματος χιονιού (cm), αντίστοιχα

D_N = Το βάθος του νέου χιονιού (cm), και

ΔD = Η μεταβολή στο βάθος λόγω συμπίεσης του χιονιού (cm).

Η μαθηματική έκφραση της μεταβολής του βάθους χιονιού δίνεται από την εξίσωση (Bras, 1989):

$$\Delta D = 2.54 \times \frac{P \times D}{WE} \times \left(\frac{D}{10} \right)^{0.35}, \quad (4.9)$$

Όπου:

P = Το ισοδύναμο νερό του νέου χιονιού, ως συνάρτηση της πυκνότητας του,

D = Το παρόν βάθος στρώματος χιονιού (cm), και

WE = Το ισοδύναμο νερό του στρώματος χιονιού, ως συνάρτηση της πυκνότητας του. Η πυκνότητα του νερού θεωρείται ίση με 1 g/cm^3 .

Το βάθος του νέου χιονιού D_N , στην Εξίσωση (4.8) εκφράζεται ως:

$$D_N = \frac{P}{P_N}, \quad (4.10)$$

Όπου:

Η πυκνότητα του νέου χιονιού P_N (g/cm^3), περιγράφεται ως

$$P_N = 0.05 + (T_a / 100)^2 \quad \text{εάν } T_a > 0^\circ \text{C}, \quad (4.11)$$

$$P_N = 0.05 \text{ \acute{e}\acute{a}\nu } T_a \leq 0^\circ C \quad (4.12)$$

και T_a η αέρια θερμοκρασία (°C) στην περιοχή ενδιαφέροντος (καταγεγραμμένη θερμοκρασία μετεωρολογικού σταθμού, 3 m από την επιφάνεια του εδάφους).

Το ισοδύναμο νερό του στρώματος χιονιού εκφράζεται ως:

$$WE_2 = WE_1 + P, \quad (4.13)$$

Όπου:

WE_2 και WE_1 οι νέες και παλαιές τιμές, αντίστοιχα.

Η πυκνότητα του νέου στρώματος χιονιού σε σχέση με το ισοδύναμο νερό, εκφράζεται ως:

$$p_{p2} = \frac{WE_2}{D_2}. \quad (4.14)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε δεδομένο χρονικό βήμα μπορεί να εκφραστεί ως εξής (Ohara et al., 2005), (Εικόνα 4.6):

$$Q_0 = R_N + Q_V - Q_e - Q_h - Q_g + Q_f, \quad (4.15)$$

Όπου:

Q_0 = Μεταβολή της περιεχόμενης θερμότητας χιονιού – (Change in the heat storage) [J/(cm² day)],

R_N = Καθαρή εισρέουσα ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας – (Net Radiation Exchange) [J/(cm² day)],

Q_V = Μεταφορά θερμότητας από τα κατακρημνίσματα – (Adverted heat by precipitation) [J/(cm² day)],

Q_e = Θερμότητα που καταναλώνεται μέσω εξάτμισης και εξάχνωσης – (Heat consumed in evaporation and sublimation) [J/(cm² day)],

Q_h = Η κατακόρυφη μεταφορά αισθητής θερμότητας από τη μάζα χιονιού προς την ατμόσφαιρα – (Sensible-heat transfer by turbulent convection) [J/(cm² day)],

Q_g = Η καθαρή εκρέουσα, δι' αγωγιμότητας, αισθητή θερμότητα από το υποκείμενο έδαφος προς τη μάζα του χιονιού – (Ground-snow exchange by conduction) [$J/(cm^2 \text{ day})$], και

Q_f = Ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την πήξη του περιεχόμενου ύδατος εντός του στρώματος χιονιού - (Energy released by the freezing of any liquid water in the snow pack) [$J/(cm^2 \text{ day})$].



Εικόνα 4. 6. Σχηματική απεικόνιση των συνιστωσών που επιδρούν στην τήξη του χιονιού.

Η θερμική ποιότητα του χιονιού (thermal quality) Θ καθορίζεται ως κλάσμα της μεταβολής της περιεχόμενης θερμότητας χιονιού Q_0 , προς την ενέργεια Q , που απαιτείται – καταναλώνεται, για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας νερού, μέσω της τήξης του καθαρού πάγου στους $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Ποσοτικά η παραπάνω ενέργεια υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = p_p DL_m \quad (4.16)$$

Όπου:

$L_m = 334.72 \text{ J/g}$ είναι η λανθάνουσα θερμότητα κατά την τήξη του πάγου, και

p_p = Πυκνότητα του στρώματος χιονιού σε συνάντηση με το βάθος (g/cm^3).

Βάση των παραπάνω, η θερμική ποιότητα του χιονιού Θ εκφράζεται με συνδυασμό των Εξισώσεων (4.15) και (4.16), (Bras, 1989) ως:

$$\Theta = \frac{Q_0}{Q}, \quad (4.17)$$

Τυπικές τιμές της θερμικής ποιότητας κυμαίνονται από 0.95 έως 1.0. Η θερμική ποιότητα του χιονιού επηρεάζεται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$\Theta = 1$ για $T_a < 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta = 0.99$ για $0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_a \leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta = 0.98$ για $1 \text{ }^\circ\text{C} < T_a \leq 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta = 0.97$ για $2.2 \text{ }^\circ\text{C} < T_a \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\Theta = 0.95$ για $T_a > 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Η συνολική ποσότητα του νερού που δημιουργείται κατά τη διαδικασία της τήξης του χιονιού M_s , εκφράζεται σε μονάδες βάθους και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_s = \frac{Q_0}{L_m p_w \Theta},$$

Θεωρώντας ότι $L_m = 334.72 \text{ J/g}$ και $p_w = 1 \text{ g/cm}^3$, προκύπτει ότι:

$$M_s = \frac{Q_0}{334.72\Theta}, \quad (4.18)$$

Προκειμένου να προσδιορίσουμε την ποσότητα νερού που δημιουργείται κατά την τήξη του χιονιού M_s , οι έξι συνιστώσες της Εξίσωσης (4.15) θα πρέπει να προσδιοριστούν. Αναλυτικά για κάθε συνιστώσα:

i) Η καθαρή εισρέουσα ακτινοβολία R_N (W/cm^2), προσδιορίζεται από δεδομένα μετρήσεων πεδίου που αφορούν τη διαφορά της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (solar radiation) R , και του μεγέθους της ανακλώμενης ακτινοβολίας, το οποίο και σχετίζεται με το συντελεστή albedo (Baker et al., 1990). Οι Laramie και Schaake (1972) παρουσίασαν τη μαθηματική έκφραση του συντελεστή albedo:

$$A = 0.85(0.94)^{(\tau)^{0.58}}, \text{ για την περίοδο - εποχή συσσώρευσης χιονιού,}$$

$$A = 0.85(0.82)^{(\tau)^{0.46}}, \text{ για την περίοδο - εποχή τήξης χιονιού,}$$

Όπου:

A = Η τιμή του συντελεστή albedo.

τ = Η ηλικία της επιφάνειας του χιονιού (αριθμός ημερών από την τελευταία χιονόπτωση)

Βάση των παραπάνω, $R_N = R - (1 - A)$.

ii) Η θερμότητα Q_V , που μεταφέρεται από τα εισερχόμενα κατακρημνίσματα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και εκφράζεται ως εξής:

$$Q_V = C_p p_w P_w T_w \quad (4.19)$$

Όπου:

C_p = Ειδική θερμότητα των κατακρημνισμάτων [167.36 J / (g °C) εάν είναι σε μορφή χιονιού ή 4.184 J / (g °C) εάν είναι σε μορφή βροχής],

T_w = Η θερμοκρασία των κατακρημνισμάτων (°C), (θεωρούμε ότι είναι ίση με την αέρια θερμοκρασία σε υψόμετρο 3 m από την επιφάνεια του εδάφους),

P_w = Τα κατακρημνίσματα (cm), και

p_w = Η πυκνότητα του νερού (1g/cm³).

iii) Η Θερμότητα που καταναλώνεται μέσω εξάτμισης και εξάχνωσης Q_e , υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_e = p_w L_e E, \quad (4.20)$$

Όπου:

L_e = Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($L_e = 597.3 - 0.57 T_a$), και

E = Εξάτμιση (cm/day).

Η μαθηματική έκφραση της εξάτμισης E (cm/day), παρουσιάζεται παρακάτω (Bras, 1989):

$$E = K_1 (Z_a \times Z_b)^{-\frac{1}{6}} (e_s - e_a) \times u_b,$$

Όπου:

$K_1 = 0.00651$ [cm/m^{1/3} hr / (day hPa km)],

Z_a = Το ύψος της επιφάνειας του χιονιού (m),

Z_b = Το ύψος στο επίπεδο του ανεμομέτρου (m),

e_s = Η κορεσμένη τάση ατμών στην επιφάνεια του χιονιού (hPa),

e_a = Η τάση ατμών στο ύψος a (hPa), και

u_b = Η ταχύτητα ανέμου στο ύψος b (km/h).

Η κορεσμένη τάση ατμών e_s και η τάση ατμών e_a , στην επιφάνεια του χιονιού (α) υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$e_s = 0,61078 \times e^{(17,27 \times T)/(T+237,3)},$$

$$e_a = RH \times e_s,$$

Όπου:

RH = Η σχετική υγρασία (%) στο υψόμετρο a , και

T = Αέρια θερμοκρασία στην επιφάνεια του χιονιού (°C).

iv) Η κατακόρυφη μεταφορά αισθητής θερμότητας από τη μάζα χιονιού προς την ατμόσφαιρα Q_h , είναι ανάλογη με τη θερμοβαθμίδα. Η U.S. Army Corps of Engineers προτείνει την παρακάτω εξίσωση για τον προσδιορισμό της παραπάνω συνιστώσας:

$$Q_h = C_B P_s \frac{T_a - T_s}{e_a - e_s} \times Q_e, \quad (4.21)$$

Όπου:

C_B = 0.61×10^{-3} ανά °C,

P_s = Η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του χιονιού (hPa),

T_a = Αέρια θερμοκρασία στο υψόμετρο Z_a (°C),

T_s = Θερμοκρασία της επιφάνειας του χιονιού (°C), η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας της εμπειρική εξίσωση (Li et al., 1999): $T_s = -1.4185 \text{ °C} + 0.9844 \times T_a$.

Αντίστοιχα η ατμοσφαιρική πίεση P_s , στην επιφάνεια του χιονιού υπολογίζεται ως εξής (Portland State Aerospace Society, 2004):

$$P_s = p_0 \times \exp\left[-\frac{g}{L \times R} \ln\left(\frac{L * a}{T_0} + 1\right)\right],$$

Όπου:

p_0 = Ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της θάλασσας (mb),

g = Επιτάχυνση της βαρύτητας (9.806 m/sec²),

L = Θερμοβαθμίδα (Lapse-rate): Η ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος (°C/m),

R = Παγκόσμια Σταθερά Αερίων (Gas constant for air) ίση με 287.053 J/(kg K),

a = Υψόμετρο σε (m), και

T_0 = Θερμοκρασία στο επίπεδο της θάλασσας (°C).

Η ατμοσφαιρική πίεση p_0 στο επίπεδο της θάλασσας είναι ίση με 101325 Pa (1 Pa = 0.01 mbar).

ν) Η συνιστώσα – παράμετρος Q_g , είναι η καθαρή εκρέουσα, δι' αγωγιμότητας, αισθητή θερμότητα από το υποκείμενο έδαφος προς τη μάζα του χιονιού:

$$Q_g = -K \frac{dT}{dZ}, \quad (4.22)$$

Όπου:

K [J/(°C cm day)], η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και $\frac{dT}{dZ}$ (°C/cm), η μεταβολή της θερμοκρασίας από το έδαφος προς το χιόνι.

Η παράμετρος $\frac{dT}{dZ}$, μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά ή βάση βιβλιογραφικών αναφορών. Η συνιστώσα Q_g , κυμαίνεται μεταξύ $1.27 \cdot 10^{-5}$ - $1.27 \cdot 10^{-4}$ cm/day (Eagleson, 1970).

vi) Η πήξη του περιεχόμενου ύδατος εντός του στρώματος χιονιού απελευθερώνει λανθάνουσα θερμότητα. Η ποσότητα αυτής της θερμότητας Q_f , υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_f = \frac{p_p \times D \times W \times L_m}{\Delta t}, \quad (4.23)$$

Όπου:

p_p = Πυκνότητα του στρώματος χιονιού (the snow-pack density) (g/cm³),

D = Βάθος του στρώματος χιονιού (the snow-pack depth) (cm),

W = Περιεχόμενου ύδατος εντός του στρώματος χιονιού (the liquid-water content), καθορίζεται ως V (νερού) / V (χιονιού),

L_m = Λανθάνουσα θερμότητα πάγου (the latent heat of freezing) (334.72 J/g)

και

Δt = Χρονική περίοδος.

Σύμφωνα με τον Bras (1989) το περιεχόμενο ύδατος εντός του στρώματος χιονιού, μπορεί να εκφραστεί ως: $W = (1 - \Theta) \times 100$, όπου Θ είναι η θερμική ποιότητα.

Ακολούθως, καθορίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης θερμότητας του χιονιού Q_0 , [Εξίσωση (4.15)] από τις συνιστώσες της, οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω. Ο ρυθμός τήξης του χιονιού M_s , προσδιορίζεται με βάση την Εξίσωση (4.18). Ενώ η τελική καρστική εκφόρτιση από τις πηγές του Στύλου, υπολογίζεται με το συνδυασμό των Εξισώσεων (4.3) - (4.4), (Ενότητα 4.4).

Οι εξισώσεις του ενεργειακού ισοζυγίου τήξης χιονιού, λαμβάνουν υπόψη τους την ποσότητα της βροχόπτωσης και την αέρια θερμοκρασία, δεν λαμβάνουν όμως υπόψη τους τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του ορεινού όγκου, τα οποία επηρεάζουν το ρυθμό τήξης του χιονιού, τη χωρική έκταση κάλυψης χιονιού και το χωρικό βάθος του στρώματος χιονιού. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του ορεινού όγκου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ακριβή εκτίμηση του ρυθμού τήξης του χιονιού M_s . Βάση αυτού, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον GIS ένα μοντέλο χωρικού

προσδιορισμού ρυθμού τήξης χιονιού – (GIS snow melt rate model). Το παραπάνω μοντέλο παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

4.6. ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΩΡΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ – (GIS SNOW MELT RATE MODEL)

Για την εφαρμογή του καρστικού μοντέλου Maillat εκτός από την καρστική επιφάνεια που συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου, απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός του ρυθμού τήξεως του χιονιού στην εν λόγω ορεινή καρστική περιοχή. Όπως αναφέραμε στην Ενότητα 4.4 οι εξισώσεις προσδιορισμού της τήξης του χιονιού ενσωματώνονται μέσα στο καρστικό μοντέλο Maillat. Οι εξισώσεις αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη τους την τοπογραφία του ορεινού όγκου που συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου. Για το λόγο αυτό, με τη βοήθεια του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών GIS (Arc View 9.2), εκτιμήσουμε χωρικά το ρυθμό τήξεως του χιονιού σε σχέση με την τοπογραφία. Σκοπός μας ήταν να προσδιορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ρυθμό τήξης του χιονιού στον ορεινό όγκο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Στην Ενότητα 4.4 εκτιμήθηκε η καρστική περιοχή (εντός και εκτός λεκάνης απορροής) που συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου. Η περιοχή αυτή χωρίστηκε σε δυο επιμέρους περιοχές, αυτή με υψόμετρο άνω των 900m (ορεινός όγκος) και αυτή με υψόμετρο κάτω των 900m, αντίστοιχα (Εικόνα 4.7). Ο παραπάνω διαχωρισμός πραγματοποιήθηκε καθώς η σχέση μεταξύ ποσοστού χιονόπτωσης (για μια δεδομένη κατακρήμνιση) και υψόμετρου είναι πολύ χαμηλή κάτω από τα 900m (συνήθη χιονόπτωση > 900 m) (Dingman, 1994). Το μοντέλο χωρικού προσδιορισμού του ρυθμού τήξης χιονιού με τη χρήση GIS, εφαρμόστηκε μόνο στην καρστική περιοχή με υψόμετρο ≥ 900 m. Έτσι ο ορεινός καρστικός όγκος χωρίστηκε σε πέντε διαφορετικές ζώνες χαρακτηριζόμενες από διαφορετικούς ρυθμούς τήξεως χιονιού (Πολύ Χαμηλός, Χαμηλός, Μέτριος, Υψηλός και Πολύ Υψηλός).

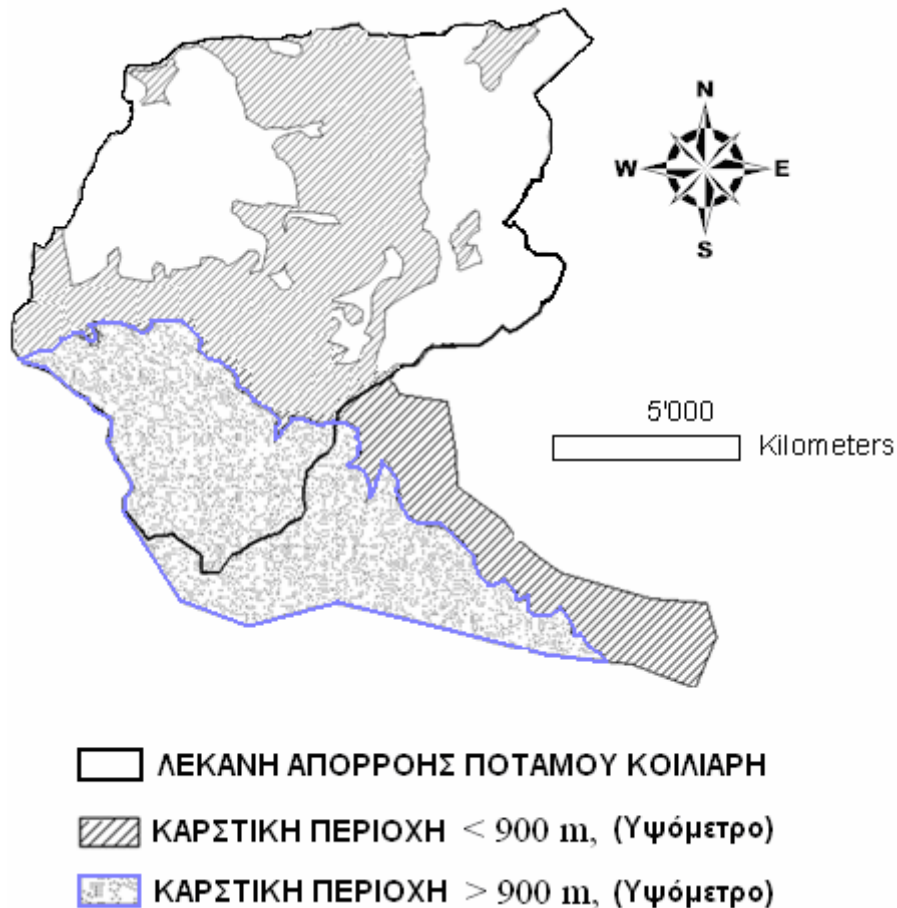
Ο τελικός χάρτης του ρυθμού τήξης χιονιού, δημιουργήθηκε βάση των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Επιπλέον ο όγκος ύδατος που εκρέει κατά την τήξη του χιονιού Q (m^3/day) για κάθε μια από τις παραπάνω ζώνες, υπολογίστηκε από το γινόμενο του ρυθμού τήξης της κάθε ζώνης με το εμβαδό της αντίστοιχης ζώνης. (Nikolaidis et al., 1991):

$$Q = M_s \times A_r, \quad (4.24)$$

Όπου:

M_s = Μέσος ρυθμός τήξης χιονιού (m/day), και

A_r = Εμβαδό ζώνης (m²).



Εικόνα 4. 7. Η χωρική διαίρεση της εκτεταμένης καρστική περιοχής.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η χωρική συνεισφορά του ρυθμού τήξης χιονιού στην καρστική περιοχή με υψόμετρο πάνω από 900 m, δημιουργήθηκαν επτά θεματικοί χάρτες - παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης χιονιού, με τη βοήθεια του Arc Map GIS, (ERSI, 2006). Οι δημιουργούμενοι θεματικοί χάρτες - παράγοντες ήταν:

1) Το υψόμετρο (Elevation), 2) Η κλίση (Slope), 3) Η έκθεση (Aspect), 4) Η καμπυλότητα (Curvature), 5) Η φωτεινότητα (Illumination), 6) Οι χρήσεις γης (Land use), και 7) Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (Solar radiation).

Όλοι οι παραπάνω τοπογραφικοί παράγοντες και ο καθένας ξεχωριστά διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο ρυθμό τήξης του χιονιού. Για παράδειγμα σε μια περιοχή χωρίς καθόλου βλάστηση (bare area without land cover) ο ρυθμός τήξης του χιονιού θα είναι πολύ υψηλός, σε αντίθεση με μια περιοχή με πολύ πυκνή φυσική βλάστηση (density land cover), όπου ο ρυθμός τήξης θα είναι πολύ πιο μικρός (Winkler, 2001). Για να καταστεί δυνατή η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου δείκτη ρυθμού τήξεως χιονιού, όλες οι αξίες (μέτρα, ποσοστά, κ.λ.π.) των δημιουργημένων θεματικών επιπέδων κατατάχθηκαν σε μια κοινή κλίμακα ρυθμού τήξεως του χιονιού από 1 μέχρι 5, ώστε να είναι εφικτός ο συνδυασμός τους σε ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς, (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4. 1. Κατάταξη κλάσεων του ρυθμού τήξεως του χιονιού.

Κλίμακα	Ρυθμός τήξεως του χιονιού
1	Πολύ Χαμηλός
2	Χαμηλός
3	Μέτριος
4	Υψηλός
5	Πολύ Υψηλός

Τα διαφορετικά επίπεδα των παραγόντων εκφράζονται είτε σε αριθμητικές τιμές, όπως είναι οι παράγοντες: Υψόμετρο (Elevation), Κλίση (Slope), Καμπυλότητα (Curvature), Φωτεινότητα (Illumination) και Ένταση Ηλιακής ακτινοβολίας (Solar radiation), είτε ως περιγραφικά δεδομένα, για τους παράγοντες: Έκθεση (Aspect) και Χρήσεις γης (Land use). Η διακύμανση των αριθμητικών τιμών βασίστηκε στη μέθοδο κατάταξης (classification method) Natural Breaks (Jenks), (Smith, 1986).

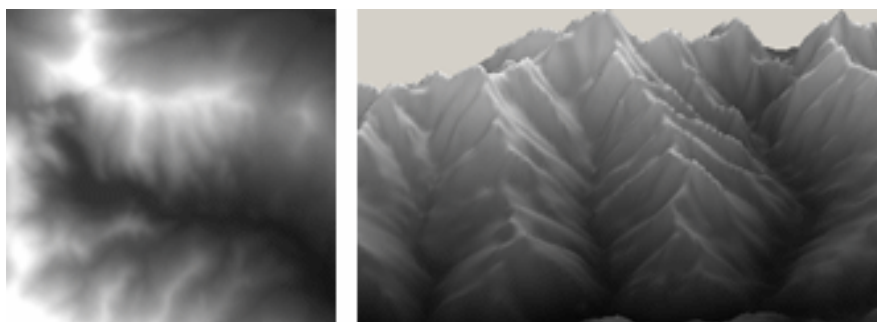
Αναλυτικά για κάθε ένα από τους επτά τοπογραφικούς παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης του χιονιού:

A) Υψόμετρο (Elevation)

Το υψόμετρο αποτελεί μια πολύ σημαντική μεταβλητή για την τοπογραφική ανάλυση του ρυθμού τήξεως του χιονιού. Όσο αυξάνεται το υψόμετρο, αυξάνεται ο ρυθμός χιονόπτωσης και αντιστρόφως ελαττώνεται ο ρυθμός τήξεως του χιονιού, (Dingman, 1994). Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε και πιο πάνω, η συνήθη χιονόπτωση παρατηρείται σε υψόμετρα > 900m, (Dingman, 1994). Έτσι, ο εκτεταμένος καρστικός ορεινός όγκος της

λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, στον οποίο παρατηρείται συχνή χιονόπτωση, τοποθετείται σε υψόμετρο άνω των 900 m, έως και το υψόμετρο των 2440 m.

Τα ψηφιακά εδαφικά – υψομετρικά μοντέλα (Digital Elevation Models – DEM), χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν δεδομένα υψομέτρου σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Η παραγωγή του Τριδιάστατου Μοντέλου Εδάφους (TIN, DEM) πραγματοποιείται με την ψηφιοποίηση των ισοϋψών (ή κωροσταθμικές καμπύλες) που χαρακτηρίζουν την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής (Johnston, 2005), (Εικόνα 4.8). Το μοντέλο αυτό αναπαριστά τριδιάστατα το εδαφικό ανάγλυφο της περιοχής. Το αρχείο καννάβου (raster file), που δημιουργείται εν συνεχεία χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με το υψόμετρο του ορεινού καρστικού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

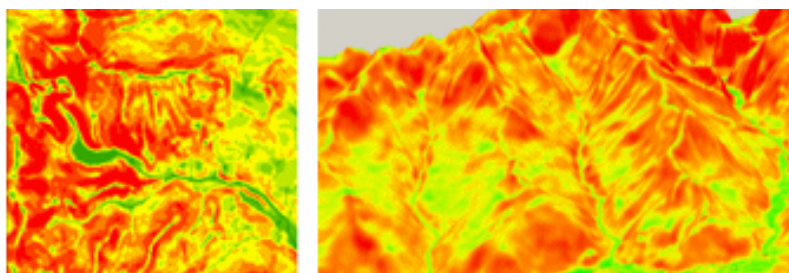


Εικόνα 4. 8. 2-D και 3-D ψηφιακό εδαφικό μοντέλο (TIN, DEM). (ESRI, 2006)

B) Κλίση (Slope)

Η κλίση, είναι ο ρυθμός αλλαγής του υψομέτρου. Στην ορολογία μαθηματικής ανάλυσης, η κλίση νοείται ως η πρώτη παράγωγος του υψομέτρου. Η κλίση του εδαφικού ανάγλυφου επηρεάζει την ποσότητα συσσώρευσης του χιονιού και κατά επέκταση το ρυθμό τήξης αυτού (μεγάλες κλίσεις συσσωρεύουν μικρές ποσότητες χιονιού, οι οποίες δύναται να λιώσουν πιο γρήγορα σε αντίθεση με τις μικρές κλίσεις που συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες χιονιού), (Dingman, 1994). Με τη χρήση των εντολών του GIS είναι δυνατό να προσδιοριστεί χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με τις κλίσεις του εδάφους για τον ορεινό καρστικού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Έτσι, και σε αυτή την περίπτωση, δημιουργήθηκε η 2-D - 3-D αναπαράσταση των κλίσεων του εδάφους, η οποία μετατράπηκε σε αρχείο

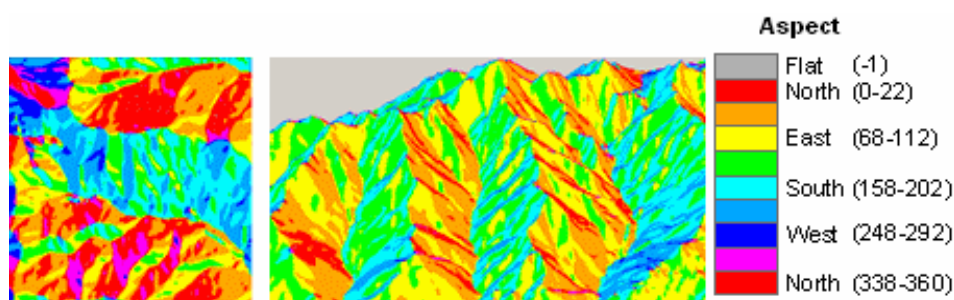
καννάβου (raster), (ESRI, 2006), (Εικόνα 4.9). Για τη λεκάνη του ποταμού Κοιλιάρη και κυρίως για τον ορεινό όγκο αυτής οι κλίσεις ποικίλουν από ομαλές ως και πολύ απότομες (0 – 90 %).



Εικόνα 4. 9. 2-D και 3-D αναπαράσταση των κλίσεων του εδάφους. (ESRI, 2006)

Γ) Έκθεση (Aspect)

Το αζιμούθιο της κλίσης ή έκθεση είναι η κατεύθυνση που μια επιφάνεια 'βλέπει' και συνήθως εκφράζεται σε μοίρες (0-360°) ή σαν ενδείξεις πυξίδας (B, BA, A, NA, N, ΝΔ, Δ, ΒΔ). Η έκθεση είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του αναγλύφου εξαιτίας της επίδρασης της στην ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το τοπίο (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4. 10. 2-D και 3-D απεικόνιση της έκθεσης του εδάφους. (ESRI, 2006)

Οι νότιες εκθέσεις θεωρούνται υπεύθυνες για την ταχύτερη τήξη του χιονιού σε αντίθεση με τις βόρειες, οι οποίες δημιουργούν δυσμενέστερες συνθήκες, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της υψηλότερης σχετικής υγρασίας. Οπότε τα χιόνια που καταλαμβάνουν πλάγιες με βόρειες εκθέσεις λιώνουν μεταγενέστερα των αντίστοιχων χιονιών των νοτιών εκθέσεων. Με βάση τα παραπάνω, ο ρυθμός τήξεως του χιονιού ελαττώνεται από τις νότιες εκθέσεις προς τις βόρειες (Johnston, 2005). Με τη χρήση των εντολών του GIS είναι δυνατό να προσδιοριστεί χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με την

έκθεση του εδάφους, για τον ορεινό καρστικό όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Δ) Χρήσεις γης (Land use)

Η περιοχική μελέτη περιλαμβάνει έξι διαφορετικούς τύπους χρήσεων γης. Το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης του ορεινού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη αποτελείται κυρίως από αραιή θαμνώδη βλάστηση, από βραχώδεις εκτάσεις αλλά και από αραιή χαμηλή δασώδη βλάστηση (Εικόνα 4.11). Στην περίπτωση των χρήσεων γης που είναι καλυμμένες με χιόνι, έχει αποδειχτεί ότι όσο πιο πυκνή είναι η βλάστηση (φυλλική επιφάνεια), τόσο μειώνεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και αυξάνεται η ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια του χιονιού (Winkler R. D., 2001). Γίνεται λοιπόν φανερό ότι για μια δασική έκταση που καλύπτεται από χιόνι, η ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας θα είναι μεγαλύτερη και κατά επέκταση η διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας για την τήξη του χιονιού μικρότερη, από ότι σε μια περιοχή χωρίς φυτική κάλυψη. Κατά επέκταση θα ισχύει και η παρακάτω σχέση:

Τήξη χιονιού (δασώδης περιοχές) < Τήξη χιονιού (περιοχές χωρίς φυτική κάλυψη).

Έχει επίσης μελετηθεί ότι ανάμεσα σε διάφορες μορφές βλάστησης, καλυμμένες με χιόνι, όσο πιο εκτεταμένη φυλλική επιφάνεια έχει το συγκεκριμένο φυτικό είδος, τόσο πιο μειωμένο ρυθμό τήξης χιονιού παρουσιάζει, πιο αναλυτικά (Winkler R. D., 2001):

Τήξη χιονιού (περιοχή χωρίς φυτική κάλυψη) > Τήξη χιονιού (περιοχή με λεύκες) > Τήξη χιονιού (περιοχή με πεύκα) > Τήξη χιονιού (περιοχή με έλατα)



Εικόνα 4. 11. Χρήσεις γης στο ορεινό όγκο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με τη χρήση των εντολών του GIS προσδιορίστηκε χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με τις χρήσεις γης του ορεινού καρστικού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Ε) Καμπυλότητα (Curvature)

Όπως η κλίση είναι η πρώτη παράγωγος του υψομέτρου, η καμπυλότητα μπορεί να θεωρηθεί ως η δεύτερη παράγωγος ή ο ρυθμός αλλαγής της κλίσης, (ESRI, 2006). Η καμπυλότητα γνωστή και ως κατανομή καμπύλωσης, είναι η καμπύλωση της επιφάνειας στην κατεύθυνση της κλίσης. Περιοχές χαμηλής

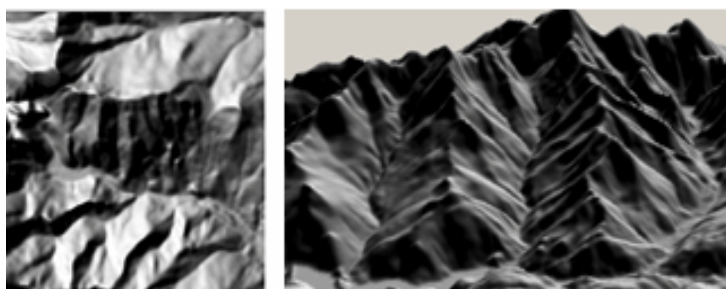
καμπυλότητας βρίσκονται όπου οι κλίσεις είναι ομοιόμορφα επίπεδες, ενώ περιοχές με υψηλή καμπυλότητα βρίσκονται όπου οι κλίσεις αλλάζουν γρήγορα στο χώρο όπως η κορυφή ενός λόφου.

Η καμπυλότητα μιας επιφάνειας κάθετης στην κατεύθυνση της κλίσης είναι η κάτοψη καμπυλότητας. Η κάτοψη καμπυλότητας καταδεικνύει εάν η επιφάνεια είναι κοίλη ή κυρτή (Johnston, 2005). Εύκολα γίνεται κατανοητό ότι κοίλες επιφάνειες λειτουργούν ουσιαστικά σαν χώροι συσσώρευσης και αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων χιονιού και κατά επέκταση χώρος μειωμένου ρυθμού τήξεως του χιονιού.

Με τη χρήση του Arc GIS 9.2 , προκύπτει η καμπυλότητα του ορεινού καρστικού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Θετικές τιμές καμπυλότητας δηλώνουν κυρτές επιφάνειες, ενώ αρνητικές δηλώνουν κοίλες επιφάνειες, η μηδενική τιμή υποδηλώνει επίπεδη επιφάνεια.

Z) Φωτεινότητα (Illumination)

Η Φωτεινότητα ενός σημείου (υψομέτρου) προσδιορίζεται ως η ανάκλαση του φωτός σε ένα υψόμετρο, βασιζόμενη στην κλίση, την έκθεση όψεων επιφάνειας εδάφους και τη γωνία - αζιμούθιο του ήλιου. Οι τιμές ανάκλασης του ηλιακού φωτός εκφράζονται συνήθως ως το ημίτονο της γωνίας μεταξύ της κλίσης (του αναγλύφου) και του ήλιου και μπορούν να απεικονιστούν ως σκιαζόμενος χάρτης ανάγλυφου του εδάφους (Εικόνα 4.12). Για αισθητικούς λόγους, η πηγή φωτός επιλέγεται συνήθως να έχει γωνία 45° πάνω από τον ορίζοντα προς βορειοδυτική κατεύθυνση. Είναι εύκολα κατανοητό ότι οι περισσότερο σκιαζόμενες περιοχές θα έχουν και πιο αργούς ρυθμούς τήξεως του χιονιού σε αντίθεση με τις πιο φωτεινές, (ESRI, 2006).



**Εικόνα 4. 12. 2-D και 3-D αναπαράσταση της φωτεινότητας του εδάφους.
(ESRI, 2006)**

Με τη χρήση των εντολών του GIS, είναι δυνατό να προσδιοριστεί χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με τη φωτεινότητα του ορεινού καρστικού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

H) Ηλιακή ακτινοβολία (Solar Radiation)

Το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών ArcView GIS 9.2, έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας (υπό αίθριες συνθήκες) που λαμβάνεται από μια επιφάνεια εδάφους. Η ηλιακή έκθεση είναι συνάρτηση του υψομέτρου, της κλίσης, της έκθεσης, του γεωγραφικού πλάτους, της εποχής του χρόνου και της σκίασης από άλλα αντικείμενα του τοπίου. Η ηλιακή έκθεση είναι πολύ σημαντικός παράγοντας κατά τη διαδικασία τήξης του χιονιού (Johnston, 2005).

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο, τροποποιείται καθώς ταξιδεύει μέσω της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα η ηλιακή ακτινοβολία τροποποιείται από: α) τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, β) τα ατμοσφαιρικά συστατικά, όπως τα σύννεφα και τη σκόνη, καθώς επίσης και γ) λόγω της ανάκλασης μέσω των διαφόρων αντικειμένων. Η άμεση ακτινοβολία κατευθύνεται από τον ήλιο άμεσα στην επιφάνεια, η διάχυτη ακτινοβολία διασκορπίζεται από τα ατμοσφαιρικά συστατικά, ενώ η ανακλώμενη ακτινοβολία έχει άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας του εδάφους. Το ποσό της άμεσης, διάχυτης και ανακλώμενης ακτινοβολίας καλείται ως συνολική ηλιακή ακτινοβολία.

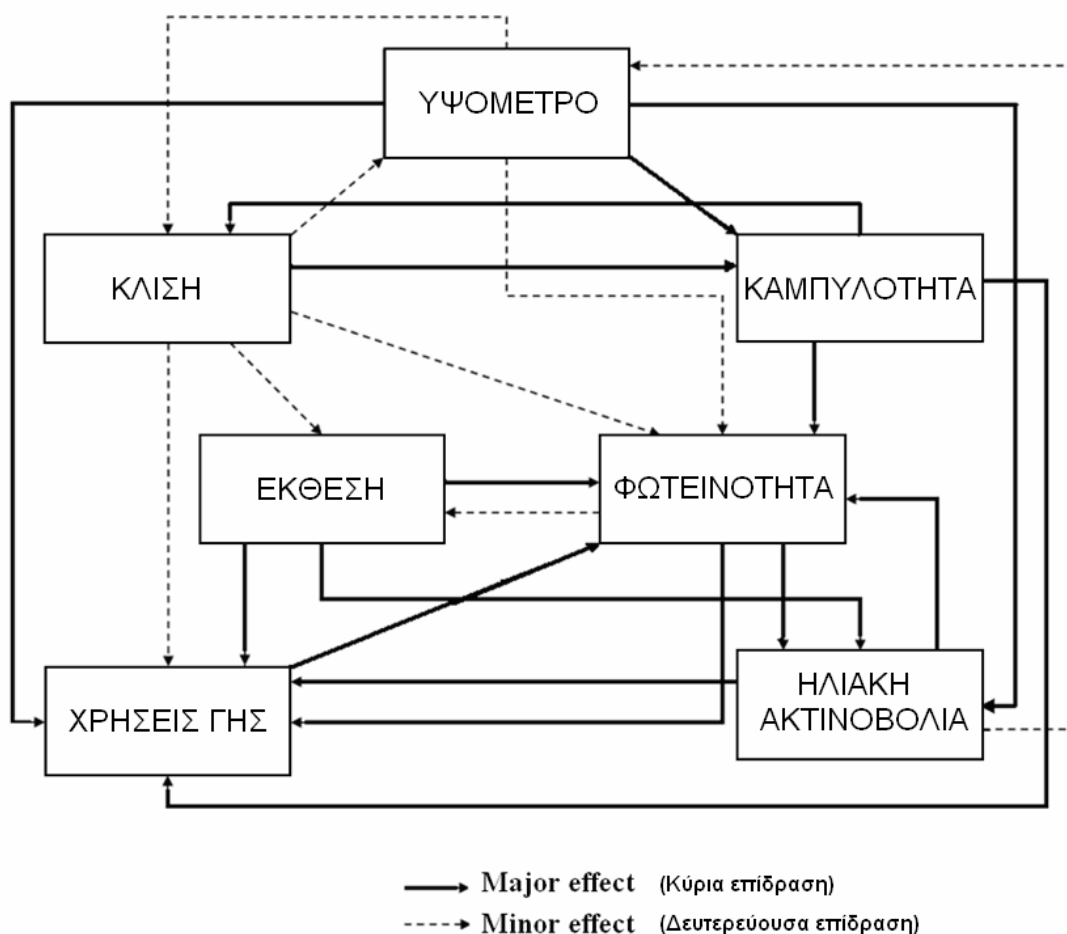
Γενικά, η άμεση ακτινοβολία είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ακτινοβολίας, ενώ η διάχυτη ακτινοβολία είναι η δεύτερη μεγαλύτερη. Η ανακλώμενη ακτινοβολία αποτελεί γενικά ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ακτινοβολίας, εκτός από ιδιαίτερες αντανάκλαστικές επιφάνειες, όπως η είναι περίπτωση του χιονιού. Ο προσδιορισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο ArcGIS περιλαμβάνει την άμεση και διάχυτη ακτινοβολία και όχι την ανακλώμενη. Με τη χρήση λοιπόν των εντολών του GIS, είναι δυνατό να προσδιοριστεί χωρικά ο ρυθμός τήξης του χιονιού σε σχέση με την ένταση της προσπίπτουσα ηλιακής ακτινοβολίας για τον ορεινό καρστικό όγκο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Μεθοδολογία χωρικής αλληλεπίδρασης των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης του χιονιού

Όπως προαναφέραμε, για κάθε παράγοντα που επιδρά στο ρυθμό τήξεως του χιονιού ορίζουμε πέντε επίπεδα από το Πολύ Υψηλό ρυθμό τήξεως του χιονιού έως το Πολύ Χαμηλό (Very high – Very low). Προκειμένου να καθοριστεί η βαρύτητα κάθε επιπέδου (Proposed weight of effect) στο συγκεκριμένο παράγοντα, θεωρήθηκε μια κλίμακα τιμών διακύμανσης (points) από το 1-10, για το κάθε επίπεδο, αρχίζοντας από τα 10 points για τον Πολύ Υψηλό ρυθμό τήξεως του χιονιού (Very high) = 10 pts, μέχρι τον Πολύ Χαμηλό ρυθμό τήξεως, που καταλαμβάνει και το χαμηλότερο επίπεδο, (Very low) = 1 pts. Η διακύμανση της βαρύτητας κάθε επιπέδου προσδιορίστηκε με βάση την κρίση των ειδικών, η οποία βασίστηκε σε βιβλιογραφικές αναφορές.

Ο καθορισμός της επίδρασης από κάθε παράγοντα χωριστά στο ρυθμό τήξη του χιονιού δεν δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα της ολικής επίδρασης. Η ενοποίηση όλων των παραγόντων μαζί είναι απαραίτητη προκειμένου να δημιουργηθεί ένας τελικός χάρτης του ρυθμού τήξεως του χιονιού. Καθώς οι διάφοροι παράγοντες δεν έχουν το ίδιο βαθμό επίδρασης στο ρυθμό τήξης, μια σταθμισμένη προσέγγιση (weighting approach) ακολουθήθηκε, προκειμένου να ενσωματωθούν αυτές οι αλληλεπιδράσεις. Η ενσωμάτωση αυτών των αλληλεπιδράσεων πραγματοποιήθηκε με βάση τη μεθοδολογία των Shaban et al. (2001). Η εν λόγω μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη της την επίδραση της μεταβολής του ενός παράγοντα σε όλους τους άλλους.

Στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης για κάθε ένα από τους επτά παράγοντες, που εμπλέκονται στην παρούσα μελέτη.



Εικόνα 4. 13. Σχηματική απεικόνιση τις αλληλεπίδρασης των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης του χιονιού.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχηματική απεικόνιση και συγκρίνοντας την επίδραση του κάθε παράγοντα σε σχέση με τους υπόλοιπους, θεωρήσαμε δυο ειδών επιδράσεις α) την κύρια επίδραση, κατά την οποία η μεταβολή ενός παράγοντα έχει άμεση επίδραση σε ένα άλλον παράγοντα και β) τη δευτερεύουσα επίδραση, κατά την οποία η μεταβολή ενός παράγοντα έχει έμμεση (δευτερεύουσα) επίδραση σε ένα άλλον παράγοντα. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν αυτές οι δυο μορφές επιδράσεων μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, ο παράγοντας εκείνος που επιδρά άμεσα σε έναν άλλο αποσπά 1 point, ενώ η δευτερεύουσα επίδραση ενός παράγοντα σε έναν άλλο αποσπά 1/2 point (Shaban et al., 2006). Έτσι σύμφωνα με την Εικόνα 4.13, ο κάθε παράγοντας που αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους αποσπά ένα συγκεκριμένο αριθμό points, αντικατοπτρίζοντας έτσι το ρυθμό επίδρασης (rate). Πιο αναλυτικά για κάθε παράγοντα, ο συνολικός αριθμός points [ρυθμός επίδρασης – rate], είναι:

Υψόμετρο (Elevation):	3 major + 2 minor = 3*(1)+2*(1/2)=4
Κλίση (Slope):	1 major + 4 minor = 1*(1)+4*(1/2)=3
Έκθεση (Aspect):	3 major + 0 minor = 3*(1)+0*(1/2)=3
Καμπυλότητα (Inflection):	3 major + 0 minor = 3*(1)+0*(1/2)=3
Φωτεινότητα (Illumination):	2 major + 1 minor = 2*(1)+1*(1/2)=2.5
Χρήσεις γης (Land use):	1 major + 0 minor = 1*(1)+0*(1/2)=1
Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Solar radiation):	2 major + 1 minor = 2*(1)+1*(1/2)=2.5

Προκειμένου να έχουμε μια ικανοποιητικότερη αποτίμηση της επίδρασης του κάθε παράγοντα στο ρυθμό τήξεως του χιονιού, προσδιορίζουμε τον παράγοντα ($A*B$), ο οποίος προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή βαρύτητας του κάθε επιπέδου (A) με το ρυθμό επίδρασης (B) του κάθε παράγοντα (Shaban et al., 2006), Πίνακας 4.2. Έτσι προκύπτει το συνολικό βάρος (total weight) για κάθε παράγοντα ξεχωριστά. Το άθροισμα των συνολικών βαρών δίνει το ολικό συνολικό βάρος (grand total weight) όλων των παραγόντων (Πίνακας 4.3).

Η τελευταία στήλη του Πίνακα 4.3, περιγράφει το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στο ρυθμό τήξης του χιονιού. Το ποσοστό με το οποίο ο κάθε παράγοντας επιδρά στο ρυθμό τήξης του χιονιού προκύπτει από τη διαίρεση του συνολικού βάρους του κάθε παράγοντα με το ολικό συνολικό βάρος.

Ο τελικός χάρτης του ρυθμού τήξης χιονιού συμπεριλαμβάνει το συνδυασμό των επτά πιο πάνω παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με το ρυθμό τήξης του χιονιού. Ειδικότερα, οι επτά δημιουργούμενοι επιμέρους χάρτες (ένας για κάθε παράγοντα), συνδυάστηκαν με τη μέθοδο της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων (weighted linear combination - αλγεβρική εξίσωση), σε περιβάλλον GIS. Με βάση αυτή την τεχνική, ο κάθε θεματικός χάρτης (παράγοντας) πολλαπλασιάζεται με το ποσοστό συνεισφοράς του, και μετέπειτα όλοι οι χάρτες αθροίζονται αποδίδοντας το τελικό χάρτη ρυθμού τήξης χιονιού S , για την περιοχή ενδιαφέροντος (Gemitzi et al., 2006):

$$S = \sum w_i x_i, \quad (4.25)$$

Όπου:

w_i = Συνολικό βάρος - ποσοστό συνεισφοράς του κάθε παράγοντα i , και

x_i = Χάρτης - παράγοντας (factor map) i .

Με βάση λοιπόν, την Εξίσωση 4.25 και τους Πίνακες 4.2 και 4.3, όπως προαναφέραμε, οι επτά χάρτες συνδυάζονται με τη μέθοδο της σταθμισμένης επικάλυψης των θεματικών επιπέδων (GIS), με στόχο τη δημιουργία του τελικού χωρικού χάρτη ρυθμού τήξης χιονιού για την εκτεταμένη καρστική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, η οποία συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου. Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία η περιοχή υποδιαιρείται σε έξι καρστικές ζώνες (πέντε ζώνες με τήξη χιονιού και μίας χωρίς τήξη χιονιού). Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των έξι ζωνών (μέσο υψόμετρο και εμβαδό) εισάγονται στο μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου τήξης χιονιού. Έτσι οι εκτιμώμενες τιμές βροχόπτωσης και η εκροή μέσω της τήξης του χιονιού για κάθε μια από τις έξι καρστικές ζώνες (περιοχές), χρησιμοποιούνται ως τελικά αρχεία εισόδου στο καρστικό μοντέλο Maillet.

Πίνακας 4. 2. Κατηγοριοποίηση και βαθμονόμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης χιονιού, (εκτεταμένος καρστικός ορεινός όγκος).

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ (Ρυθμού Τήξης Χιονιού)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (A)	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
Υψόμετρο (m)	Πολύ Υψηλός	10	< 1273
	Υψηλός	8	1273-1596
	Μέτριος	5	1596-1867
	Χαμηλός	3	1867-2072
	Πολύ Χαμηλός	1	2072-2440
Κλίση (%)	Πολύ Υψηλός	8	40.47-89.75
	Υψηλός	6.5	29.56-40.47
	Μέτριος	5	20.76-29.56
	Χαμηλός	3.5	8.44-20.76
	Πολύ Χαμηλός	2	0-8.44
Καμπυλότητα (zunits)	Πολύ Υψηλός	8	2.29-10.264
	Υψηλός	6.5	0.58-2.29
	Μέτριος	5	(-0.65) - 0.58
	Χαμηλός	3.5	(-2.43) - (-0.65)
	Πολύ Χαμηλός	2	(-9.47) - (-2.43)
Έκθεση	Πολύ Υψηλός	8	South
	Υψηλός	6.5	Southwest
	Μέτριος	5	West
	Χαμηλός	3.5	East, southeast, northwest
	Πολύ Χαμηλός	2	north, northeast
Φωτεινότητα (0-255)	Πολύ Υψηλός	8	208-254
	Υψηλός	6.5	172-208
	Μέτριος	5	136-172
	Χαμηλός	3.5	98-136
	Πολύ Χαμηλός	2	0-98
Χρήσεις γης	Πολύ Υψηλός	8	Βραχώδεις Εκτάσεις
	Υψηλός	6	Εκτάσεις Αραιής Βλάστησης (θάμνοι)
	Μέτριος	5	Φυσικοί Βοσκότοποι
	Χαμηλός	4	Πυκνή και Χαμηλή Βλάστηση
	Πολύ Χαμηλός	3	Σκληρόφυλλες Δασικές Εκτάσεις
Ηλιακή Ακτινοβολία (WH/m ²)	Πολύ Υψηλός	8	1.217.269- 1.429.258
	Υψηλός	6.5	1.072.224-1.217.269
	Μέτριος	5	927.179-1.072.224
	Χαμηλός	3.5	776.555- 927.179
	Πολύ Χαμηλός	2	6.700-776.555

Πίνακας 4. 3. Σταθμισμένη εκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό τήξης χιονιού.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ (Ρυθμού Τήξης Χιονιού)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (A)	ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (B)	(A*B)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (%)
Υψόμετρο (m)	Πολύ Υψηλός	10		40	108	22.314
	Υψηλός	8		32		
	Μέτριος	5	4	20		
	Χαμηλός	3		12		
	Πολύ Χαμηλός	1		4		
Κλίση (%)	Πολύ Υψηλός	8		24	75	15.496
	Υψηλός	6.5		19.5		
	Μέτριος	5	3	15		
	Χαμηλός	3.5		10.5		
	Πολύ Χαμηλός	2		6		
Καμπυλότητα (zunits)	Πολύ Υψηλός	8		24	75	15.496
	Υψηλός	6.5		19.5		
	Μέτριος	5	3	15		
	Χαμηλός	3.5		10.5		
	Πολύ Χαμηλός	2		6		
Έκθεση	Πολύ Υψηλός	8		24	75	15.496
	Υψηλός	6.5		19.5		
	Μέτριος	5	3	15		
	Χαμηλός	3.5		10.5		
	Πολύ Χαμηλός	2		6		
Φωτεινότητα (0-255)	Πολύ Υψηλός	8		20	62.5	12.913
	Υψηλός	6.5		16.25		
	Μέτριος	5	2.5	12.5		
	Χαμηλός	3.5		8.75		
	Πολύ Χαμηλός	2		5		
Χρήσεις γης	Πολύ Υψηλός	8		8	26	5.372
	Υψηλός	6		6		
	Μέτριος	5	1	5		
	Χαμηλός	4		4		
	Πολύ Χαμηλός	3		3		
Ηλιακή Ακτινοβολία (WH/m ²)	Πολύ Υψηλός	8		20	62.5	12.913
	Υψηλός	6.5		16.25		
	Μέτριος	5	2.5	12.5		
	Χαμηλός	3.5		8.75		
	Πολύ Χαμηλός	2		5		
					Sum = 484	Sum = 100

4.7. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ (MATLAB)

Προκειμένου να ενσωματωθούν οι εξισώσεις του καρστικού μοντέλου Mailet, με αυτές του μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου τήξης χιονιού δημιουργήθηκε ένας κώδικας προγραμματισμού (matlab), στον οποίο συνδυάζονται οι Εξισώσεις (4.5 - 4.31). Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, η καρστική περιοχή υποδιαιρέθηκε σε έξι ζώνες, με βάση το χωρικό ρυθμό τήξης του χιονιού (GIS snow melt rate model). Για κάθε μια από αυτές τις ζώνες, η ημερήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία υπολογίστηκαν και εισήχθησαν ως αρχείο εισόδου τύπου (text) στον κώδικα του μοντέλου MATLAB (Matlab code model). Παράλληλα δημιουργήθηκε μια εύχρηστη πλατφόρμα προσομοίωσης μορφής GUI (Graphical User Interface), παρέχοντας το πλαίσιο αλληλεπίδρασης μεταξύ του χρήστη και της εφαρμογής του προαναφερθέντος κώδικα (Εικόνα 4.14). Οι τιμές των αποτελεσμάτων για κάθε εκτέλεση του κώδικα, συναθροίστηκαν, προκειμένου να προσδιοριστεί η τελική παροχή – εκφόρτιση από τις πηγές του Στύλου. Διαδοχικά η τελική χρονοσειρά εκφόρτισης από τις πηγές του Στύλου, χρησιμοποιήθηκε ως αρχείο εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο HSPF. Ακολούθως, το υδρολογικό μοντέλο HSPF, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επιφανειακής απορροής από τη λεκάνη απορροής προς τον ποταμό Κοιλιάρη. Τελικός στόχος, ήταν η ακριβής προσομοίωση της συνολικής υδρολογικής απόκρισης (επιφανειακής και υπόγειας) για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

THE GUI OF SNOW MELT ENERGY BUDGET AND KARSTIC MODELS -PARAMETERS-	
Initial snow depth (m)	0.2
Initial water equivalent of the snow (m)	0.1
Mean elevation of the karstic area (m)	1574
Time step (day)	1
Karstic area (m ²)	23015342.03
Initial karstic flow (m ³ /sec)	10
Fraction of inflow reservoir (a1)	0.35
Upper reservoir recession constraint (ku)_(1/day)	0.0996
Lower reservoir recession constraint (k1)_(1/day)	0.0261
Fraction of upper reservoir flow to lower (a2)	0.3
Rainfall lapse rate	0.04
<input type="button" value="RUN"/>	

Εικόνα 4. 14. Πλατφόρμα προσομοίωσης μορφής GUI, της συνένωσης του καρστικού μοντέλου και του μοντέλου ρυθμού τήξης χιονιού.

4.8. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HSPF

Το υδρολογικό μοντέλο HSPF [Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)] είναι ένα ενιαίων παραμέτρων, φυσικής βάσης, μη σταθερής ροής (unsteady flow), συνεχές μοντέλο. Προσομοιώνει τη χρονική απόκριση της λεκάνης απορροής, βασιζόμενο σε γεωχημικά και υδρολογικά ισοζύγια μάζας, ενώ ποσοτικοποιεί την ύπαρξη θρεπτικών, φυτοπροστατευτικών, τοξικών ουσιών σε επιφανειακά νερά από γεωργικές, αστικές και άλλες χρήσεις γης (Bicknell et al., 2001). Το μοντέλο αυτό έχει τα ακόλουθα κύρια χαρακτηριστικά:

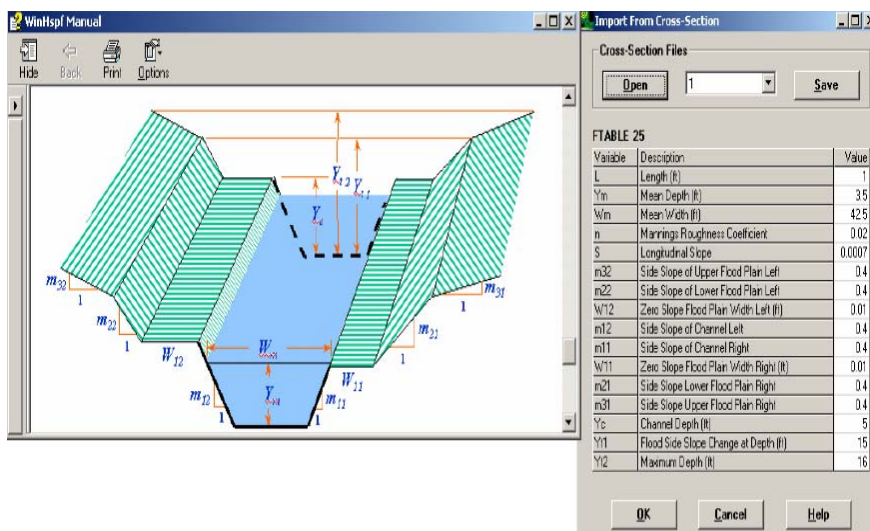
- Είναι ένα μοντέλο ημι-κατανεμημένο, που περιλαμβάνει δεδομένα GIS.
- Έχει φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας, που ευνοεί τόσο τη χρήση του, όσο και τη δημιουργία σεναρίων.
- Έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης λεκάνης απορροής μεγάλης έκτασης.
- Μπορεί να συμπεριλαμβάνει σημειακές και μη σημειακές πηγές ρύπανσης με τις διεργασίες της τύχης και μεταφοράς των ρύπων.
- Παράγει χρονοσειρές ποιότητας και ποσότητας του νερού σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στη λεκάνη απορροής.
- Υποστηρίζεται από την U.S. EPA και έχει βαθμονομηθεί για πολυάριθμες λεκάνες απορροής.

Το HSPF προσομοιώνει τον υδρολογικό κύκλο, θεωρώντας ότι η λεκάνη απορροής διαιρείται στο ποτάμι και στο έδαφος. Το έδαφος με τη σειρά του ανάλογα με τη διηθητική του ικανότητα κατατάσσεται ως: α) διαπερατό και β) αδιαπέρατο.

Διαπερατό τμήμα: Στο HSPF το module που περιγράφει τις ποιοτικές και ποσοτικές διεργασίες που συμβαίνουν στο διαπερατό τμήμα γης, λέγεται PERLAND. Το έδαφος σε ένα διαπερατό τμήμα υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες ανώτερη, μέση και κατώτερη. Η βλάστηση επηρεάζει την κίνηση του νερού μέσα και έξω από το περιβάλλον μέσω της διαπνοής και της συγκρατήσεως του νερού πάνω στα φυτά. Κάτω από τη ζώνη του εδάφους το υπόγειο νερό διαιρείται σε δυο ζώνες: μια ενεργή υπόγεια ζώνη, που δύναται να τροφοδοτεί με νερό το ποτάμι και σε μια μη ενεργή υπόγεια ζώνη, που τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφόρο.

Αδιαπέρατο τμήμα: Το module IMPLND χρησιμοποιείται για επιφάνεια γης κυρίως αστικής, όπου πολύ λίγη ή σχεδόν καθόλου διαπερατότητα δεν παρατηρείται. Το νερό, τα στερεά και οι διάφοροι ρύποι μετακινούνται με την κίνηση του νερού κατάντη σε άλλο αδιαπέρατο τμήμα ή σε ποτάμι ή σε δεξαμενή.

Ποτάμι: Το module RCHRES μοντελοποιεί την κίνηση του νερού στο ποτάμι. Το ποτάμι θεωρείται ότι έχει τραπεζοειδή μορφή (Εικόνα 4.15). Το ποτάμι δημιουργείται στο περιβάλλον του GIS, σε μορφή γραμμικού αρχείου (shape file) και στον αντίστοιχο πίνακα του δημιουργούνται τα κατάλληλα πεδία, που καθορίζονται από τα εγχειρίδια χρήσης του μοντέλου, στα οποία ο χρήστης δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τους κλάδους που αποτελείται το ποτάμι και τη γεωμετρία της κοίτης τους, καθώς και πλήθος άλλων πληροφοριών που έχουν να κάνουν τόσο με τους διάφορους κλάδους του ποταμίου και τις υπολεκάνες όπου ανήκουν αυτοί, όσο και με χαρακτηριστικά του νερού που εμπεριέχεται μέσα σε αυτούς. Έτσι προκύπτει ο τελικός πίνακας FTABLE που συσχετίζει τη γεωμετρία της κοίτης του κλάδου.

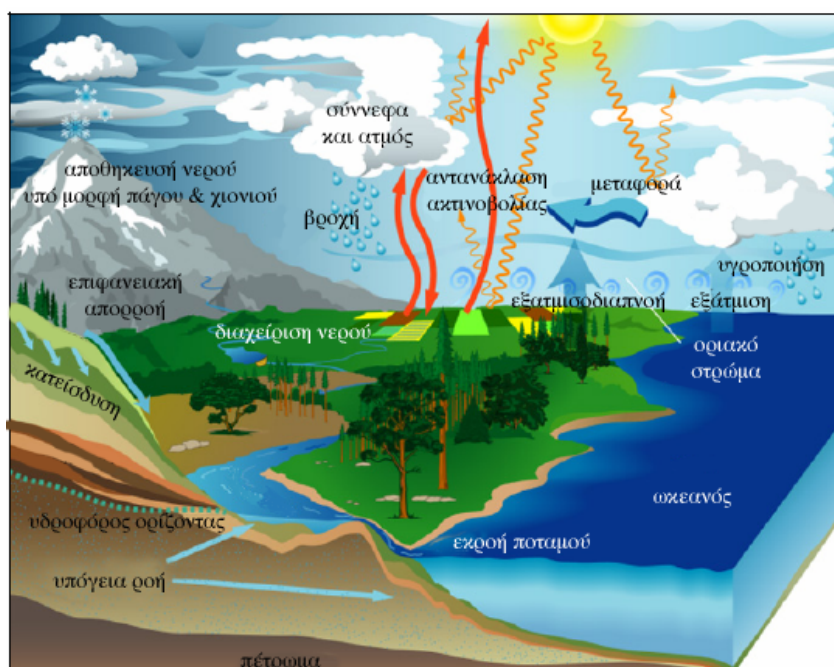


Εικόνα 4. 15. Σχηματική απεικόνιση του ποταμιού και ο πίνακας FTABLE.

Το υδρολογικό μοντέλο HSPF χρησιμοποιεί δεδομένα τα οποία δημιουργούνται σε περιβάλλον GIS όπως είναι το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM), οι χρήσεις γης, τα εδάφη, η γεωλογία, το υδρογραφικό δίκτυο και δεδομένα ποιότητας νερών. Για την εισαγωγή και τη διαχείριση της μετεωρολογικής πληροφορίας χρησιμοποιείται το υπομοντέλο WDM (Watershed Data Management).

Οι υδρολογικές διεργασίες στο μοντέλο HSPF συμπεριλαμβάνουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την εξάτμιση, τη διαπνοή, την κατείδυση, την επιφανειακή απορροή, τη διήθηση, την υπεδάφια απορροή και τη ροή του υπογείου νερού. (Εικόνα 4.16).

Παρότι το μεγαλύτερο ποσοστό των παραμέτρων βασίζεται σε φυσικές μεταβλητές, υπάρχει ένα αριθμός που βαθμονομείται. Οι παράμετροι που βαθμονομούνται αντισταθμίζουν την έλλειψη ακρίβειας στα δεδομένα. Η δομή του HSPF λαμβάνει υπόψη τη μη πλήρη κατανόηση του φυσικού συστήματος στο οποίο νερό και ρύποι αλληλεπιδρούν και ταξιδεύουν, γιατί δημιουργήθηκε σε μια χρονική στιγμή όπου δεν υπήρχε η λεπτομερής χωρική ανάλυση που υπάρχει σήμερα.



Εικόνα 4. 16. Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου στο μοντέλο HSPF. (Bicknell et al., 2001)

Οι κύριες μετεωρολογικές χρονοσειρές σε ωραιο ή ημερήσιο βήμα που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση με το μοντέλο HSPF είναι: η βροχή, η δυνητική εξάτμιση, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, η θερμοκρασία σημείου δρόσου, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου, και η νεφοκάλυψη.

Αναλυτικότερα για τις μετεωρολογικές παραμέτρους που χρησιμοποιεί το HSPF:

Η βροχή αποτελεί την κύρια συνιστώσα στην υδρολογία των εδαφών. Η επιφανειακή απορροή συσχετίζεται άμεσα με τη βροχή. Επίσης, η διάβρωση των εδαφών και η περαιτέρω μεταφορά των ιζημάτων και των ρύπων εξαρτώνται από τη βροχή, η οποία προκαλεί την επιφανειακή απορροή. Τέλος, η πτώση της βροχής εμπλουτίζει άμεσα τα ποτάμια ή τους ταμιευτήρες.

Η εξάτμιση είναι σημαντική στον υπολογισμό της απορροής, γιατί προκαλεί απώλειες τόσο από τις υδάτινες επιφάνειες και το χιόνι, όσο και απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής από τη βλάστηση.

Η θερμοκρασία μέσω της χρήσης της θερμοβαθμίδας, μας βοηθάει στον υπολογισμό της θερμοκρασίας της κάθε υπολεκάνης. Επίσης, η θερμοκρασία χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της τήξης του χιονιού και στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του νερού και των εδαφών.

Η ταχύτητα ανέμου χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της εξάτμισης και στον υπολογισμό του ισοζυγίου θερμότητας στο χιόνι και στο νερό. Επίσης η ταχύτητα επανα-αερισμού των λιμνών και η ταχύτητα εξάτμισης των χημικών ενώσεων, είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου.

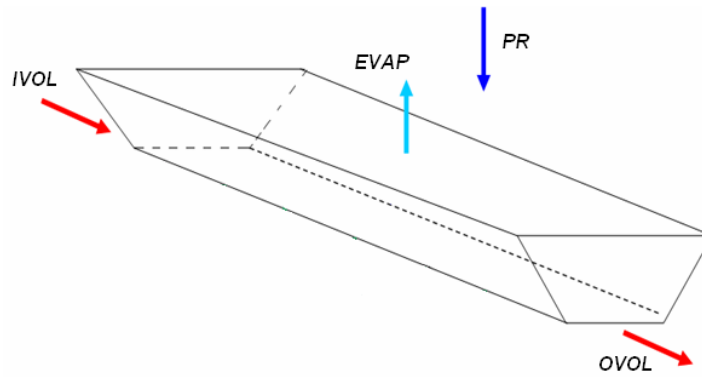
Η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται από το HSPF για τον υπολογισμό της τήξης του χιονιού, στο ισοζύγιο θερμότητας στο υδάτινο σώμα και τέλος, στο ρυθμό ανάπτυξης του πλανγκτόν.

Η θερμοκρασία σημείου δρόσου χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τότε το μοντέλο θα λαμβάνει τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα σαν βροχή ή σαν χιόνι και στο ισοζύγιο θερμότητας στο υδάτινο σώμα.

Η νεφοκάλυψη επηρεάζει το ισοζύγιο της μεγάλου μήκους ακτινοβολίας (γήινη ακτινοβολία) και μειώνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

4.8.1. Υδρολογικές εξισώσεις του μοντέλου HSPF

Το μοντέλο HSPF θεωρεί ότι στο ποτάμι συμβαίνει πλήρης ανάμιξη και ότι η ροή είναι ομοιόμορφη. Λαμβάνει υπόψη την Εξίσωση της συνέχειας (Εικόνα 4.17):



Εικόνα 4. 17. Σχηματική απεικόνιση των βασικών υδρολογικών διαδικασιών σε τμήμα τομής ποταμού. (Bicknell et al., 2001)

$$VOLE = VOLS + sumIVOL - sumOVOL + PR - EVAP$$

Όπου:

VOLE = όγκος του νερού στο τέλος του χρονικού βήματος

VOLS = όγκος του νερού στην αρχή του χρονικού βήματος

IVOL = όγκος εισροής

OVOL = όγκος εκροής

PR = όγκος βροχόπτωσης

EVAP = όγκος εξάτμισης

και

$$OVOL = \Delta t(KS \cdot OS + (1 - KS) \cdot OE)$$

KS= συντελεστή βαρύτητας που παίρνει τιμές από 0.0-0.5

OS= εκροή στην αρχή του χρονικού βήματος

OE= εκροή στο τέλος του χρονικού βήματος

οπότε

$$VOLE = VOLS + sumIVOL + PR - EVAP - [\Delta t(KS \cdot OS + (1 - KS) \cdot OE)]$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο μοναδικός άγνωστος είναι ο παράγοντας OE, ο οποίος για το ποτάμι υπολογίζεται από τον πίνακα FTABLE που συσχετίζει τη γεωμετρία της κοίτης του κλάδου με την παροχή του.

Όσον αφορά την κίνηση του νερού στο ποτάμι, το μοντέλο δίνει δυο δυνατότητες επίλυσης της διόδευσης της πλημμύρας, είτε με τη βοήθεια απλών εξισώσεων αποθήκευσης (Storage equation), είτε με την εξίσωση κινηματικού κύματος (Kinematic wave equation). Οι Εξισώσεις αποθήκευσης ουσιαστικά αποτελούνται από τη χωρικά ομοιόμορφη και χρονικά μεταβλητή εξίσωση της συνέχειας και μια εξίσωση ροής που εκφράζει την τραχύτητα και τη γεωμετρία της διατομής του ποταμού, όπως είναι η Εξίσωση Manning, (Bicknell et al., 1993):

$$Q = VA = \left(\frac{1.00}{n}\right)AR^{2/3}\sqrt{S},$$

Όπου:

Q = Παροχή (m³/sec),

V = Ταχύτητα (m/sec),

A = Εμβαδό διατομής (m²),

n = Συντελεστής τραχύτητας Manning's,

R = Υδραυλική ακτίνα (m), και

S = Κλίση καναλιού (m/m).

Όσον αφορά τις εξισώσεις αποθήκευσης (Storage equation):

Εξισώσεις Αποθήκευσης: Το σύνολο της εισροής στην ανάντη διατομή ενός τμήματος ποταμού αποτελεί το υδρογράφημα εισροής, ενώ το ζητούμενο υδρογράφημα είναι στη κατάντη διατομή το υδρογράφημα εκροής. Με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες νερού (λόγω διήθησης στην κοίτη) οι επιφάνειες των δυο υδρογραφημάτων είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή ο όγκος του νερού παραμένει αμετάβλητος. Λόγω της αποθηκευτικής ικανότητας του τμήματος του ποταμού και λόγω της υδραυλικής αντίστασης που προβάλλεται στην κίνηση του νερού, το υδρογράφημα εκροής παρουσιάζει χαμηλότερη αιχμή και χρονική επιβράδυνση ως προς την αιχμή σε σχέση με το υδρογράφημα εισροής. Η διαφορά μεταξύ των τεταγμένων των υδρογραφημάτων εισροής και εκροής σε κάθε χρονική στιγμή παριστάνει την ανά μονάδα χρόνου ποσότητα νερού η οποία αποθηκεύεται στο θεωρούμενο τμήμα. Μαθηματικώς, η διαδικασία αυτή εκφράζεται με τη σχέση (Σακκάς, 2004)

$$\frac{dV(t)}{dt} = I - Q \quad (4.26)$$

όπου $V(t)$ = Ο όγκος του νερού (m^3), ο οποίος βρίσκεται σε αποθήκευση στο θεωρούμενο τμήμα κατά τη χρονική στιγμή t ,

I = Η παροχή εισροής, (m^3/s),

Q = Η παροχή εκροής (m^3/s), και

t = Ο χρόνος, (sec).

Η Εξίσωση (4.26) εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας στο εξεταζόμενο σύστημα.

Με πολλαπλασιασμό της Εξίσωσης (4.26) επί dt και ολοκλήρωση στο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_{i+1} - t_i$, προκύπτει

$$V_{i+1} - V_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [I(t) - Q(t)] dt \quad (4.27)$$

Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του β' μέλους της Εξίσωσης (4.27) με βάση τον τραπεζοειδή κανόνα, η Εξίσωση (4.27) γράφεται

$$V_{i+1} - V_i = [(I_i + I_{i+1}) - (Q_i + Q_{i+1})] \Delta t / 2 \quad (4.28)$$

Το HSPF χρησιμοποιεί την υδρολογική μέθοδο διόδευσης πλημμύρας διαμέσου τμήματος ποταμού και συγκεκριμένα τη μέθοδο Muskingum, βάση της οποίας αποτελεί η Εξίσωση (4.29), (Zoppou C., 1999):

$$V = K[xI + (1-x)Q] \quad (4.29)$$

Όπου:

V ο όγκος αποθήκευσης, K σταθερά που προσεγγίζεται από το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του τμήματος (σε μονάδες χρόνου), x είναι ο συντελεστής βάρους των επιμέρους αποθηκεύσεων δηλαδή των παροχών στα άκρα του θεωρούμενου τμήματος, I είναι η εισροή στην ανάντη διατομή του τμήματος και Q είναι η εκροή στην κατάντη διατομή του τμήματος.

Για δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές t_i και t_{i+1} , από την Εξίσωση (4.29) προκύπτει:

$$V_{i+1} - V_i = K[x(I_{i+1} - I_i) + (1-x)(Q_{i+1} - Q_i)] \quad (4.30)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (4.28) και (4.30) προκύπτει:

$$Q_{i+1} = C_1 I_i + C_2 I_{i+1} + C_3 Q_i$$

Όπου:

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad C_2 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

Ουσιαστικά η Εξίσωση Muskingum είναι μια αναδρομική σχέση που συνδέει την παροχή εξόδου, μιας χρονικής στιγμής $i+1$, με την παροχή εξόδου την προηγούμενη χρονική στιγμή i και τις παροχές εισόδου τις χρονικές στιγμές i και $i+1$. Οι δε συντελεστές C_1 , C_2 , C_3 λειτουργούν σαν συντελεστές βαρύτητας και αθροίζονται στη μονάδα, δηλαδή

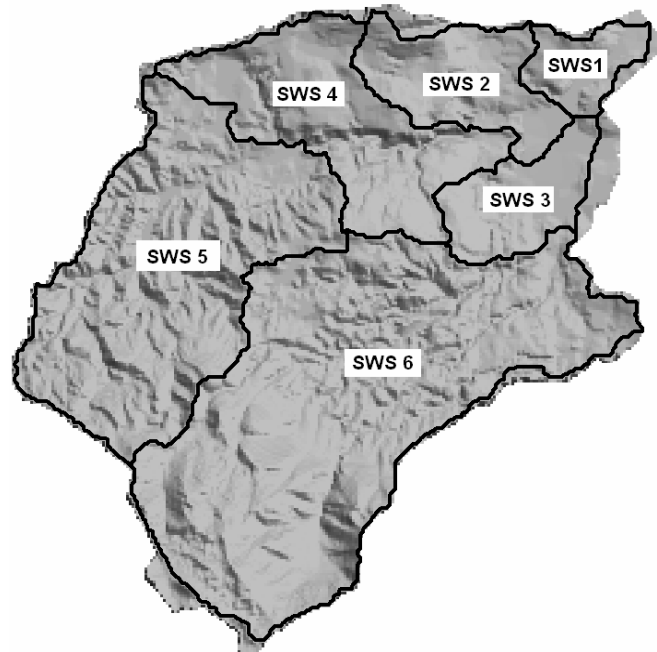
$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

4.8.2. Εφαρμογή του μοντέλου HSPF στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

Το υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής HSPF λειτουργεί μέσα στο πλαίσιο του μοντέλου BASINS, το οποίο δημιούργησε η EPA (Environmental Protection Agency) στην προσπάθεια της να δημιουργήσει ένα εργαλείο που να βοηθήσει τις Πολιτείες να αξιολογήσουν το Μέγιστο Ολικό Ημερήσιο Φορτίο κάθε λεκάνης απορροής. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε η νέα έκδοση (2007) του μοντέλου BASINS 4. Το μοντέλο BASINS 4 επιτρέπει την υποδιαίρεση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες, έτσι ώστε η υδρολογική προσομοίωση του συνόλου της λεκάνης απορροής να μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Απαραίτητες γεωγραφικές πληροφορίες οι οποίες εισήχθησαν με τη βοήθεια του GIS στο μοντέλο BASINS 4 ήταν η λεκάνη απορροής, οι υπολεκάνες, το υδρογραφικό δίκτυο, οι χρήσεις γης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε μορφή που καθορίζεται από τα εγχειρίδια χρήσης του μοντέλου. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη χωρίστηκε σε έξι υπολεκάνες (SWS1-SWS6) όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 4.18. Η επιλογή αυτών των 6 υπολεκάνων βασίστηκε στα ομοιόμορφα υδρολογικά, τοπογραφικά, γεωλογικά και κωροταξικά χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 4.4, παρουσιάζονται τα κύρια τοπογραφικά χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης. Οι παραπάνω

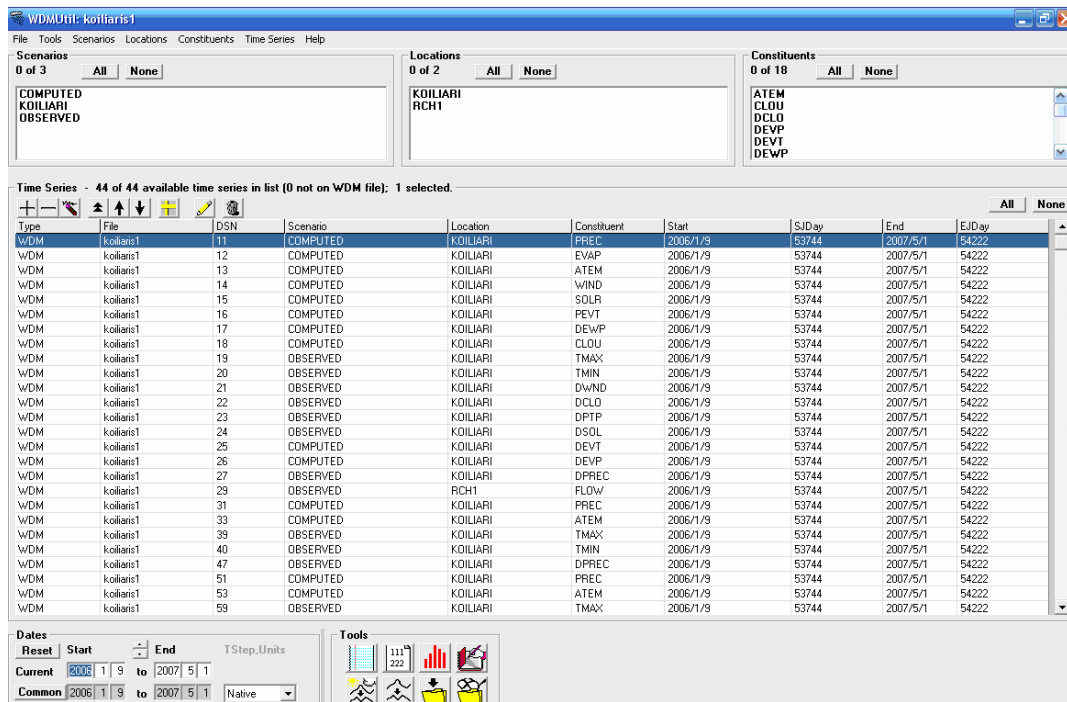
πληροφορίες για κάθε υπολεκάνη μετατρέπονται σε αρχεία εισόδου για το μοντέλο BASINS 4, το οποίο δημιουργεί του φακέλους δεδομένων σε μορφή που απαιτείται από το υδρολογικό μοντέλο HSPF. Επιπρόσθετα όπως αναφέραμε και παραπάνω μέσω του υπομοντέλου Watershed Data Management (WDM) γίνεται η εισαγωγή όλων των μετεωρολογικών χρονοσειρών που απαιτούνται για την εκτέλεση του μοντέλου HSPF (Εικόνα 4.19).



Εικόνα 4. 18. Οι έξι υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 4. 4. Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης.

Παράμετρος	SWS 1	SWS 2	SWS 3	SWS 4	SWS 5	SWS 6
Εμβαδό υπολεκάνης (SWS) Km ²	3.88	8.99	6.75	17.08	33.101	51.054
Μέσο υψόμετρο (m)	110	270	180	345	626	834
Μήκος κύριου υδατορεύματος (m)	3164	1559	3168	4200	5746	10049
Μέση κλίση (%)	0.006	0.0064	0.012	0.048	0.127	0.2



Εικόνα 4. 19. Υπομοντέλο WDM και οι μετεωρολογικές χρονοσειρές.

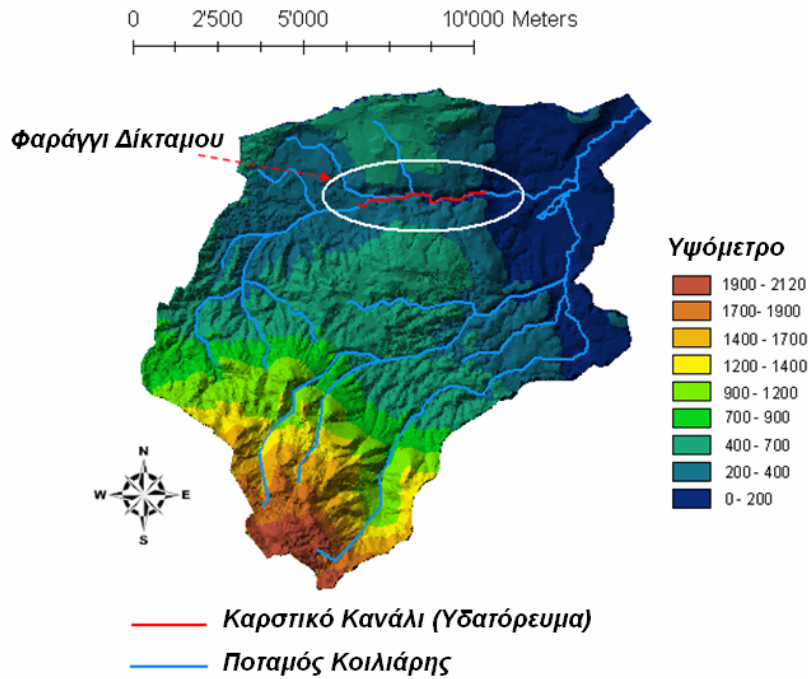
Για κάθε υπολεκάνη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές χρονοσειρές όσον αφορά τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση. Πιο συγκεκριμένα βρέθηκε το μέσο υψόμετρο κάθε υπολεκάνης και με βάση την υψομετρική μέθοδο (Τσακίρης, 1995) προσδιορίστηκε η ημερήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία για την κάθε υπολεκάνη. Τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε αφορούσαν: τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα ανέμου, τη βροχόπτωση, τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, και την εξάτμιση. Η εξάτμιση υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman με την εισαγωγή των κατάλληλων δεδομένων (ημερήσια βροχόπτωση, σχετική ηλιοφάνεια, σχετική υγρασία, θερμοκρασία κ.α) στο πρόγραμμα WDM. Όλα τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα είχαν ωριαίο χρονικό βήμα, όπως απαιτείται από το HSPF, για την ακριβή προσομοίωση των γεγονότων βροχής (Bicknell et al., 1993). Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για όλες τις υπολεκάνες εισήχθησαν στο μοντέλο HSPF μέσω του BASINS 4.

Επίσης η χρονοσειρά της παροχής (καρστική απορροή – εκφόρτιση) από τις πηγές του Στύλου, εισήχθη ως αρχείο εισόδου στον κώδικα του μοντέλου HSPF (αρχείου UCI – User Control Input file), προκειμένου έτσι να συνηυπολογιστεί στην τελική απορροή επιφανειακή και υπόγεια του μοντέλου HSPF.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του μοντέλου HSPF είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να προσομοιώσει την παροχή κατά μήκος καρστικών καναλιών-υδατορευμάτων, όπου σημαντικές ποσότητες ύδατος χάνονται. Το τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη που βρίσκεται κατά μήκος του φαράγγιου Δίκταμος (Εικόνα 4.20) έχει καρστική γεωμορφολογία. Έτσι, η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής κατά μήκος του συγκεκριμένου καρστικού υδατορεύματος, είναι ιδιαίτερα δύσκολη με τη χρήση μόνο του υδρολογικού μοντέλου HSPF. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών-υδατορευμάτων.

4.9. ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

Τα δεδομένα παροχής στο σημείο εισόδου (entrance-inflow) και στο σημείο εξόδου (exit-outflow) του φαράγγιου Δίκταμος (Diktamos Gorge)-(υπολεκάνη SWS 4) συλλέχτηκαν – καταγραφικά από τους δυο τηλεμετρικού υδρομετρικούς σταθμούς H3 (Φαράγγι) και H2 (Στύλος), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην είσοδο και έξοδο του φαράγγιου, αντίστοιχα (Εικόνα 4.20). Τα καταγραφόμενα δεδομένα παροχής εισόδου και εξόδου στο φαράγγι αφορούσαν την περίοδο 01/07/2007 - 31/8/2008.



Εικόνα 4. 20. Το καρστικό κανάλι (Φαράγγι Δίκταμος – SWS4).

Η εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.4 (Καρστικό μοντέλο) τροποποιήθηκε και εφαρμόστηκε για το καρστικό υδατόρευμα, ως ακολούθως:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + (P \times A_r) - (L_{oss} \times A_r), \quad (4.31)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + (P \times A_r) - (I + E) \times A_r, \quad (4.32)$$

Όπου:

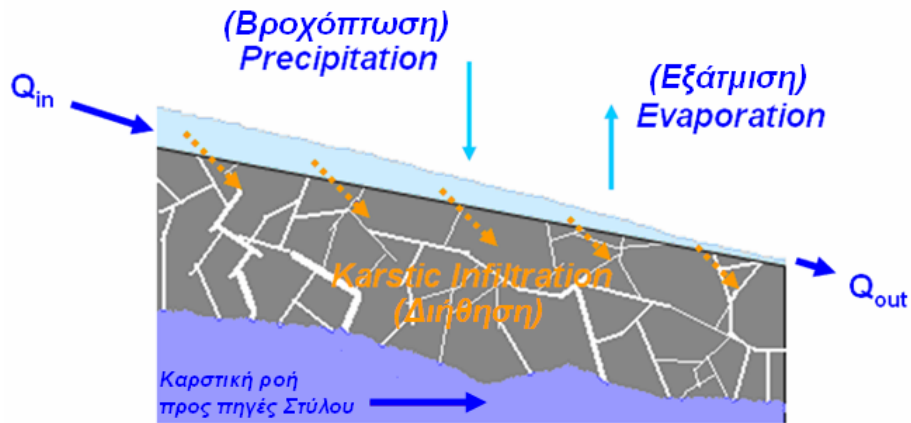
$$\frac{dV}{dt} = \text{Ρυθμός μεταβολής του όγκου νερού (m}^3/\text{day)},$$

Q_{in} και Q_{out} = Παροχή εισόδου και εξόδου (m³/day) από SWS 4, αντίστοιχα,

$$P = \text{Η βροχόπτωση (m)},$$

A_r = Περιοχή – εμβαδό που καταλαμβάνει το καρστικό κανάλι (m²), και

L_{oss} = Οι απώλειες ύδατος κατά μήκος του καρστικού καναλιού, εκφράζονται με τη διήθηση [infiltration (I)] και την εξάτμιση [evaporation (E)], (Εικόνα 4.21).



Εικόνα 4. 21. 2-D αναπαράσταση του υδρολογικού ισοζυγίου στο καρστικό κανάλι - υδατόρευμα (Φαράγγι Δίκταμος).

Καθώς ο ρυθμός μεταβολής του όγκου ύδατος, κατά μήκος του καρστικού καναλιού είναι μηδενικός (θεωρώντας σταθερές συνθήκες για κάθε ωριαίο χρονικό βήμα), η Εξίσωση (4.32) μπορεί να γραφεί ως:

$$Q_{out} = Q_{in} + (P \times A_r) - (I + E) \times A_r . \quad (4.33)$$

Το εμβαδό του καρστικού καναλιού, εκτιμήθηκε στα 105.000 m² (4200 m × 25 m).

Η εξάτμιση προσδιορίστηκε με την χρήση της εμπειρικής εξίσωσης του Penman (1959):

$$E = 1.63 \times 10^{-9} \times (0.93 + U_{wind}) \times (e_s - e_0) , \quad (4.34)$$

Όπου:

E = Η εξάτμιση (cm/day),

U_{wind} = Ταχύτητα ανέμου (m/day),

e_s = Η κορεσμένη τάση ατμών στην επιφάνεια του ύδατος (hPa), και

e_0 = Η πραγματική τάση ατμών στον αέρα (hPa).

Ο ρυθμός διήθησης κατά μήκος του καρστικού καναλιού, υπολογίζεται από την εμπειρική εξίσωση του Kostiaikov (1932):

$$I = B \times t^{-n}, \quad (4.35)$$

Όπου:

I = Η διήθηση (cm),

B = Kostiakon's χρονικός συντελεστής [time coefficient term (cm/day)],

n = Kostiakon's χρονικός εκθέτης [time exponent term (αδιάστατος)], και

t = χρόνος προσομοίωσης (day).

Με βάση την Εξίσωση (4.35), όταν $t \rightarrow 0$, $I \rightarrow \infty$ και όταν $t \rightarrow \infty$, $I \rightarrow 0$.

Οι παράμετροι B και n στην Εξίσωση (4.35) καθορίστηκαν μέσω βελτιστοποίησης με την τεχνική της μη γραμμικής παλινδρόμησης (Μη γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα) στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ο κώδικας βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήσαμε ήταν ο ακόλουθος:

```
>> global optimization
fileName = uigetfile('*.*txt');
% tt = dates, A = parameter
[tt,A] = textread(fileName,'%f%f');
L= length(tt);

g = inline('beta(1)*tt.^(-beta(2))','beta','tt');

betafit = nlinfit(tt,A,g,[1,1]);

Bfit = betafit(1)
nfit = betafit(2)
Bfit = 0.0039
nfit = -1.2105
```

Με το συνδυασμό των Εξισώσεων (4.33), (4.34) και (4.35) προκύπτει η τελική εξίσωση, που περιγράφει το ισοζύγιο των υδρολογικών απωλειών κατά μήκος του καρστικού καναλιού:

$$Q_{out} = Q_{in} + (P \times A_r) - (3.9 \times 10^{-3} \times t^{1.2105} + 1.63 \times 10^{-9} \times (0.93 + U_{wind}) \times (e_s - e_0)) \times A_r \quad (4.36)$$

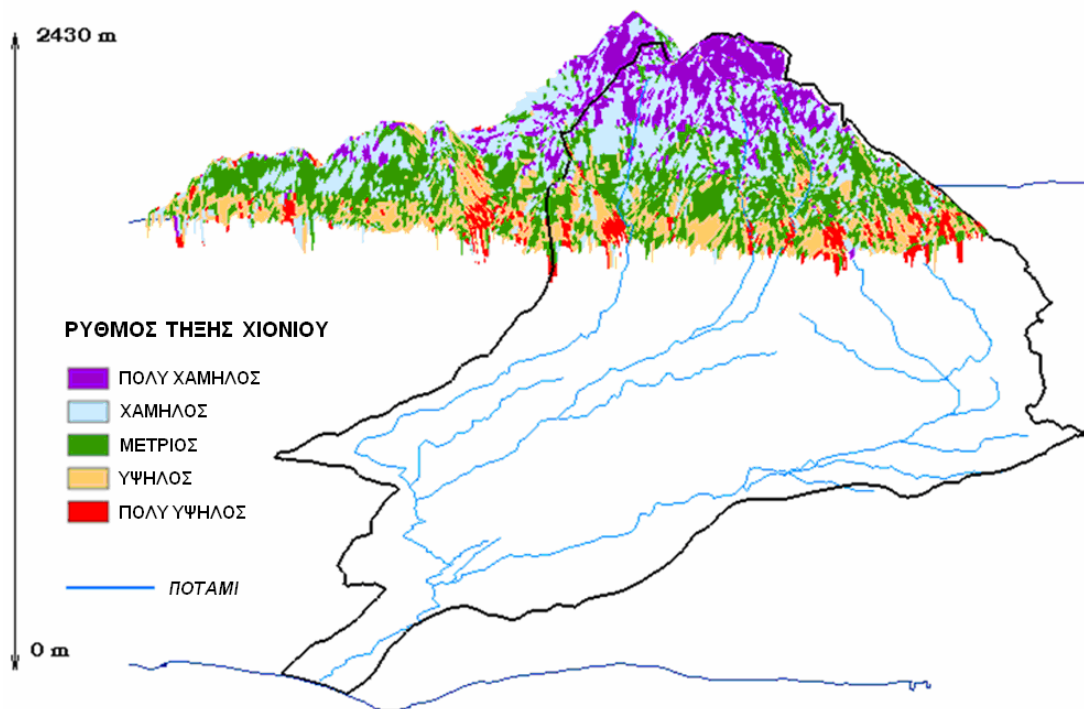
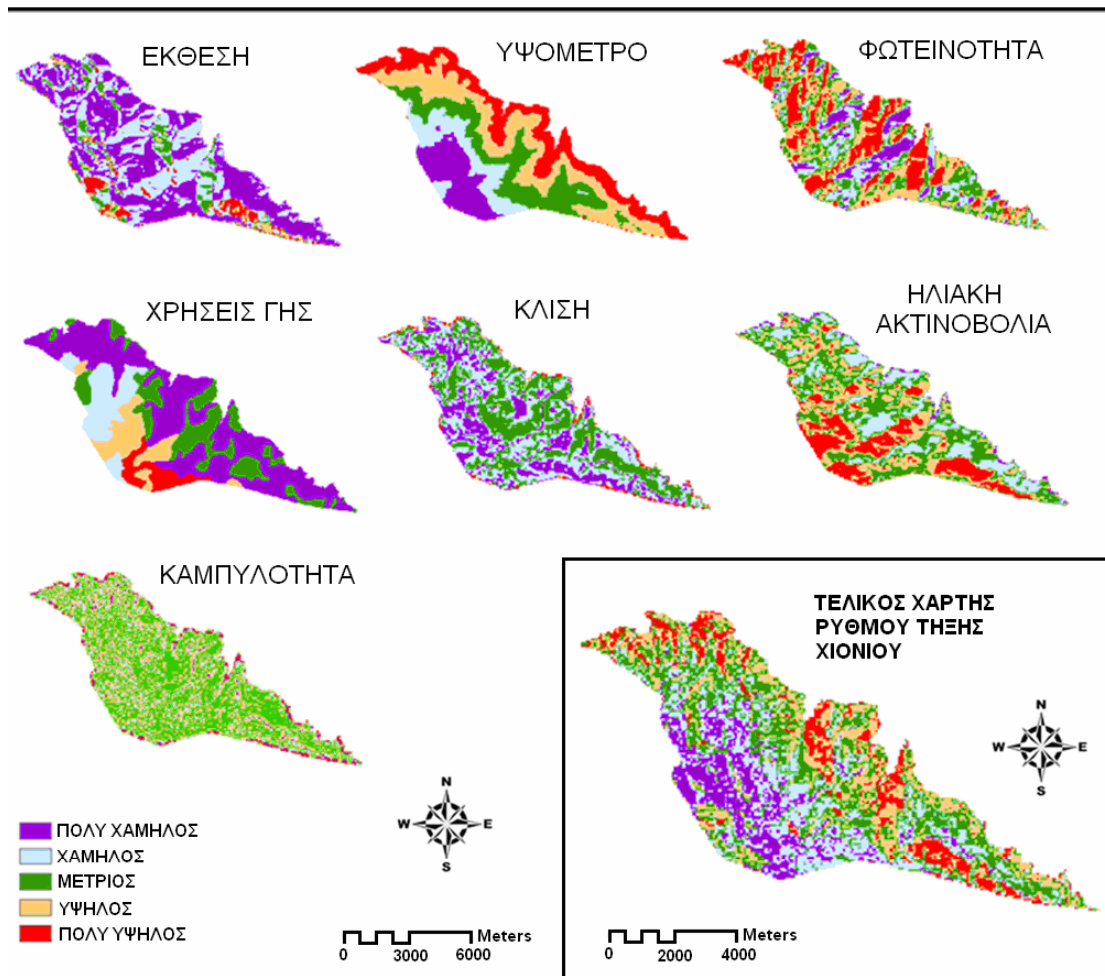
4.10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ –ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.10.1. Μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου ρυθμού τήξης χιονιού - GIS και καρστικό μοντέλο

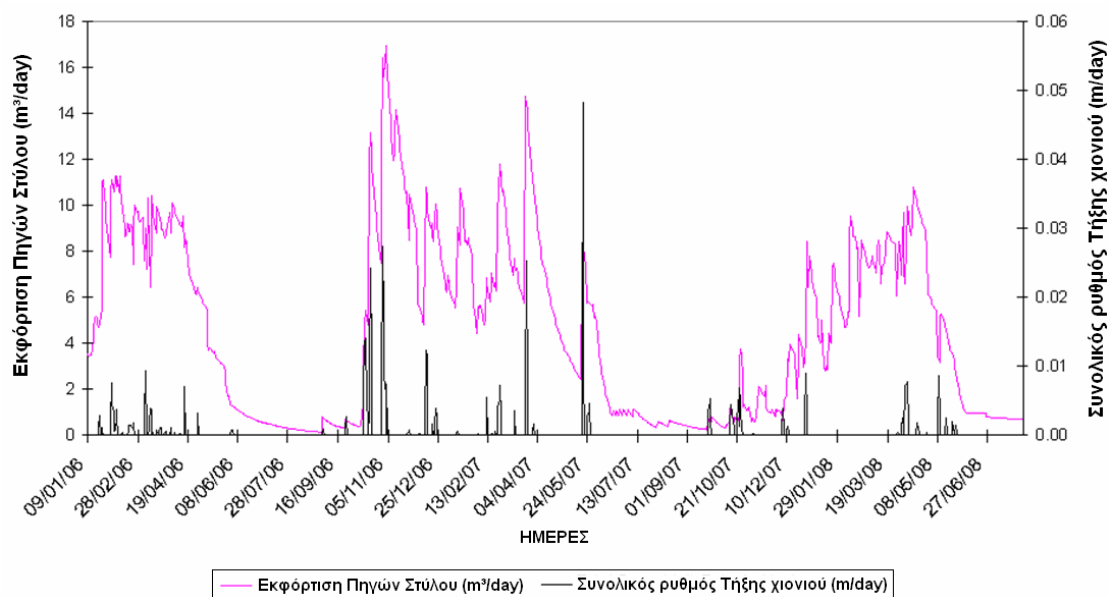
Η εκτειταμένη καρστική περιοχή που συνεισφέρει στην εκφόρτιση των πηγών του Στύλου, εκτιμήθηκε στα 107 km². Η Εικόνα 4.22 περιγράφει τους χάρτες ρυθμού τήξης χιονιού για καθένα από τους επτά παράγοντες που επιδρούν στην τήξη του χιονιού και τον τελικό χωρικό χάρτη ρυθμού τήξης χιονιού σε 2-D και 3-D. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράγοντες που επιδρούν στην τήξη του χιονιού, αναφέρονται μόνο στις περιοχές όπου υπάρχει αξιοσημείωτο ποσοστό χιονόπτωσης (υψόμετρο άνω των 900 m). Ο Πίνακας 4.5 περιγράφει τις περιοχές (εμβαδό) και τα μέσα υψόμετρα των έξι ζωνών της καρστικής περιοχής. Οι πληροφορίες που αντλούνται από τον Πίνακα 4.5, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στην πλατφόρμα προσομοίωσης μορφής GUI (ενοποιημένο καρστικό μοντέλο και μοντέλο ρυθμού τήξης χιονιού). Προσδιορίζονται έτσι η τελική εκφόρτιση από τις πηγές του Στύλου ως αποτέλεσμα τους αθροίσματος των έξι επιμέρους εκφορτίσεων από τις έξι καρστικές περιοχές, εντός και εκτός λεκάνης απορροής. Η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της παραπάνω μοντελοποίησης περιγράφεται στην Εικόνα 4.23.

Πίνακας 4. 5. Χαρακτηριστικά των έξι καρστικών ζωνών.

Καρστική περιοχή ≥ 900m Υψόμετρο	Ζώνες	Μέσο Υψόμετρο (m)	Περιοχή (m ²)
<i>Πολύ Υψηλός Ρυθμός Τήξης Χιονιού</i>	1	1480	9,391,250.365
<i>Υψηλός Ρυθμός Τήξης Χιονιού</i>	2	1574	23,015,342.03
<i>Μέτριος Ρυθμός Τήξης Χιονιού</i>	3	1630	29,013,194.17
<i>Χαμηλός Ρυθμός Τήξης Χιονιού</i>	4	1737	31,304,156.63
<i>Πολύ Χαμηλός Ρυθμός Τήξης Χιονιού</i>	5	1894	15,554,472.25
Καρστική περιοχή < 900m Υψόμετρο	6	620	59,405,635.43



Εικόνα 4. 22. Χάρτες ρυθμού τήξης χιονιού για κάθε παράγοντα και ο τελικός 2-D - 3-D χωρικός χάρτης ρυθμού τήξης χιονιού.

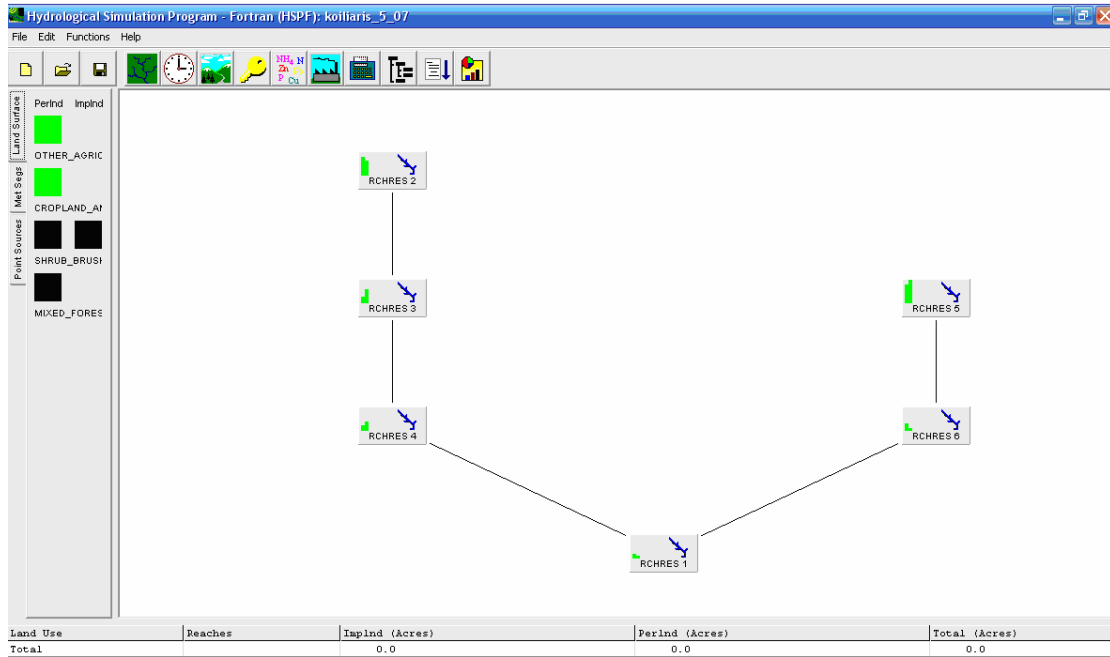


Εικόνα 4. 23. Ημερήσια εκφόρτιση από τις πηγές του Στύλου και ο αντίστοιχος συνολικός ρυθμός τήξης του χιονιού.

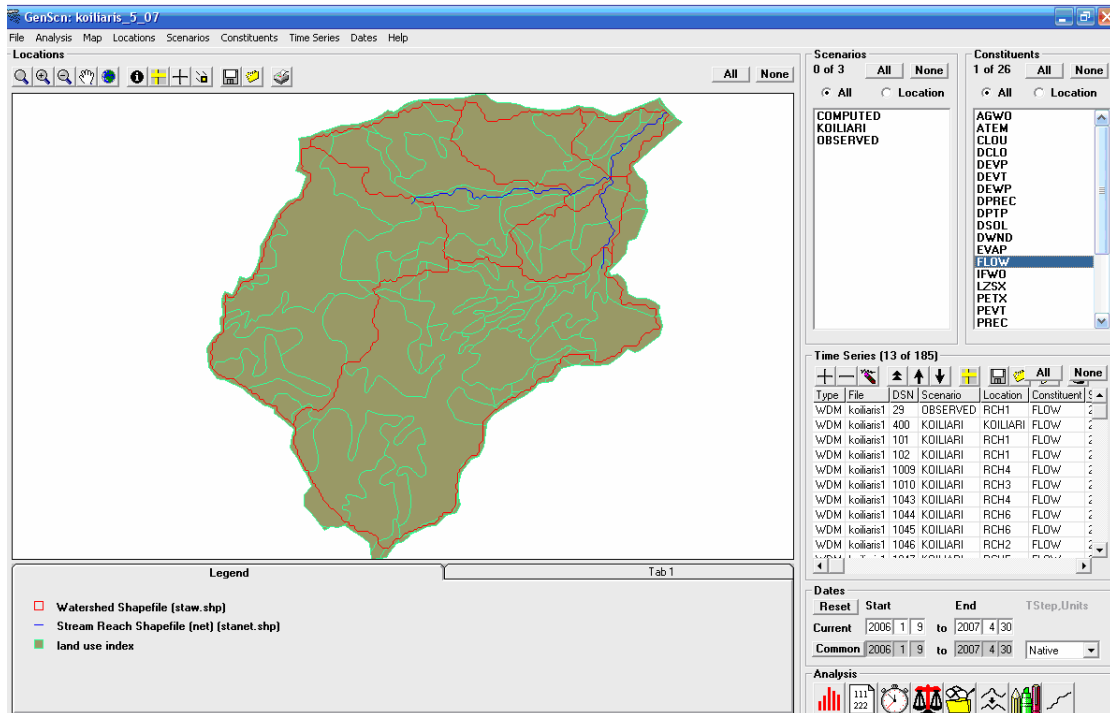
4.10.2. HSPF - Εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικού καναλιού

Βαθμονόμηση και Επαλήθευση - (Calibration and Validation)

Η παρούσα υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τη χρονική περίοδο 09/01/2006 - 31/08/2008. Γι' αυτό το χρονικό διάστημα, ωριαία δεδομένα παροχής ήταν διαθέσιμα από τον υδρομετρικό σταθμό της υπολεκάνης SWS 1 (H1). Για την χρονική περίοδο 01/07/2007 - 31/08/2008, ωριαία δεδομένα παροχής ήταν επίσης διαθέσιμα από τους υδρομετρικούς σταθμούς (H2) και (H3), στην είσοδο και την έξοδο της υπολεκάνης SWS 4, αντίστοιχα. Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου εισήχθησαν στο υδρολογικό μοντέλο HSPF και ακολούθησε η εκτέλεση - προσομοίωση του μοντέλου Εικόνα 4.24. Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης ακολούθησε η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω του μοντέλου HSPF εισήχθησαν στο μοντέλο BASINS 4 για την περαιτέρω ανάλυση τους, μέσω του υπομοντέλου Scenario Generator (GenScn)., Εικόνα 4.25.



Εικόνα 4. 24. Διαίρεση της λεκάνης σε 6 υπολεκάνες και προσομοίωση με το μοντέλο HSPF.



Εικόνα 4. 25. Υπομοντέλο (GenScn) και ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου HSPF.

Η βαθμονόμηση (calibration) είναι μια συστηματική -επαναληπτική διαδικασία προσαρμογής των τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων του μοντέλου, έτσι ώστε οι προσημειωμένες αποκρίσεις του μοντέλου να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές (Albek et al., 2004).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η βαθμονόμηση των συγκεκριμένων παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε εμπειρικά (manually) για το χρονικό διάστημα 01/09/2007 - 31/08/2008. Ενώ η επαλήθευση (validation) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα από 09/01/2006 έως 31/08/2007. Ο όρος επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσημειώνουν. Οι παράμετροι του μοντέλου HSPF, που χρησιμοποιήθηκαν για βαθμονόμηση (Kim et al., 2007), ήταν οι εξής:

α) Η φαινόμενη αποθήκευση της κατώτερης εδαφικής ζώνης [the lower zone nominal soil moisture storage (LZSN)] που σχετίζεται τόσο με τη βροχόπτωση όσο και με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και είναι ίση με 1/8 της ετήσιας μέσης βροχόπτωσης. Αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου LZSN, μειώνεται η αιχμή της άμεσης επιφανειακής απορροής.

β) Η φαινόμενη αποθήκευση της ανώτερης εδαφικής ζώνης [the nominal upper zone soil moisture storage (UZSN)] σχετίζεται με τη μορφολογία του αναγλύφου, την τοπογραφία. Αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου UZSN, αυξάνουμε την ποσότητα νερού που παραμένει στην ανώτερη ζώνη και δύναται να εξατμιστεί (ET), έτσι μειώνεται η άμεση επιφανειακή απορροή. Μειώνοντας αντίστοιχα το συντελεστή έχουμε ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα.

γ) Ο ρυθμός διήθησης [the mean soil infiltration rate (INFLT)], είναι η παράμετρος που ρυθμίζει την κατανομή του νερού της βροχής – μετά την κάλυψη των αναγκών της συγκράτησης από τη βλάστηση, στην επιφάνεια, υποεπιφανειακά και στα διάφορα τμήματα αποθήκευσης. Υψηλές τιμές INFLT δημιουργούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού στη χαμηλή ζώνη και στον υπόγειο υδροφόρα με αποτέλεσμα την αύξηση της βασικής απορροής στο ποτάμι. Αντίθετα χαμηλές τιμές INFLT δημιουργούν αυξημένη άμεση επιφανειακή

απορροή. Ο ρυθμός διήθησης είναι συνάρτηση των εδαφικών χαρακτηριστικών και η διακύμανση των τιμών έχουν άμεση σχέση με την κλίμακα SCS Hydrologic Soil Groups (EPA Basins Technical Note 6., 2000) όπως φαίνεται παρακάτω:

SCS	Τυπικές τιμές INFILT		Απορροή
	(in/hr)	(mm/hr)	
A	0.4 - 1.0	10.0 - 25.0	Χαμηλή
B	0.1 - 0.4	2.5 - 10.0	Μέτρια
C	0.05 - 0.1	1.25 - 2.5	Μέτρια -Υψηλή
D	0.01 - 0.05	0.25 - 1.25	Υψηλή

Στην Α κατηγορία εμπεριέχονται εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη.

Στη Β κατηγορία εμπεριέχονται εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα, που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφριάς σύστασης εδάφη.

Στη C κατηγορία εμπεριέχονται εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα, που αποτελούνται από μέσης μέχρι βαριάς σύστασης εδάφη.

Τέλος, στη D κατηγορία εμπεριέχονται εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπογείου νερού ή με αδιαπέρατο στρώμα.

δ) Ο δείκτης εξατμισοδιαπνοής της κατώτερης εδαφικής ζώνης [the lower zone of evapotranspiration (LZETP)], επηρεάζει την εξατμισοδιαπνοή της χαμηλότερης ζώνης, η οποία αντιπροσωπεύει την αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στη ριζόσφαιρα του εδαφικού προφίλ. Η παράμετρος LZETP ουσιαστικά είναι ένας καλλιεργητικός συντελεστής ‘ crop coefficient ’, ο οποίος κυμαίνεται από 0.2 -0.9 .

ε) Ο συντελεστής στείρευσης βασικής ροής [the groundwater recession flow parameters (KVARY)] μετατρέπει τη ροή του υπόγειου νερού προς το ποτάμι σε μη-γραμμική. Τυπικές τιμές του παραπάνω συντελεστή κυμαίνονται από 0 έως 3 in (0 - 76 mm), (EPA Basins Technical Note 6., 2000).

Η διακύμανση των τιμών των παραπάνω παραμέτρων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4. 6. Διακύμανση τιμών παραμέτρων βαθμονόμησης του μοντέλου HSPF στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη [SWS 1 - SWS 6].

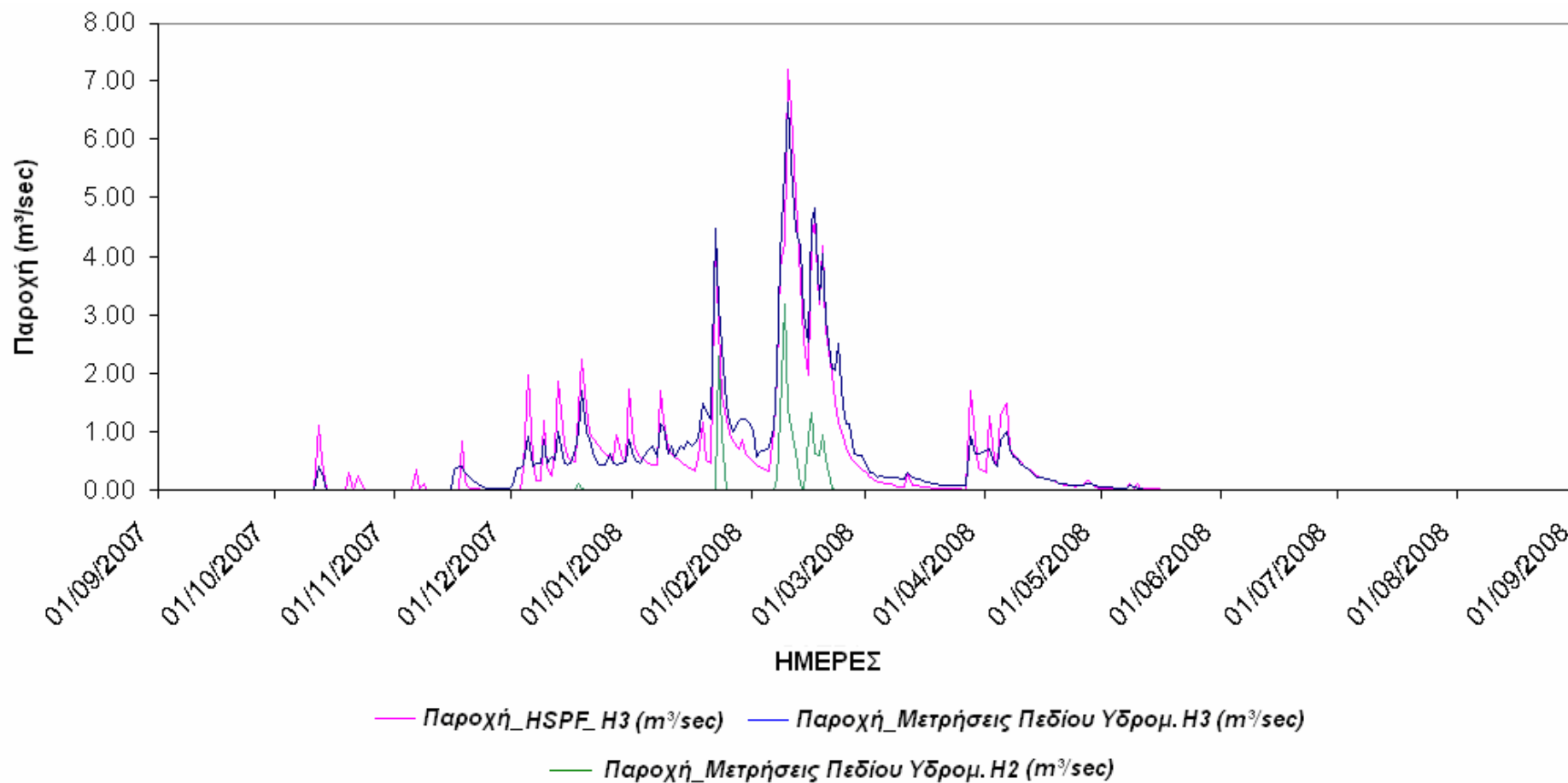
	LZSN	INFILT	KVARY	UZSN	LZETP
Διακύμανση	3-15 (in)	0.05-0.5 (in/hr)	0.1-2 (1/in)	0.4 -2 (in)	
τιμών	76-381 (mm)	1.27-12.7 (mm/hr)	2.54-50.8 (1/mm)	7.6-17.7 (mm)	0.3-0.7

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία της βαθμονόμησης, ήταν ο υπολογισμός των υδρολογικών παραμέτρων για την υπολεκάνη SWS 5. Τα αποτελέσματα της παροχής στην έξοδο της υπολεκάνης SWS 5, τα οποία ελήφθησαν από το HSPF συγκρίνονται με τα δεδομένα πεδίου (μετρήσεις παροχής στον υδρομετρικό σταθμό H3) (Εικόνα 4.26).

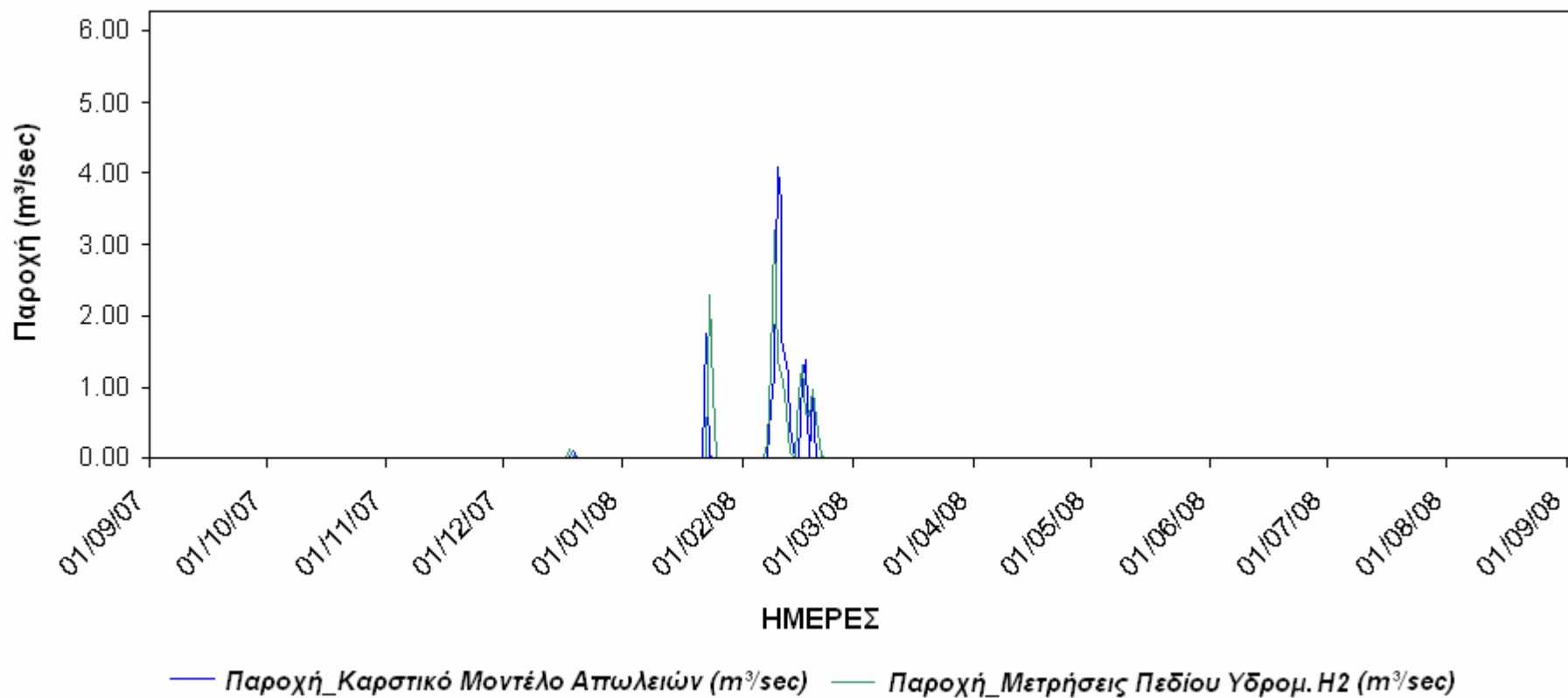
Επίσης τα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά την εφαρμογή του εμπειρικού μοντέλου υδρολογικών απωλειών (Εξίσωση 4.36) για τα υδρολογικά έτη 2007 - 2008 επαληθεύουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τα δεδομένα του πεδίου (Εικόνα 4.27).

Τα δεδομένα παροχής στην έξοδο (outflow) του Φαραγγιού Δίκταμος (SWS 4) υπολογίστηκαν με την εφαρμογή του εμπειρικού καρστικού μοντέλου (hydrologic loss model) για ολόκληρη τη χρονική περίοδο προσομοίωσης (09/01/2006 - 31/8/2008) (Εικόνα 4.28). Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα εισόδου παροχής Q_{in} στην Εξίσωση (4.36) είναι οι βαθμονομημένες τιμές παροχής του μοντέλου HSPF στην έξοδο της υπολεκάνης SWS 5.

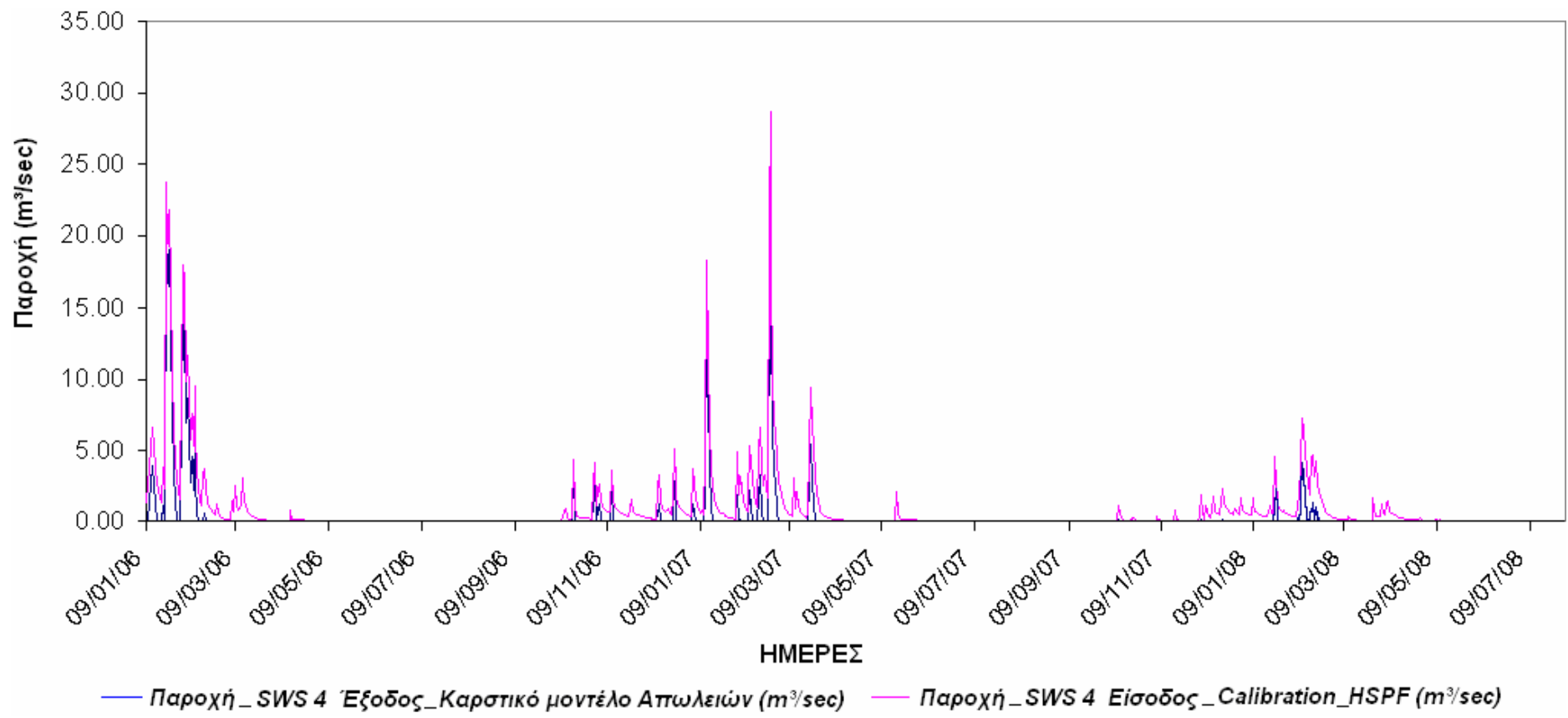
Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ετήσια παροχή στο σημείο εισόδου του Φαραγγιού Δίκταμος (SWS 4) εκτιμήθηκε στα 12.11 εκατομμύρια $m^3/year$. Επίσης η ετήσια παροχή στο σημείο εξόδου ήταν 1.47 εκατομμύρια $m^3/year$ (12.14%) και οι υδρολογικές απώλειες κατά μήκος του καρστικού καναλιού (Φαράγγι Δίκταμος) ήταν 10.64 εκατομμύρια $m^3/year$ (87.86%).



Εικόνα 4. 26. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου (SWS 5 – SWS 4) και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 5).



Εικόνα 4. 27. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 4).



Εικόνα 4. 28. Αποτελέσματα ημερήσιας παροχής μοντέλου (Είσοδος - Έξοδος SWS 4).

4.10.3. Τελικά αποτελέσματα και αξιοπιστία του εννοιολογικού μοντέλου (Final results and the reliability of the conceptual model)

Το εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκους του καρστικού καναλιού δημιουργήθηκε για να υπολογίσει την χρονοσειρά παροχής Q_{out} στο σημείο εξόδου του Φαραγγιού Δίκταμος [Diktamos Gorge (καρστικό κανάλι)]. Κατά την αφαίρεση της παραπάνω παροχής (χρονοσειρά) από την βαθμονομημένη παροχή εξόδου του HSPF στην υπολεκάνη SWS 5 υπολογίζεται η αντίστοιχη χρονοσειρά παροχής που σχετίζεται με τις υδρολογικές απώλειες (Q') κατά μήκος του καρστικού καναλιού. Οι παραπάνω απώλειες (Q') θα πρέπει να αφαιρεθούν από τον τελικό υπολογισμό της παροχής, μέσω του μοντέλου HSPF, στο σημείο εξόδου της υπολεκάνης SWS 4. Η αφαίρεση των τιμών της χρονοσειράς απωλειών παροχής (Q') πραγματοποιείται μέσω του κωδικά του μοντέλου HSPF (αρχείου UCI- User Control Input file).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου HSPF με αυτά του πεδίου (μετρήσεις παροχής) για την υπολεκάνη SWS 1 περιγράφεται την Εικόνα 4.29. Με βάση τα τελικά αποτελέσματα του ενιαίου πλαισίου μοντελοποίησης, η μέση ετήσια παροχή στην υπολεκάνη SWS 1 εκτιμήθηκε στα $5.85 \text{ m}^3/\text{sec}$ και προσομοιώνει με ακρίβεια τις παρατηρηθείσες τιμές που φτάνουν τα $6.07 \text{ m}^3/\text{sec}$ (σφάλμα τάξης 3.62%).

Επίσης εκτιμήθηκε το ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο του καρστικού συστήματος και της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης όπως περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

Η ετήσια παροχή στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής προσέγγισε τα 136.29 εκατομμύρια m^3/year . Η συνεισφερόμενη καρστική απορροή, μέσω των πηγών του Στύλου, εκτιμήθηκε στα 109.059 εκατομμύρια m^3/year (80%), ενώ η επιφανειακή απορροή μέσω της λεκάνης του Κοιλιάρη υπολογίστηκε στα 31.5 εκατομμύρια m^3/year . Αφαιρώντας τις απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής (4.20 εκατομμύρια m^3/year), η συνεισφερόμενη ποσότητα επιφανειακής απορροής που καταλήγει στο υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Κοιλιάρη προσδιορίστηκε στα 27.3 εκατομμύρια m^3/year (20%). Επίσης η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης που εισέρχεται στο εκτεταμένο καρστικό σύστημα εκτιμήθηκε στα 269 εκατομμύρια m^3/year , ενώ η ποσότητα του ύδατος που δημιουργείται κατά την τήξη του χιονιού στον εκτεταμένο καρστικό όγκο της

λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη εκτιμάται στα 30.2 εκατομμύρια $m^3/year$.

Προκειμένου να συγκριθούν τα δεδομένα πεδίου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 4.29), χρησιμοποιήθηκε το Root Mean Squared Error (RMSE), σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n R_i^2},$$

Όπου:

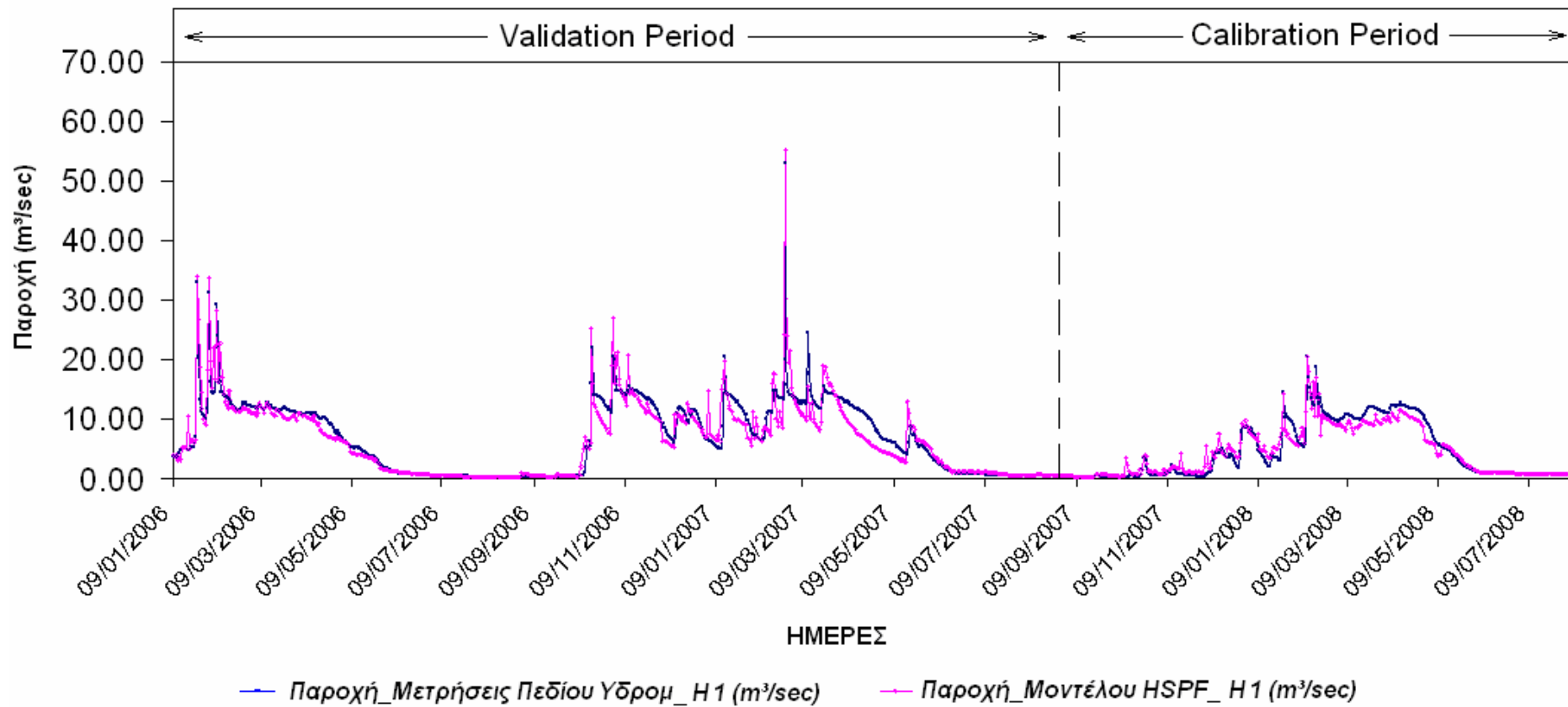
R_i = είναι η διαφορά μεταξύ των δεδομένων πεδίου και των αντίστοιχων τιμών του μοντέλου προσαρμογής για $i=1, \dots, n$.

Τιμές του δείκτη RMSE κοντά στην τιμή μηδέν καταδεικνύουν τέλεια προσαρμογή, ενώ η βαθμονόμηση του μοντέλου θεωρείται ικανοποιητική μόνον όταν $RMSE < 3.0$ (Coulibaly and Baldwin, 2005).

Εκτός του παραπάνω δείκτη σύγκρισης τιμών πεδίου και μοντέλου χρησιμοποιήθηκε και ο δείκτης Normalized Root Mean Squared, ο οποίος προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$NormalizedRMSE = \frac{RMSE}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}}.$$

Ο δείκτης Normalized Root Mean Squared εκφράζεται σαν ποσοστό, και είναι πιο αντιπροσωπευτικό μέτρο για τη σύγκριση από ότι ο δείκτης RMSE, μια και λαμβάνει υπόψη του την έκταση (range) των τιμών του πεδίου. Για παράδειγμα μια τιμή RMSE ίση με 1.5 δείχνει μια μη ακριβή βαθμονόμηση ενός μοντέλου, όταν οι παρατηρούμενες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10 και 20, αλλά από την άλλη υποδηλώνει μια εξαιρετική βαθμονόμηση του μοντέλου όταν οι παρατηρούμενες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 100 και 200 (Kourgialas et al., 2010). Αυτό αποδεικνύεται από την εφαρμογή του δείκτη Normalized Root Mean Squared, όπου στην πρώτη περίπτωση είναι 15%, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι 1.5%.



Εικόνα 4. 29. Ημερήσια παροχή μετρήσεων πεδίου και αποτελέσματα μοντέλου (SWS 1).

Εκτός των δυο προαναφερθέντων δεικτών, επίσης χρησιμοποιήσαμε το συντελεστή προσδιορισμού (R^2), ο συγκεκριμένος συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1 με τις υψηλότερες τιμές να δίνουν καλύτερη προσομοίωση με τις τιμές του πεδίου. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση (Kim S M., 2007):

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\left[\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου θεωρείται ικανοποιητική όταν $R^2 \geq 0.80$ (Coulibaly and Baldwin, 2005).

Στην περίπτωση της παρούσας μοντελοποίησης, οι τιμές των παραπάνω δεικτών για την περίοδο της βαθμονόμησης ήταν: $R^2 = 0.92$, $RMSE = 1.19$ και $Normalized RMSE = 0.00167\%$. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το Kolmogorov-Smirnov στατιστικό τεστ (K-S test) για να συγκρίνει την αθροιστική κατανομή των 2 χρονοσειρών (μοντέλου και μετρήσεων πεδίου) (Eadie et al., 1971).

Η μέγιστη απόκλιση στην αθροιστική κατανομή (K-S test) για την περίοδο βαθμονόμησης ήταν ίση με $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient) = 0.96.

Εκτός των παραπάνω, υπολογίστηκε ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash – Sutcliffe (NS index), ο οποίος είναι μέτρο της ποιότητας του μοντέλου σε σχέση με την αντιπροσωπευτικότητα της διακύμανσης των δεδομένων (Nash and Sutcliffe, 1970). Η τιμή 1 για το συντελεστή NS index δηλώνει ότι η αντιπροσωπευτικότητα είναι τέλεια. Η μαθηματική έκφραση του συντελεστή Nash – Sutcliffe (NS index) εκφράζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$NS \text{ index} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

Όπου:

Q_0 = Η παροχή πεδίου (χρονοσειρά μετρήσεων),

Q_m = Η παροχή που προκύπτει ως αποτέλεσμα από το μοντέλο, και

Q_0^t = Η παροχή πεδίου την χρονική στιγμή t .

Στην παρούσα υδρολογική προσομοίωση ο δείκτης NS index για την περίοδο της βαθμονόμησης ήταν ίσος με 0.91. Όλοι οι παραπάνω στατιστικοί παράμετροι καταδεικνύουν την πολύ καλή συμφωνία - συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και των μετρήσεων πεδίου.

Όσον αφορά τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης (validation time period). Οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες προσδιορίστηκαν ως εξής: $R^2 = 0.86$, $RMSE = 2.49$, $Normalized\ Root\ Mean\ Squared\ indicator = 0.00134\%$, $K-S\ test = 0.129\ m^3/s$, $Συντελεστής\ συσχέτισης\ (Correlation\ coefficient) = 0.94$ και τέλος ο $NS\ index = 0.87$.

Ανάλυση Ευαισθησίας

Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για να διαπιστωθεί η ευαισθησία των παραμέτρων βαθμονόμησης και κατά πόσον η μεταβολή αυτών επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σχέση με αυτά του πεδίου (Al-Abed et al., 2002). Για το λόγο αυτό οι διάφοροι παράμετροι που βαθμονομήθηκαν μεταβλήθηκαν κατά $\pm 10\%$.

Η μαθηματική έκφραση της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου περιγράφεται από το δείκτη S , σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$|S| = \frac{\frac{Q_{new} - Q_{calibrated}}{Q_{calibrated}}}{\frac{K_{new} - K_{calibrated}}{K_{calibrated}}},$$

Όπου

K_{new} , $K_{calibrated}$ είναι οι νέες και οι βαθμονομημένες τιμές της υδρολογικής παραμέτρου K του μοντέλου HSPF και Q_{new} , $Q_{calibrated}$ είναι οι τιμές προσομοίωσης για K_{new} και $K_{calibrated}$, αντίστοιχα.

Όσο πιο χαμηλή η τιμή του δείκτη S , τόσο πιο χαμηλή είναι η ευαισθησία της παραμέτρου K , στην αντίστοιχη μεταβολή. Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ο ρυθμός διήθησης [the mean soil infiltration rate] INFILT ($S = 0.00327$) εμφανίζεται ως η πιο ευαίσθητη παράμετρος, ακολουθούν οι [the nominal upper zone soil moisture storage] UZSN ($S = 0.00092$), [the lower zone nominal soil moisture] LZSN ($S = 0.00062$), [the lower zone of evapotranspiration] LZETP ($S = 0.00044$), και [the groundwater recession flow parameters] KVARY ($S = 0.00019$).

Αβεβαιότητα του δημιουργούμενου πλαισίου μοντελοποίησης

Η τελική παροχή προσομοίωσης δηλώνει ότι το προτεινόμενο πλαίσιο μοντελοποίησης για υδρολογική ανάλυση πολύπλοκων υδρογεωλογικά συστημάτων καλύπτει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό όλες τις υδρολογικές διεργασίες σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Οι βασικές αρχές ανάπτυξης αυτού του πλαισίου μοντελοποίησης βασίστηκε σε δεδομένα πεδίου στα σημεία εκείνα της λεκάνης απορροής, στα οποία παρατηρείται διασταύρωση – συνένωση διαφόρων γεωλογικών και μορφολογικών συστημάτων. Κάθε υπομοντέλο του πλαισίου μοντελοποίησης βαθμονομήθηκε με μοναδικά υδρολογικά δεδομένα με σκοπό να προσεγγιστεί η υδρολογική αστάθεια της απόκρισης του κάθε υποσυστήματος. Το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση, αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες – περίοδοι, πράγμα που διασφαλίζει ότι λαμβάνουμε τις σωστές απαντήσεις για τους σωστούς λόγους (Kirchner, 2006).

Επίσης αποτιμήθηκε με στατιστικούς όρους η πολύ καλή προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει την αβεβαιότητα που εκ φύσεως έχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και να επαληθεύσει τη μοναδικότητα των τιμών των προτεινόμενων παραμέτρων. Για παράδειγμα η παραμετροποίηση του καρστικού μοντέλου βασίστηκε σε γεωλογικά δεδομένα των δύο ειδών καρστικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης (Plakenkalt και Tripali limestones), επίσης για την υδρολογική ανάλυση της συμπεριφοράς των πηγών του Στύλου χρησιμοποιήθηκαν τεσσάρων χρόνων συνεχόμενα υδρολογικά δεδομένα. Επιπλέον η μοντελοποίηση των υδρολογικών απωλειών εντός του καρστικού καναλιού βασίστηκε στο συνδυασμό της εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου και της παραμετροποίησης της παροχής η οποία βαθμονομήθηκε με

συνεχόμενα δεδομένα παροχής για δύο χρόνια. Επίσης η παρούσα μελέτη προσεγγίζει πιο ρεαλιστικά το ρυθμό τήξης του χιονιού λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή της τήξης του χιονιού.

Η συνέπεια – συνοχή της απόκρισης του καρστικού συστήματος στο χρόνο μας κάνει σίγουρους για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς επίσης και της μοναδικότητας των παραμέτρων του μοντέλου. Επιπρόσθετα, η αξιοπιστία του HSPF εξετάστηκε και από τη συμπεριφορά των παραμέτρων του μοντέλου μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας. Η χαμηλή ευαισθησία (10% μεταβολή των παραμέτρων δημιουργεί < 0.3% αλλαγή στην προσαρμογή του μοντέλου) των παραμέτρων μοντελοποίησης υποδηλώνει ότι οι βαθμονομημένοι παράμετροι αντιπροσωπεύουν το τοπικό ελάχιστο (least local minima).

Με βάση τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι, σύνθετες γεωμορφολογικά περιοχές απαιτούν τη συνδυασμένη χρήση μοντέλων που να περιγράφουν – προσομοιώνουν τις διαφορετικές διαδικασίες των επιμέρους υδρολογικών συστημάτων, με τελικό σκοπό τη μείωση της αβεβαιότητας και την επιβεβαίωση της μοναδικότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

4.11. ΣΥΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός του συγκεκριμένου Κεφαλαίου ήταν η δημιουργία ενός ενιαίου πλαισίου μοντελοποίησης των υδρολογικών διαδικασιών σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, όπως είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η επιφανειακή όσο και η υπόγεια ροή σε ένα σύνθετο υδρολογικά περιβάλλον, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μοντέλων. Σε λεκάνες απορροής με καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο, η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και ο προσδιορισμός της συνολικής απορροής είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα. Για το λόγο αυτό, η ακριβής προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς τέτοιων πολύπλοκων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής, προσεγγίστηκε με το συνδυασμό του μοντέλου HSPF με μια πλατφόρμα προσομοίωσης μορφής GUI, (σε γλώσσα προγραμματισμού matlab). Η συγκεκριμένη πλατφόρμα, δημιουργήθηκε προκειμένου να ενσωματώσει τα δύο τμήματα του καρστικού μοντέλου Maillat και τη χωρική (GIS) κατανομή του ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο. Επίσης δημιουργήθηκε και ενσωματώθηκε στο

ενοποιημένο πακέτο μοντελοποίησης ένα εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών - υδατορευμάτων. Όπως αναμενόταν ο ρυθμός τήξης του χιονιού διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην τελική μορφή των υδρογραφημάτων και στη συμφωνία των υδρολογικών – πλημμυρικών αιχμών της προσομοίωσης με αυτών των δεδομένων πεδίου. Τα τελικά αποτελέσματα της μοντελοποίησης καταδεικνύουν μια πολύ ικανοποιητική προσομοίωση του ολοκληρωμένου πακέτου μοντελοποίησης με τα δεδομένα πεδίου.

Σε πολύπλοκες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, οι κλιματικές αλλαγές μπορούν να προκαλέσουν επικίνδυνα – extreme φαινόμενα όπως πλημμύρες και ξηρασίες. Ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία τέτοιων φαινομένων, είναι ο ρυθμός τήξης του χιονιού. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης το οποίο αναπτύχθηκε στο παρόν Κεφάλαιο, σε αντίθεση με άλλα ολοκληρωμένα υδρολογικά μοντέλα λαμβάνει υπόψη του όλες τις συνιστώσες που επηρεάζουν τη διαδικασία της τήξης του χιονιού. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο πλαίσιο μοντελοποίησης πέρα από όλες εκείνες τις παραμέτρους που επιδρούν στο ενεργειακό ισοζύγιο τήξης του χιονιού, λαμβάνει υπόψη του τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας των ορεινών όγκων. Αναλυτικότερα, με τη χρήση του GIS ενσωματώνονται οι επτά τοπογραφικοί παράγοντες οι οποίοι παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της τήξης του χιονιού. Αυτοί οι επτά παράγοντες είναι το υψόμετρο, η κλίση, η καμπυλότητα, η έκθεση, η φωτεινότητα, οι χρήσεις γης και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Συνοπτικά, η κύρια συνεισφορά του παρόντος Κεφαλαίου έγκειται στη δημιουργία ενός πακέτου μοντελοποίησης που συνδυάζει το υδρολογικό μοντέλο HSPF με το καρστικό μοντέλο Maillet, την ανάπτυξη ενός μοντέλου υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών- υδατορευμάτων και τη δημιουργία χωρικού μοντέλου ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο. Το συγκεκριμένο πακέτο μοντελοποίησης μπορεί να συνεισφέρει αποτελεσματικά στον τομέα της ορεινής υδρολογίας, προκειμένου έτσι να μελετηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια πολύπλοκες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε σύνθετα γεωμορφολογικά συστήματα. Ταυτόχρονα το παρόν πλαίσιο μοντελοποίησης μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο στην έγκαιρη πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων και στη γενικότερη ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ
ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ
&
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ
ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ**

5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Οι πλημμύρες που προέρχονται από την υπερχειλίση ποτάμιων συστημάτων ποικίλλουν σημαντικά ως προς το μέγεθος και τη διάρκειά τους. Στην περίπτωση μεγάλων ποταμών οι πλημμύρες μπορεί να εμφανιστούν αρκετό χρόνο μετά τη βροχόπτωση και να διαρκέσουν ημέρες, εβδομάδες ή ακόμη και μήνες. Σε μικρότερα όμως ποτάμια συστήματα, όπου η αντίστοιχη λεκάνη απορροής παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο με λεπτό, γυμνό ή αδιαπέραστο έδαφος είναι δυνατόν να εμφανιστούν στιγμιαίες πλημμύρες (flash floods). Αυτού του είδους οι πλημμύρες συνήθως οφείλονται στην έντονη βροχόπτωση για μικρό χρονικό διάστημα, συνήθως λεπτών και σπανιότερα ωρών. Στιγμιαίες πλημμύρες μπορούν να εμφανιστούν επίσης κατά τη διάρκεια ραγδαίας τήξης του χιονιού. Η εποχικότητα των στιγμιαίων πλημμυρικών φαινομένων εξαρτάται από το κλίμα και είναι κοινή σε πολλές διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου. Η πλειονότητα αυτών σε ποσοστό 38% συμβαίνουν το φθινόπωρο. Την άνοιξη το ποσοστό αυτό φτάνει το 28%, ενώ μόνο το 19% των πλημμυρικών γεγονότων λαμβάνουν χώρα το χειμώνα και το καλοκαίρι το ποσοστό φτάνει το 15% , (Segura, 1990).

Καταστροφικές συνέπειες – πρόβλεψη

Οι στιγμιαίες πλημμύρες εμφανίζονται συνήθως σε ξηρά και ημίξηρα περιβάλλοντα με αραιή βλάστηση και καταλαμβάνουν μικρή χωρική έκταση σε σχέση με τη λεκάνη απορροής (Georgakakos, 1986). Αυτού του είδους οι πλημμύρες είναι λιγότερο προβλέψιμες και μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές, ιδίως όταν η έντονη βροχόπτωση προκαλέσει κατολισθήσεις του εδάφους (Lin, 1999). Το νερό κατά τις στιγμιαίες πλημμύρες κινείται με μεγάλες ταχύτητες οι οποίες μπορούν να παρασύρουν δέντρα, ογκόλιθους, να καταστρέψουν κτίρια και υποδομές, αλλά και να αυξήσουν σημαντικά την πιθανότητα καθιζήσεων και μεταφοράς μεγάλου όγκου φερτών υλικών (Hooke and Mant, 2000). Το φορτίο των φερτών υλικών είναι πολύ υψηλό για κάθε ένα μεμονωμένο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός, λόγω όμως του μικρού τους αριθμού που λαμβάνουν χώρα στη διάρκεια ενός έτους, ο μέσος ετήσιος όγκος των φερτών υλικών είναι σχετικά μικρός (Cohen and Laronne, 2005).

Ο Archer (1992) παρομοίωσε τις στιγμιαίες πλημμύρες ως ένα 'τοίχος νερού' (walls) που μπορεί να φτάσει σε ύψος τα 3-6 m. Δεδομένου ότι συμβαίνουν ξαφνικά και με ελάχιστη προειδοποίηση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τους ανθρώπους και καταστροφικές για τις περιουσίες.

5.2. ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΙΧΜΕΣ ΣΕ ΕΦΗΜΕΡΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

5.2.1. Γενικά

Σε λεκάνες απορροής με καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο εμφανίζονται εφήμερα ποτάμια συστήματα με βραχώδης (καρστικές) κοίτες. Γεωμορφολογικά οι λεκάνες αυτές απορροής είναι μικρές σε έκταση με έντονες κλίσεις, μεγάλες κοιλάδες, ενώ τα ποτάμια συστήματα έχουν πολλούς επιμέρους παραποτάμους. Αυτά τα συστήματα είναι ξηρά για τη μεγαλύτερη περίοδο του χρόνου, παρόλο αυτά γίνονται ιδιαιτέρως ενεργά κατά τη διάρκεια των διαφόρων πλημμυρικών γεγονότων.

Οι καρστικές στιγμιαίες πλημμυρικές απορροές (Karstic Flash Flood) είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία των στιγμιαίων πλημμυρικών απορροών και αποτελούν μια από τις πιο θανατηφόρες και επιζήμιες οικονομικά φυσικές καταστροφές παγκοσμίως. Η πλειονότητα των καρστικών στιγμιαίων πλημμυρών προκαλούνται όταν τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (απότομες κλίσεις, αραιοί βλάστηση, λεπτό χώμα, καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο), συνδυάζονται με έντονες, μη συνήθεις κατανεμημένες βροχοπτώσεις, δημιουργώντας έτσι ξαφνικές μεγάλες πλημμυρικές αιχμές (Marechal et al., 2008). Σε αυτές τις περιπτώσεις η επιφανειακή απορροή είναι έντονη, δημιουργώντας πλημμυρικά γεγονότα με απότομα και στενά υδρογραφήματα και μικρούς χρόνους επιβράδυνσης. Οι ποσότητες της επιφανειακής απορροής, αντιστοιχούν σε ένα μικρό ποσοστό του συνόλου της βροχόπτωσης και αυτό γιατί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής δημιουργούν υψηλό ρυθμό διήθησης (Camarasa Belmonte and Segura Beltran 2001).

Οι δίοδοι του νερού στα ανάντη τμήματα των καρστικών λεκανών απορροής είναι συνήθως βαθιά και στενά κανάλια, βοηθώντας έτσι στη διαδικασία δημιουργίας του πλημμυρικού κύματος. Αντίθετα στα κατόντη, το πλάτος της διατομής των καρστικών καναλιών μπορεί να είναι ίσο και με 100

φορές το βάθος τους. Οι βραχώδης (καρστικές) κοίτες των καναλιών ομαλοποιούν τα υδρογραφήματα (αιχμές) λόγω της απότομης αλλαγής στη γεωμετρία των καναλιών και των υψηλών απωλειών που εμφανίζονται λόγω μεταφοράς μέσα στα καρστικά κανάλια, (Segura, 1990).

Μηχανισμός γένεσης των καρστικών στιγμιαίων πλημμυρών

Το κάρσιτ ορίζεται σαν το τμήμα εκείνο του τμήματος της γης που βρίσκεται κάτω από ασβεστολιθικά πετρώματα και δολομίτες. Η τοπογραφία της καρστικής περιοχής διαμορφώνεται από τη διάβρωση των βράχων και χαρακτηρίζεται από εδαφικές κατακρημνίσεις, ρήγματα, υπόγεια κανάλια και σπήλαια. Γενικότερα τα καρστικά πετρώματα παρουσιάζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς διήθησης, ενώ ο κάθετος προσανατολισμός των καρστικών σχηματισμών συγκεντρώνει και μεταφέρει πολύ γρήγορα το νερό από την επιφάνεια στον υπόγειο υδροφορέα (Bakalowicz, 2005).

Οι καρστικοί υδροφορείς, σχετικά με το πορώδες μέσο τους, μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

A) Διαπερατότητα στερεού πετρώματος – Matrix, (πολύπλοκα κενά διαστήματα σε μικρά βραχώδη τεμάχια, το συγκεκριμένο πορώδες σύστημα αποτελείται από κοκκώδης πόρους και μικρές σχισμές).

B) Διαπερατότητα ρωγματώσεων – Fracture, (προκαλείται από τη μηχανική ένωση πολλών μικρών ρωγμών κατά τη χημική διάβρωση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων).

Γ) Διαπερατότητα ρηγμάτων – Conduit, (κανάλια διέλευσης νερού με άνοιγμα από 1cm έως μερικές δεκάδες μέτρα).

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η ροή μέσω του τριπλού αυτού πορώδους συστήματος των καρστικών γεωλογικών δομών συμβαίνει τόσο στην ακόρεστη όσο και στην κορεσμένη ζώνη. Η υδραυλική διαπερατότητα έχει ανισοτροπικό χαρακτήρα στους καρστικούς υδροφορείς, ενώ για να υπάρξει τυρβώδης ροή μέσα στα καρστικά κανάλια θα πρέπει αυτά να έχουν διάμετρο > 5-15mm (Bakalowicz, 2005).

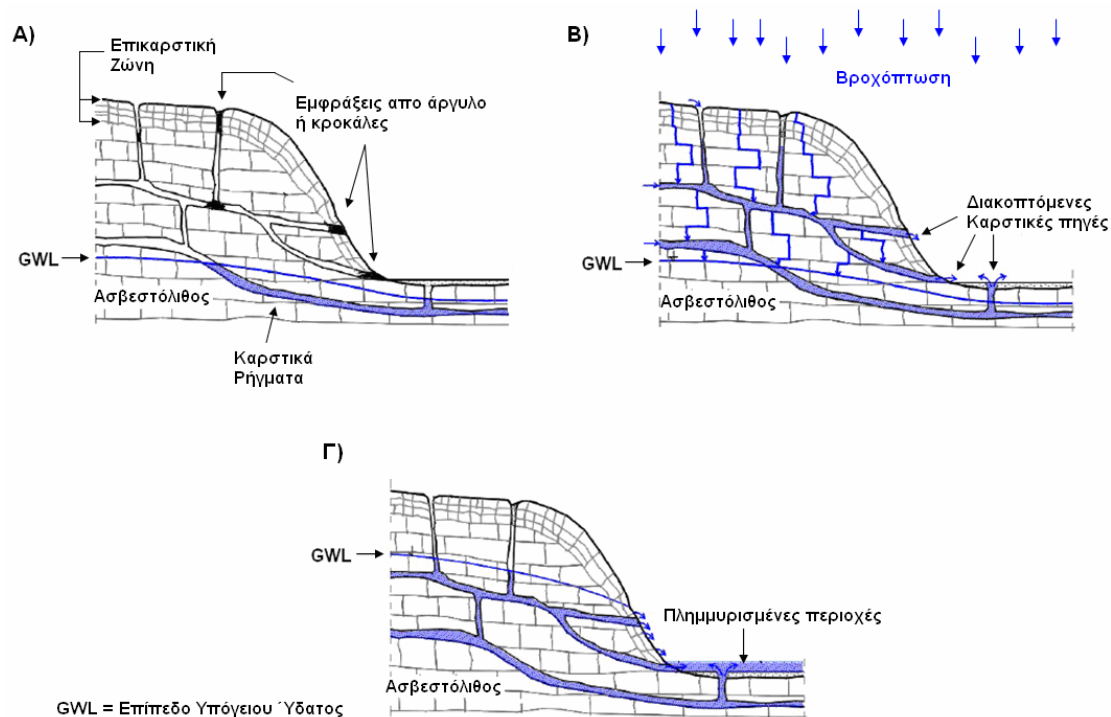
Προκειμένου να δημιουργηθεί καρσική στιγμιαία πλημμύρα θα πρέπει στο καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο να συντρέχουν οι παρακάτω προϋποθέσεις (Bonacci et al., 2006):

- α) Υψηλός ρυθμός διήθησης.
- β) Ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ επιφανειακού και υπόγειου νερού στις καρστικές περιοχές.
- γ) Μικρή αποθηκευτική ικανότητα του καρστικού μέσου.
- δ) Γρήγορη υπόγεια ροή μέσω των καρστικών καναλιών.
- ε) Ισχυρή και άμεση σύνδεση μεταξύ επιφανειακής διείσδυσης δια μέσων των στενών οπών και εκφόρτισης μέσω μόνιμων και διακοπτόμενων πηγών.
- ζ) Ύπαρξη πολλών υποεδάφια και επιφανειακών καρστικών ρηγμάτων.
- η) Γρήγορη και υψηλή περιοδική μεταβολή του επιπέδου του υδροφορέα σε καρστικές περιοχές.
- θ) Περιορισμένη χωρητικότητα των στενών οπών του καρστικού γεωλογικού σχηματισμού.

Λόγω του πολύ γρήγορου ρυθμού διήθησης, η επιφανειακή απορροή είναι σπάνια σε καρστικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Όλη η ποσότητα βροχής διεισδύει κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπου γεμίζουν τα καρστικά κενά (πορώδες υλικό) στις διάφορες διευθύνσεις, ενώ την ίδια στιγμή η ροή πραγματοποιείται μέσω της επίδρασης της βαρύτητας. Όταν η χωρική ικανότητα του καρστικού πορώδες μέσου δεν είναι μεγάλη, το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς κατά τη διάρκεια σύντομων βροχοπτώσεων με μεγάλη όμως ένταση. Λόγω της ανόδου του υπόγειου υδροφορέα μη ενεργά κανάλια και πηγές ενεργοποιούνται και το υπόγειο νερό διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και εμφανίζεται σε πολλά μη αναμενόμενα σημεία.

Η εμφάνιση αυτή του νερού μέσω διακοπτόμενων πηγών είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των στιγμιαίων καρστικών πλημμυρικών γεγονότων. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι η πολύ δύσκολη μέτρηση της παροχής κατά τη διάρκεια τέτοιων καρστικών στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων.

Η εμφάνιση των στιγμιαίων καρστικών πλημμυρικών γεγονότων πραγματοποιείται σε τρία στάδια – φάσεις, (Bonacci et al., 2006) (Εικόνα 5.1) :



Εικόνα 5. 1. Στάδια γένεσης των καρστικών στιγμιαίων πλημμυρών.

A) Μηδενικό στάδιο (Zero state):

Σε αυτήν την κατάσταση βρίσκεται το καρστικό σύστημα πριν την έναρξη της έντονης βροχόπτωσης και μετά από μακρά περίοδο ξηρασίας. Το επίπεδο του υπογείου ύδατος είναι πολύ χαμηλό και κάτω από το χαμηλότερο ανάγλυφο του εδάφους, ενώ το υπόγειο νερό δεν ρέει μέσω των καρστικών καναλιών. Μερικά από τα καρστικά κανάλια είναι φραγμένα (εμποδίζονται) από λάσπη ή κροκάλες - πέτρες και στην εν λόγω περιοχή δεν είναι ενεργές οι καρστικές πηγές (Εικόνα 5.1, A).

B) Κατάσταση μετά την έναρξη της έντονης βροχόπτωσης (After rainfall):

Το επίπεδο του υδροφορέα είναι στην ίδια θέση όπως αυτής του μηδενικού σταδίου αλλά τα υπάρχοντα καρστικά κανάλια είναι γεμάτα με νερό. Η ροή μέσα σε αυτά γίνεται υπό πίεση και το υπόγειο νερό μέσα στα καρστικά κανάλια είναι πολύ υψηλά. Λόγω της πίεσης του υπόγειου νερού μερικά εμπόδια μέσα στα κανάλια μετακινούνται και διακοπτόμενες πηγές εμφανίζονται σε υψηλές κεκλιμένες και χαμηλές επίπεδες επιφάνειες. Αν η ένταση και η ποσότητα βροχόπτωσης είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να δημιουργηθεί επιφανειακή απορροή σε τμήματα του αναγλύφου.

Η διάρκεια αυτής της φάσης δεν είναι πολύ μεγάλη (10 min – μερικές ώρες). Κατά τη διάρκειά της τα καρστικά κανάλια γεμίζουν με νερό, λόγω της γρήγορης τυρβώδους ροής. Ροή υπό πίεση δημιουργείται μονό στα καρστικά κανάλια ενώ το καρσικό πορώδες μέσο με (matric διαπερατότητα) δεν έχει ακόμα πληρωθεί με υπόγειο νερό. Όσον αφορά τα μικρά ρήγματα, πληρώνονται με νερό μέσω ενός συστήματος αργής μεταβατικής στρωμάτωσης.

Γ) Τελικό στάδιο (Final state):

Το ύψος του υδροφορέα φτάνει στη μέγιστη τιμή του, σε αντίθεση με τη δεύτερη φάση όπου το επίπεδο του υπογείου νερού αυξάνεται μόνο μέσα στα καρστικά κανάλια. Η τρίτη φάση διαρκεί περισσότερο από τη δεύτερη και η διάρκεια της εξαρτάται από την τοπική μορφολογία. Στη φάση αυτή σαν συνέπεια των καρστικών στιγμιαίων πλημμυρών, είναι δυνατό να εμφανιστούν καθιζήσεις (Εικόνα 5.1, Γ).

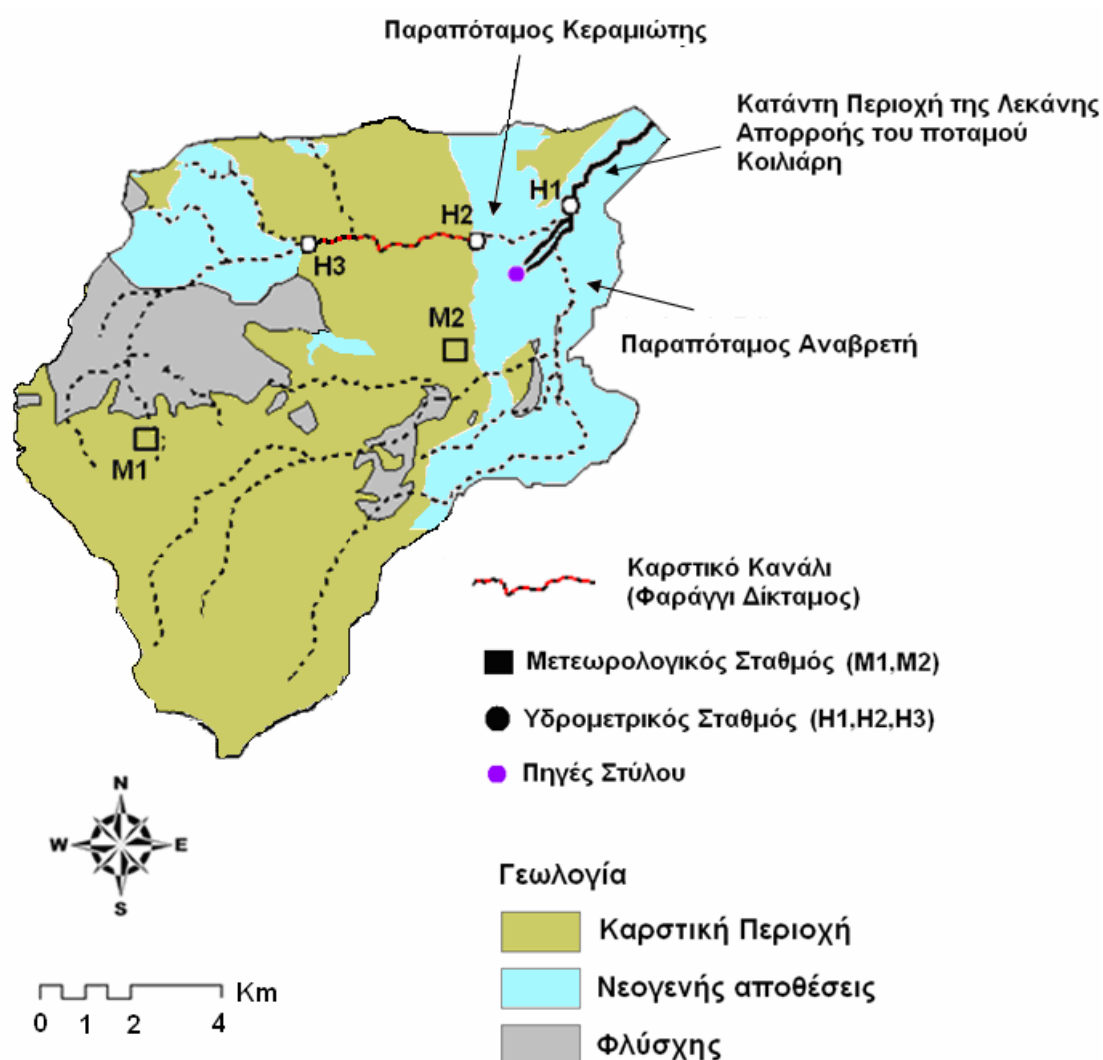
Η διάρκεια κάθε πλημμύρας σε καρσικές περιοχές εξαρτάται άμεσα από τη χωρική ικανότητα των μικρών οπών του καρστικού συστήματος.

5.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΜΕΝΕΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΑΙΧΜΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η έλλειψη ικανοποιητικού αριθμού υδρομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών αλλά και η συχνότητα συλλογής των μετρήσεων, που συνήθως είναι σε ημερήσιο χρονικό βήμα, αποκρύπτουν την υδρολογική διαδικασία του πλημμυρικού γεγονότος, μιας και αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνει χώρα σε μικρό χρονικό διάστημα, (Belmonte and Beltran 2001). Το βασικό χαρακτηριστικό των εφήμερων ποταμιών είναι ότι συμβαίνουν ακραία πλημμυρικά γεγονότα χαμηλής συχνότητας αλλά υψηλού μεγέθους. Σε αρκετές περιπτώσεις η απουσία βασικής απορροής στα εφήμερα ποτάμια ταυτίζει την υδρολογία τους με αυτή των πλημμυρικών γεγονότων που συμβαίνουν σε αυτά. Έτσι η οποιαδήποτε ανάλυση κάθε μεμονωμένου πλημμυρικού γεγονότος συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της δημιουργίας της επιφανειακής απορροής. Παραδοσιακά τέτοιες μελέτες βασίζονται σε ημερήσια δεδομένα. Παρόλα αυτά η ακρίβεια τέτοιων δεδομένων είναι μη ικανοποιητική για λεπτομερή ανάλυση της δημιουργίας του πλημμυρικού γεγονότος. Για την

ανάλυση των πλημμυρικών γεγονότων είναι πολύ χρήσιμη η μελέτη της σχέσης βροχοπτώσης και επιφανειακής απορροής σε ωριαία χρονική βάση.

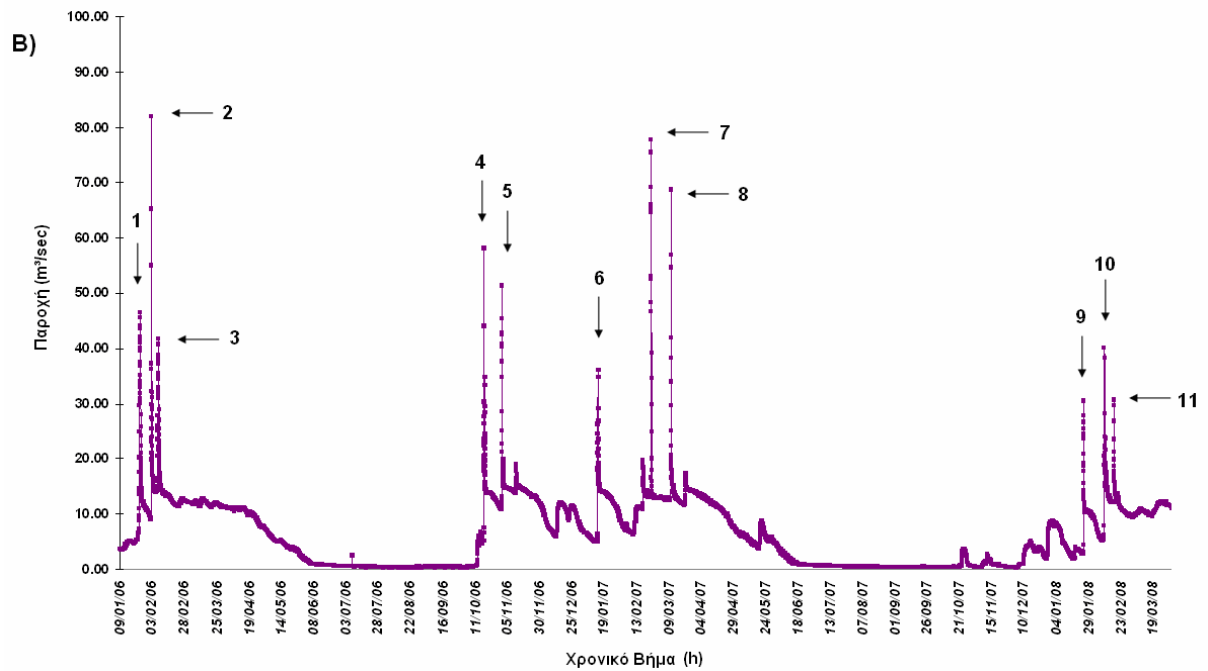
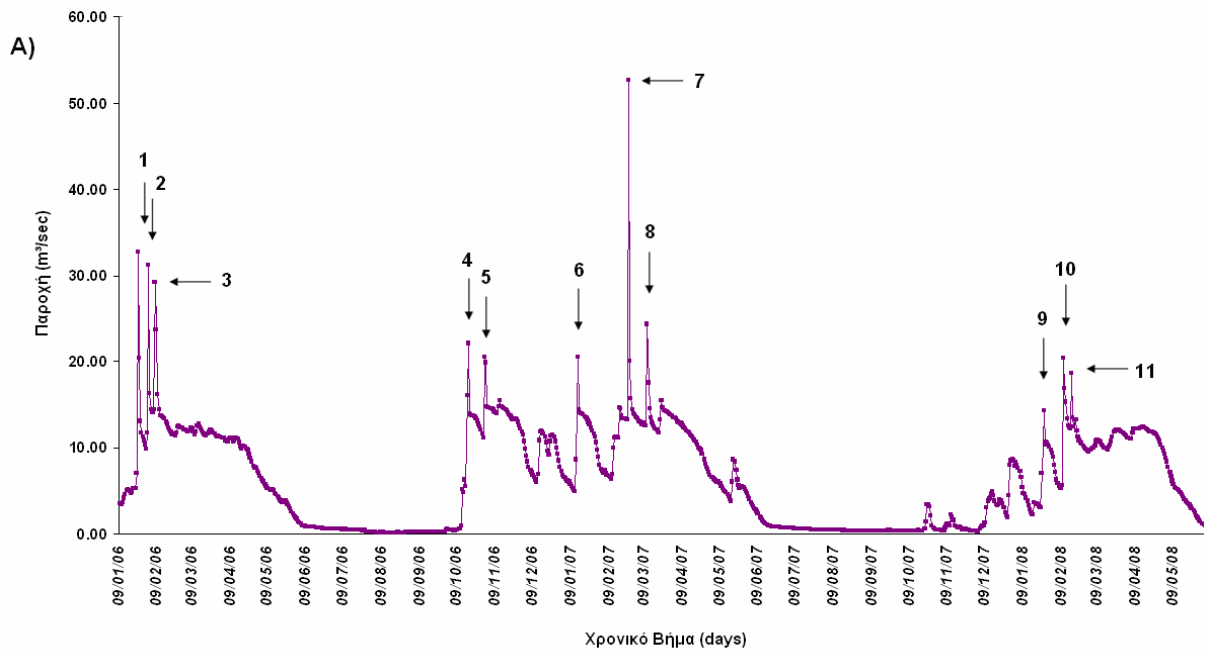
Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη έχει δύο κύριους παραποτάμους διαλείπουσας ροής τους Κεραμιώτη και Αναβρετή (Εικόνα 5.2). Επίσης στην Εικόνα 5.2, περιγράφεται η γεωλογική δομή της λεκάνης απορροής, καθώς και η χωρική κατανομή των τηλεμετρικών υδρομετρικών (H1, H2 και H3) και μετεωρολογικών σταθμών (M1 και M2), τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήσαμε στο παρόν Κεφάλαιο για τη μελέτη των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών.



Εικόνα 5. 2. Τηλεμετρικοί υδρομετρικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών.

Οι παραπάνω υδρομετρικοί και τηλεμετρικοί σταθμοί έχουν δυνατότητα αυτόματης καταγραφής των διαφόρων παραμέτρων σε ωριαία χρονική βάση. Στην Εικόνα 5.3, βλέπουμε χαρακτηριστικά το ημερήσιο υδρογράφημα από τον

υδρομετρικό σταθμό H1 για το χρονικό διάστημα από 1/9/2006 - 31/8/2008. Σύμφωνα με την Εικόνα 5.3 Α, στο χρονικό διάστημα παρατήρησης - μελέτης (1/9/2006 - 31/8/2008) δημιουργήθηκαν 11 συνολικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα - αιχμές, με μεγαλύτερο εκείνο της 22/2/2006, (στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 7). Κατά τη διάρκεια αυτού του πλημμυρικού γεγονότος η ημερήσια παροχή έφτασε τα 52 m³/sec. Μελετώντας όμως τα ίδια στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα σε ωριαία χρονική βάση (Εικόνα 5.3 Β - υδρομετρικός σταθμός H1), οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές έχουν διαφορετική μορφή. Ειδικότερα οι αιχμές που καταγράφονται σε ωριαία χρονική βάση ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές που καταγράφηκαν σε ημερήσια βάση. Έτσι, το μεγαλύτερο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός σε ωριαία βάση καταγράφηκε την 4/2/2006, (στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 2). Κατά τη διάρκεια αυτού του πλημμυρικού γεγονότος η ωριαία παροχή έφτασε τα 83 m³/sec.



Εικόνα 5. 3. Δεδομένα ημερήσιας και ωριαίας χρονικής παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό Η1 για τα 11 στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα.

5.4. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΩΝ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Προκειμένου να μελετήσουμε τη συνεισφορά των δυο κύριων παραποτάμων του ποταμού Κοιλιάρη στη δημιουργία τυχόν πλημμυρικού φαινομένου στα κατάντη τμήματα του, θα προσδιορίσουμε α) την κινητική ενέργεια (Stream power) που είναι διαθέσιμη για την υπερνίκηση των τριβών

και τη μεταφορά νερού και β) την ποσότητα ιζήματος (Sediment yield) που δύναται να μεταφέρουν οι δυο παραπόταμοι, για το ίδιο πλημμυρικό γεγονός. Οι δύο παραπάνω παράμετροι είναι δυνατό να προσδιοριστούν με την εφαρμογή των εξισώσεων ενέργειας ποταμού «Stream Power» και του μοντέλου «Hillslope Erosion Model (HEM)», σύμφωνα με τη θεωρία των Petit et al., 2005 και Wilson et al., 2001, αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός των παραπάνω παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί με βάση το πλημμυρικό γεγονός (7), ενώ παράλληλα θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων προκειμένου να διαπιστωθεί ποιος από τους δυο παραποτάμους διαλείπουσας ροής συμβάλλει περισσότερο στη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη. Ο αναλυτικός τρόπος προσδιορισμού των παραπάνω παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη ενότητα.

5.4.1. Ενέργεια Ποταμού - Stream Power

Η δυναμική ενέργεια του νερού σε ένα ποτάμι μετατρέπεται, εξαιτίας της διαφοράς υψομέτρου, σε κινητική. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της κινητικής ενέργειας καταναλώνεται στις τριβές που συναντά το νερό κατά τη ροή του στην κοίτη του ποταμού. Παρόλα αυτά, το υπολειπόμενο ποσοστό της κινητικής ενέργειας μπορεί να διαβρώσει την κοίτη του ποταμού και να συνεισφέρει στη μεταφορά φερτών υλών. Έτσι, δόκιμα ο McEwen (1994) όρισε ως 'Stream Power' το ρυθμό της ενέργειας που είναι διαθέσιμη για την υπερνίκηση των τριβών και τη μεταφορά ιζήματος. Προκειμένου να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί μαθηματικά ο προηγούμενος ορισμός, προτάθηκαν οι παρακάτω δυο εκφράσεις του 'Stream Power' :

A) 'Gross Stream Power' που ορίζεται ως ο ρυθμός κατανάλωσης της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους ποταμού και υπολογίζεται από το γινόμενο της πυκνότητας του νερού, της επιτάχυνσης της βαρύτητας, της παροχής και της κλίσης:

$$\Omega = \rho \times g \times Q \times s, \quad (5.1)$$

B) 'Specific Stream Power' μια εναλλακτική μορφή έκφρασης του 'Stream Power' ανά μονάδα έκτασης της κοίτης του ποταμού και υπολογίζεται από τη διαίρεση του 'Gross Stream Power' με το πλάτος της κοίτης του ποταμού (Petit et al., 2005):

$$\omega = \frac{\Omega}{w}, \quad (5.2)$$

Όπου:

Ω = Gross Stream Power - ρυθμός κατανάλωσης της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους ποταμού (W/m),

ρ = Πυκνότητα νερού (Kg/m³),

g = Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²),

Q = Παροχή (m³/s),

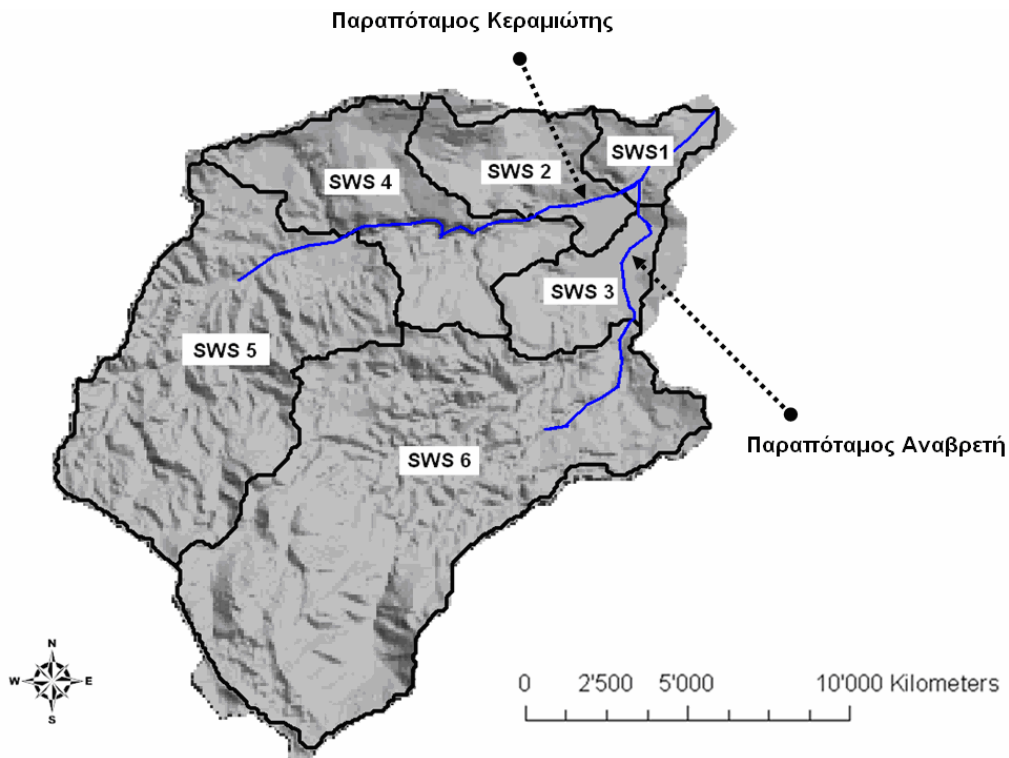
S = Κλίση (m/m),

ω = Specific Stream Power (W/m²),

w = Πλάτος κοίτης ποταμού (m).

Εφαρμογή των εξισώσεων Ενέργειας ποταμού στη Λεκάνη Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη - (Παραπόταμοι Κεραμιώτης και Αναβρετή)

Η εφαρμογή των Εξισώσεων (5.1) και (5.2) είναι χρήσιμη προκειμένου να προσδιορίσουμε τον παραπόταμο εκείνο της λεκάνης απορροής που εμφανίζει την υψηλότερη κινητική ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια οι δύο παραπόταμοι (Κεραμιώτης και Αναβρετή) χωρίστηκαν σε έξι επιμέρους τμήματα ακολουθώντας το διαχωρισμό της λεκάνης απορροής σε έξι υπολεκάνες (SWS1-SWS6), όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4, (Εικόνα 5.4). Η εφαρμογή των εξισώσεων του «Gross Stream Power» και «Specific Stream Power» πραγματοποιήθηκε για κάθε ένα από τα επιμέρους τμήματα των παραποτάμων Κεραμιώτη (υπολεκάνες SWS2, SWS4, SWS5) και Αναβρετή (υπολεκάνες SWS3, SWS6). Η ανάλυση έγινε με βάση τις παροχές που προέκυψαν για κάθε τμήμα των παραποτάμων (κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε μια υπολεκάνη) κατά την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HSPF, για την ημερομηνία 23-24/2/2007 [πλημμυρικό γεγονός (7), Εικόνα 5.3], (Kourgialas et al., 2008; Kourgialas et al., 2010). Τη συγκεκριμένη ημερομηνία είχε σημειωθεί ακραία βροχοπτώση, γεγονός που προκάλεσε μεγάλη στιγμιαία πλημμυρική αιχμή στην περιοχή ενδιαφέροντος.

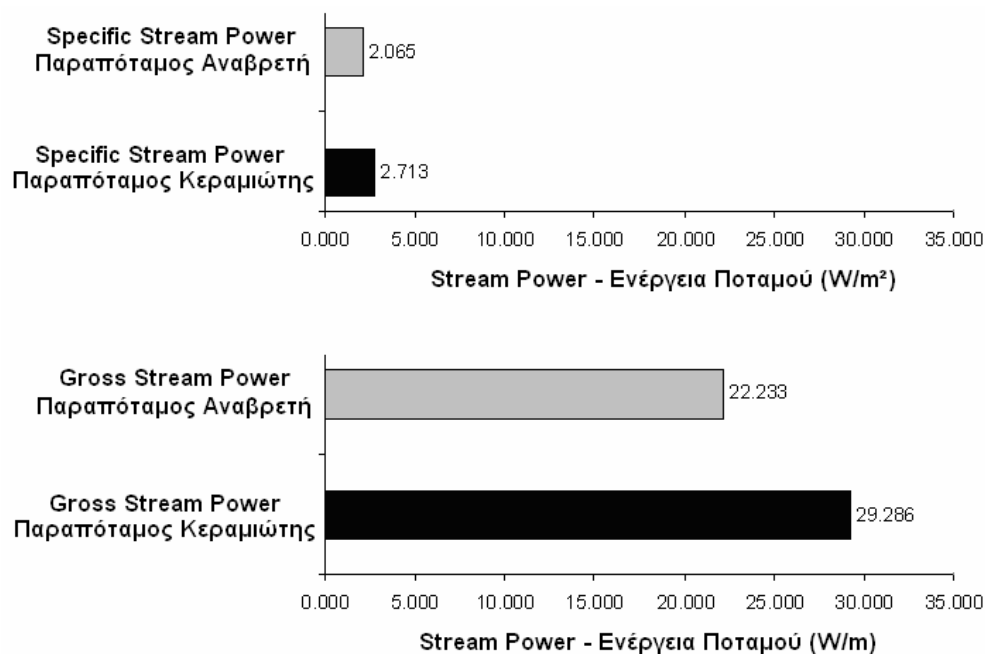


Εικόνα 5. 4. Οι 6 Υπό-Λεκάνες της Λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, και τα αντίστοιχα τμήματα των παραποτάμων.

Το μήκος του κάθε τμήματος ποταμού και η κλίση προέκυψαν με τη χρήση του GIS από τους ψηφιοποιημένους θεματικούς χάρτες που αφορούν το υδρογραφικό δίκτυο και το υψομετρικό ανάγλυφο. Η επιτάχυνση της βαρύτητας θεωρήθηκε ίση με 9.81 m/s^2 ενώ η πυκνότητα του νερού ίση με 1 kg/l . Στον Πίνακα 5.1, περιγράφεται το μήκος, η κλίση και η ημερήσια τιμή παροχής για κάθε ένα από τα τμήμα (υπολεκάνες) του ποταμού Κοιλιάρη. Εφαρμόζοντας τις Εξισώσεις 5.1 και 5.2 προκύπτουν τα συγκριτικά ραβδογράμματα (Εικόνα 5.5), των «Gross Stream Power» και «Specific Stream Power» για τους δυο παραποτάμους (Κεραμιώτης και Αναβρετή) του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 5. 1. Παράμετροι για τον προσδιορισμό του «Gross Stream Power»

Παράμετροι	SWS 2	SWS 3	SWS 4	SWS 5	SWS 6
Μήκος Υδατορεύματος (m)	1559	3168	4200	5746	10049
Παροχή (m ³ /sec)	22.13	18.27	18.55	15.37	15.74
Μέση κλίση Υδατορεύματος (m/m)	0.0064	0.012	0.048	0.127	0.13



Εικόνα 5. 5. Τιμές των «Specific Stream Power» και «Gross Stream Power» για τους παραποτάμους (Κεραμιώτη και Αναβρετή), πλημμυρικό γεγονός (7).

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.5, τη μεγαλύτερη τιμή «Gross Stream Power» και «Specific Stream Power» παρουσιάζει ο παραπόταμος Κεραμιώτης σε σχέση με αυτόν της Αναβρετής. Συνεπώς ο παραπόταμος Κεραμιώτης εμφανίζει τη μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και άρα δύναται να μεταφέρει μεγαλύτερο όγκο ύδατος και αντίστοιχα μεγαλύτερες ποσότητες φερτών υλών (ιζημάτων) στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη. Προκειμένου να προσδιορίσουμε και να συγκρίνουμε τον όγκο του ιζήματος που μπορεί να μεταφερθεί από τους δύο παραποτάμους θα εφαρμόσουμε το μοντέλο Hillslope Erosion Model (HEM).

5.4.2. Ανάλυση φορτίου φερτών υλών - Εφαρμογή του μοντέλου HEM

Για να προσδιορίσουμε το ολικό φορτίο των φερτών υλών που δημιουργήθηκε – μεταφέρθηκε κατά το πλημμυρικό γεγονός (7) στους δύο παραποτάμους καθώς και τη μέση συγκέντρωση ιζήματος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Hillslope Erosion Model (Engineered Information Systems for Natural Resources USDA-ARS Southwest Watershed Research Center Tucson, Arizona), το οποίο υπάρχει ελεύθερο προς χρήση στο διαδίκτυο. Πρέπει να σημειωθεί ότι το εν λόγω μοντέλο αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή του μοντέλου WEPP (USDA – Water Erosion Prediction Project) και χρησιμοποιεί τις ίδιες εξισώσεις.

Το μοντέλο για να πραγματοποιήσει μια πρόβλεψη, απαιτεί τις παρακάτω παραμέτρους: α) μήκος (m) και κλίση (%) ποταμού, β) βλάστηση – (canopy) και εδαφοκάλυψη – (ground cover) (%), γ) συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους (soil erodibility) και δ) την επιφανειακή απορροή (Excess Runoff) (mm). Σημειώνεται ότι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει το προφίλ του ποταμού χωρίζοντας το σε τμήματα διαφορετικού μήκους, κλίσης κ.τ.λ. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε όλα τα τμήματα - υπολεκάνες των παραποτάμων Κεραμιώτη και Αναβρετή. Το μήκος και η κλίση του ποταμού προέκυψαν από τη χρήση του GIS. Όσον αφορά τη βλάστηση και την εδαφοκάλυψη, χρησιμοποιήθηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές της λεκάνης του Κοιλίαρη για την κάθε υπολεκάνη αντίστοιχα. Η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου και ο προσδιορισμός της επιφανειακής απορροής, κατά τη διάρκεια του ακραίου επεισοδίου βροχόπτωσης (23-24/02/2007), παρουσιάζονται παρακάτω.

Περιγραφή του Hillslope Erosion Model (HEM)

Το HEM αναπτύχθηκε και βελτιώθηκε από τους Lane et al (1988, 1995) στο USDA ARS Watershed Research Center, Tucson. Η διάβρωση και οι επιφανειακές εξισώσεις ροής συνδέονται και λύνονται για να προβλέψουν τις συγκεντρώσεις και την παραγωγή ιζημάτων κατά μήκος της κλίσης του ποταμού για ένα γεγονός απορροής.

Το HEM συνδέει τις εξισώσεις επιφανειακής απορροής και ιζημάτων για να προβλέψει το φορτίο του ιζήματος κατά μήκος κάθε τμήματος ποταμού, για ένα γεγονός απορροής. Η απορροή περιγράφεται από την κινηματική εξίσωση

της συνέχειας για την επιφανειακή ροή ανά πλάτος της επιφάνειας ποταμού (Wilson et al., 2001):

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(q)}{\partial x} = r \quad (5.3)$$

Όπου:

h = Μέσο βάθος ροής (m),

t = Χρόνος (sec),

q = Εκφόρτιση ανά μονάδα πλάτους (m^2/sec),

r = Ρυθμός άμεσης απορροής (m/sec),

x = Απόσταση στην κατεύθυνση της ροής ή το όριο διαχωρισμού της υπολεκάνης (m).

Η εκφόρτιση προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$q = Kh^m \quad (5.4)$$

Όπου:

K = Συντελεστής συσχέτισης στάθμης - παροχής, και

$m = 1.5$ όταν,

$$K = C\sqrt{S} \quad (5.5)$$

Όπου:

C = Υδραυλικός συντελεστής αντίστασης Chezy για την τυρβώδη ροή ($m^{1/2}/sec$), και

S = Κλίση της επιφάνειας του εδάφους (Αδιάστατη).

Για την αναλυτική λύση της εξίσωσης της συνέχειας θεωρείται ότι ο ρυθμός της άμεσης απορροή είναι σταθερός και ενιαίος.

Η εξίσωση συνεχείας της απόθεσης ιζημάτων για την επιφανειακή ροή είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(cq)}{\partial x} = E_i + E_r \quad (5.6)$$

Όπου:

c = Η συγκέντρωση του ιζήματος (kg/m^3),

E_i = Ο ρυθμός διάβρωσης εντός του ποταμού ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), και

E_r = Ο ρυθμός διάβρωσης εκτός ποταμού ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου (απόθεση ιζημάτων) ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).

Οι εξισώσεις προσδιορισμού του ρυθμού διάβρωσης εντός και εκτός ποταμού εκφράζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_i = K_i r \quad (5.7)$$

Όπου:

K_i = Συντελεστής διάβρωσης εντός ποταμού (interrill coefficient) (kg/m^3), και

$$E_r = K_r (T_c - cq) = K_r [(B/K)q - cq] \quad (5.8)$$

Όπου:

K_r = Συντελεστής διάβρωσης εκτός ποταμού (rill coefficient) ($1/\text{m}$),

T_c = Η ικανότητα μεταφοράς ($\text{kg}/\text{s}/\text{m}$), η οποία θεωρείται ίση με τον όρο $(B/K)q$, όπου B ο συντελεστής ικανότητας μεταφοράς ($\text{kg}/\text{s m}^{2.5}$).

Η ενσωμάτωση του χρόνου στη συνδυασμένη αναλυτική λύση των Εξισώσεων (5.3) και (5.6), διατυπώνει την τελική εξίσωση παραγωγής ιζήματος για ένα δεδομένο γεγονός απορροής (Wilson et al., 2001):

$$Q_s(x) = QC_b = Q \{ B/K + (K_i - B/K) [1 - \exp(-K_r x)] / K_r x \} \quad (5.9)$$

Όπου:

Q_s = Η συνολική παραγωγή ιζήματος ανά μονάδα πλάτους του ποταμού (kg/m),

Q = Ο συνολικός όγκος απορροής (storm runoff) ανά μονάδα πλάτους (m^3/m),

C_b = Η μέση συγκέντρωση ιζήματος στη διάρκεια του υδρογραφήματος (kg/m^3), και

x = Η απόσταση στην κατεύθυνση της ροής (m).

Όπως προαναφέραμε στην περιγραφή του μοντέλου HEM, για την εφαρμογή του είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της επιφανειακής απορροής (Runoff).

Βροχόπτωση και Απορροή - (Rainfall and Runoff)

Στην παρούσα εφαρμογή ο όγκος της επιφανειακής απορροής ανά μονάδα επιφάνειας, θα υπολογιστεί με βάση την προσέγγιση του αριθμού καμπύλης Soil Conservation Service (SCS). Ο αριθμός SCS συσχετίζεται με την βροχόπτωση P_E (in) και την άμεση απορροή R_E (in) μέσω του εμπειρικού συντελεστή CN (Curve Number). Η εξίσωση με την οποία υπολογίζουμε την απορροή είναι η ακολουθεί (Wilson et al., 2001):

$$R_E = \frac{(P_E - I)^2}{P_E - I + S}, \quad S = \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10, \quad \text{και} \quad I = 0.2 \times S \quad (5.10)$$

Έτσι για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα 23-24/2/2007 όπου είχαμε ακραία βροχόπτωση και πλημμυρική αιχμή (7), θα υπολογίσουμε τις διαφορετικές απορροές που θα αντιστοιχούν στα διαφορετικά τμήματα των παραπάνω παραποτάμων. Θα χρησιμοποιήσουμε τη μέση βροχόπτωση που αντιστοιχεί στην κάθε υπολεκάνη τροφοδοσίας του κάθε τμήματος ποταμού.

Για να προσδιορίζουμε την απορροή απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός του παράγοντα CN. Ο παράγοντας αυτός για την υδρολογική λεκάνη υπολογίζεται σαν συνάρτηση των χρήσεων γης, και του τύπου του εδάφους, όπως αυτά έχουν κατηγοριοποιηθεί σε πίνακες από την SCS (U.S. Soil Conservation Service, 1964; Slack and Welch, 1980). Η τιμή του παράγοντα CN κυμαίνεται από 99 για πλήρως αδιαπέρατο ως 0 για πλήρως διαπερατό έδαφος. Για μια υδρολογική λεκάνη η οποία αποτελείται από διαφορετικούς τύπους εδαφών σε συνδυασμό με ποικίλες χρήσεις γης, ο μέσος CN υπολογίζεται με βάση τη σχέση, (Mishra et al., 2006):

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (5.11)$$

Όπου

$CN_{composite}$ = Ο μέσος παράγοντας CN_i για την κάθε υπολεκάνη, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της απορροής για την κάθε υπολεκάνη,

i = Το τμήμα της επιφάνειας της υδρολογικής λεκάνης που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο τύπου εδάφους και χρήση γης,

CN_i = Η τιμή CN για το συγκεκριμένο τμήμα, και

A_i = Η έκταση του τμήματος αυτού.

Ο προσδιορισμός του CN για μια υδρολογική λεκάνη περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. Προσδιορισμός του τύπου εδάφους και κατάταξη του με βάση τις πρότυπες κατηγορίες εδαφών SCS:

- ✓ Τύπος εδάφους A: χαμηλή επιφανειακή απορροή, υψηλός ρυθμός διήθησης [> 7.6 (mm/h)].
- ✓ Τύπος εδάφους B: μέσος ρυθμός διήθησης [$3.8 - 7.6$ (mm/h)].
- ✓ Τύπος εδάφους C: χαμηλός ρυθμός διήθησης [$1.27 - 3.8$ (mm/h)].
- ✓ Τύπος εδάφους D: εξαιρετικά χαμηλός ρυθμός διήθησης [$0.00 - 1.27$ (mm/h)].

2. Ο ακόλουθος προσδιορισμός των διαφορετικών χρήσεων γης και η έκτασή τους.

3. Αναγωγή των αποτελεσμάτων στη συνολική έκταση κάθε υπολεκάνης.

Ο προσδιορισμός του παράγοντα CN για κάθε χρήση γης πραγματοποιήθηκε με βάση τους αναλυτικούς πίνακες της Soil Conservation Service, (1986) που συνδέουν τους παράγοντες CN, SCS με τον κάθε διαφορετικό τύπο χρήσης γης, αλλά και με τη διαφορετική μορφή του καθενός από τους τύπους αυτούς, (Πίνακες 1 και 2 Παράρτημα Β).

Στον Πίνακα 5.2, που ακολουθεί παρουσιάζονται οι 6 υπολεκάνες με τους αντίστοιχους τύπους εδαφών, βάση των πρότυπων κατηγοριών SCS. Προσδιορίζεται έτσι το ποσοστό που καταλαμβάνει η κάθε μια χρήση γης για το σύνολο της κάθε υπολεκάνης, ο παράγοντας CN για την κάθε χρήση γης και τέλος ο εξαγόμενος παράγοντας $CN_{\text{composite}}$ για το σύνολο της κάθε υπολεκάνης.

Πίνακας 5. 2. Η τιμή του σύνθετου παράγοντα CN ανά υπολεκάνη.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	SCS	CN _{composite}
SWS2	B	69.741
SWS3	C	81.25
SWS4	A	45.5
SWS5	B	64.44
SWS6	B	58.2

Με τον προσδιορισμό του παράγοντα $CN_{\text{composite}}$ και εφαρμόζοντας την Εξίσωση 5.10, προκύπτει η τελική απορροή ανά Km^2 που εμφανίζεται σε κάθε υπολεκάνη. Επίσης οι αντίστοιχες ημερήσιες παροχές για κάθε τμήμα του ποτάμιου συστήματος που ενσωματώνεται σε κάθε υπολεκάνη για το πλημμυρικό γεγονός (7), προέκυψαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου HSPF (Κεφάλαιο 4).

Βάση των παραπάνω στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζονται όλες οι απαραίτητες παράμετροι προκειμένου να προσδιοριστεί το ολικό φορτίο φερτών υλών και η μέση συγκέντρωση ιζήματος σε κάθε υπολεκάνη.

Πίνακας 5. 3. Παράμετροι για τον προσδιορισμό του ολικού φορτίου φερτών υλών και της μέσης συγκέντρωσης ιζήματος σε κάθε υπολεκάνη, πλημμυρικό γεγονός (7).

Παράμετρος	SWS 2	SWS 3	SWS 4	SWS 5	SWS 6
Μήκος (m)	1559	3168	4200	5746	10049
Βλάστηση (canopy) (%)	60	60	50	40	40
Εδαφοκάλυψη (%)	80	80	70	60	60
Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους	2.0	2.0	2.3	2.3	2.3
Επιφανειακή απορροή (Runoff) (mm)/ Km^2	7.62	11.42	1.63	3.79	2.86
Παροχές Q (m^3/sec)	22.13	18.27	18.55	15.37	15.74

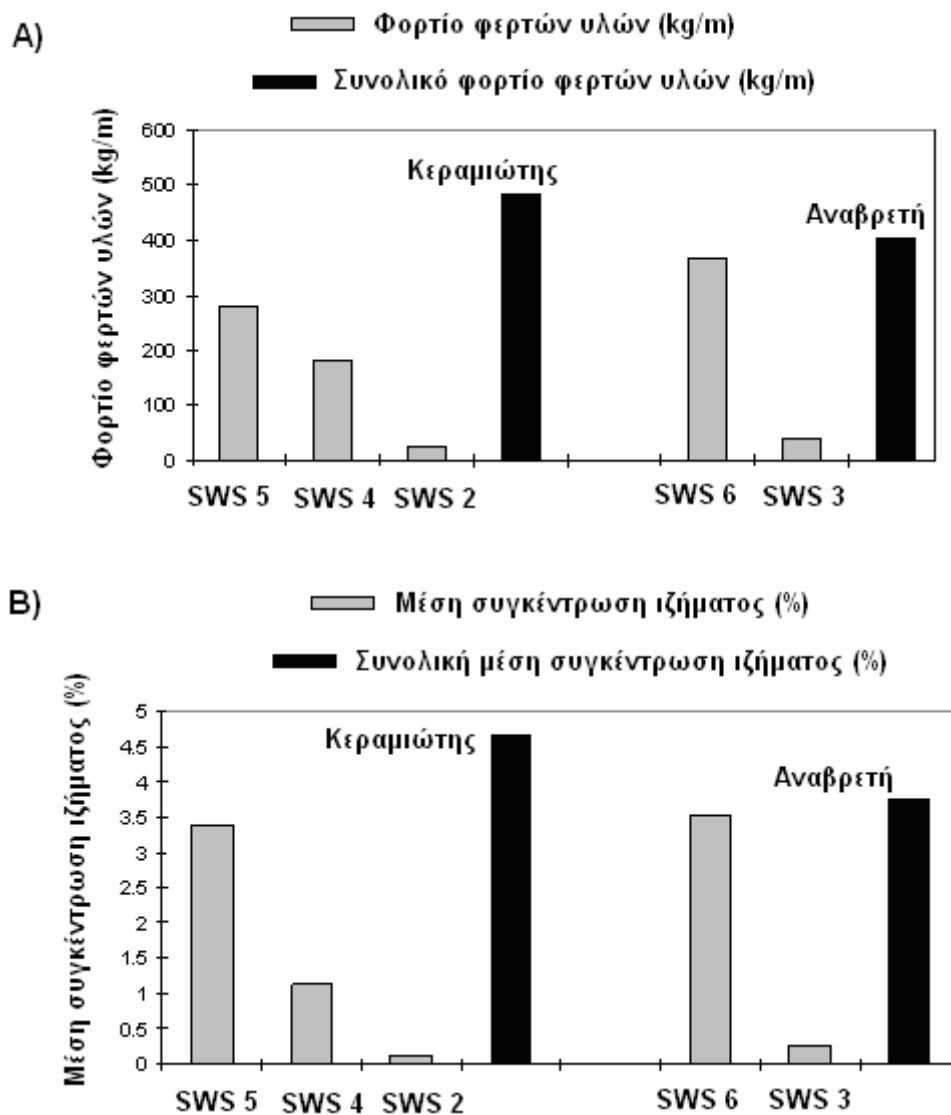
Στον παραπάνω Πίνακα 5.3, γίνεται μια εκτίμηση της βλάστησης (%) και της εδαφοκάλυψης (%), για την κάθε υπολεκάνη. Όσον αφορά το συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους σύμφωνα με τους Wilson et al., 2001, αυτός προσδιορίζεται σε σχέση με τη σύσταση του εδάφους (Πίνακας 5.4), έτσι για κάθε υπολεκάνη – τμήματα των παραποτάμων Κεραμιώτη και Αναβρετή, προσδιορίζεται η τιμή του συντελεστή διαβρωσιμότητας. Για τις υπολεκάνες SWS2 και SWS3, όπου το έδαφος θεωρείται γόνιμο και σχετικά βαρύ η σύσταση του εδάφους κρίνεται ως αργιλώδης άμμος (Loamy sand). Ενώ για τις υπολεκάνες SWS4, SWS5, SWS6 το έδαφος κρίνεται ως αμμώδης πηλός (Sand loam).

Πίνακας 5. 4. Σύσταση εδάφους και συντελεστής διαβρωσιμότητας. (Wilson et al., 2001)

Δομή Εδάφους	Συντελεστής Διαβρωσιμότητας
Sand (άμμος)	2.0
Loamy sand (αργιλώδης άμμος)	2.0
Sand loam (αμμώδης πηλός)	2.3
Loam (πηλώδης)	1.8
Fine sandy loam (λεπτόκοκκος αμμώδης πηλός)	2.1
Silty loam (λασπώδης πηλός)	3.3

Εφαρμογή του μοντέλου (HEM) στη λεκάνη απορροή του ποταμού Κοιλιάρη - (Παραπόταμοι Κεραμιώτης και Αναβρετή)

Το μοντέλο HEM εφαρμόστηκε για το χρονικό διάστημα 23-24/2/2007 όπου είχαμε ακραία βροχόπτωση [πλημμυρικό γεγονός (7)], κατά μήκος των παραποτάμων Κεραμιώτη και Αναβρετή, προκειμένου να συγκριθούν ως προς την ικανότητα τους να μεταφέρουν αυξημένες ποσότητες ιζημάτων στα κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. Στην Εικόνα 5.6 Α και Β, παρουσιάζεται το ολικό φορτίο φερτών υλών και η μέση συγκέντρωση ιζήματος, κατά μήκος των παραποτάμων Κεραμιώτη και Αναβρετή.



Εικόνα 5. 6 Α και Β. Ολικό φορτίο φερτών υλών (Kg/m) και Μέση συγκέντρωση ιζήματος (%) για τους παραποτάμους Κεραμιώτη και Αναβρετή, πλημμυρικό γεγονός (7).

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι ο παραπόταμος εκείνος που εμφανίζει το μεγαλύτερο ολικό φορτίο φερτών υλών και ολικής μέσης συγκέντρωσης ιζήματος, και κατά επέκταση είναι πιο επικίνδυνος για τη μεταφορά και απόθεση φερτών υλών στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη (υπολεκάνη SWS 1) είναι ο παραπόταμος Κεραμιώτης.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με την ανάλυση της ενέργειας ποταμού και της μεταφοράς ιζημάτων (Stream Power και Sediment Yield) για τους δυο παραποτάμους, αλλά και λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας του παραπόταμου διαλείπουσας ροής Κεραμιώτη, γίνεται φανερή η σπουδαιότητα του στη μελέτη της διαδικασίας πρόβλεψης καταστροφικών πλημμυρών. Πιο

συγκεκριμένα η γνώση του όγκου ύδατος που δύναται να μεταφερθεί από τον παραπόταμο Κεραμιώτη, στην περίπτωση ενός ακραίου γεγονότος βροχόπτωσης, διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη και τη μετέπειτα διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη.

5.5. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

Η ανάλυση των υδρογραφημάτων εφήμερων ποταμών είναι σχετικά εύκολη, καθώς δεν υπάρχει βασική απορροή. Στην περίπτωση των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών σε εφήμερα ποτάμια συστήματα, τα υδρογραφήματα παρουσιάζουν απότομες αιχμές, ενώ οι δυο κλάδοι ανιών και κατιών είναι πολύ στενοί με σχεδόν ίση χρονική διάρκεια. Συνήθως τα πλημμυρικά φαινόμενα διαρκούν από μερικές μέρες έως μερικές ώρες. Το σχήμα του υδρογραφήματος μιας τυπικής στιγμιαίας πλημμύρας (flash flood) είναι πολύ απότομο με μικρή χρονική βάση και απότομους αυξανόμενους κλάδους. Τα υδρογραφήματα αυτού του τύπου αντιπροσωπεύουν μια τυπική πλημμυρική καμπύλη για χειμωρικά ρέματα (flashy streams), με μορφολογία παρόμοια αυτών σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές.

Μια διαφορά μεταξύ μιας συνηθισμένης πλημμύρας (regular flood) και μίας στιγμιαίας πλημμύρας (flash flood), έγκειται ότι στη δεύτερη περίπτωση ο χρόνος (timescale) του πλημμυρικού γεγονότος είναι μικρότερος από 6 ώρες. Οι αιχμές των στιγμιαίων πλημμυρών είναι σημαντικά υψηλότερες από τις συνηθισμένες πλημμυρικές αιχμές, ενώ ο συνολικός όγκος του υδρογραφήματος ενός στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος είναι αρκετά μικρότερος (Camarasa Belmonte and Segura Beltran 2001).

Στα εφήμερα ποτάμια συστήματα εμφανίζονται μεγάλες παροχές κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών φαινομένων, οι οποίες αντιστοιχούν μόνο σε ένα μικρό μερίδιο της συνολικής βροχόπτωσης. Οι υδρολογικές αυτές απώλειες δύναται να προέρχονται από τη διήθηση, την εξατμισοδιαπνοή και τις απώλειες λόγω μεταφοράς. Η εξάτμιση στα Μεσογειακά εφήμερα ποτάμια δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας υδρολογικών απωλειών, λόγω του ότι το νερό παραμένει στα κανάλια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Βάση αυτού, ο παράγοντας της διήθησης και οι απώλειες λόγω μεταφοράς συμβάλουν

καταλυτικά στη μείωση των συνολικών παροχών και στην ομαλοποίηση των πλημμυρικών αιχμών. Οι απώλειες λόγω μεταφοράς είναι σημαντικές, ιδιαίτερα στα κατάντη τμήματα των ποταμών και αυξάνονται σε αναλογία με την αύξηση του πλάτους των καναλιών και της σύστασης του ιζήματος (Camarasa Belmonte and Segura Beltran 2001). Επειδή είναι δύσκολη η άμεση μέτρηση των διαφορετικών διαδικασιών απωλειών, υιοθετείται η έμμεση τεχνική του συντελεστή επιφανειακής απορροής (runoff coefficients), που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Ο παραπόταμος Κεραμιώτης χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών μικρής συχνότητας αλλά υψηλών όγκων παροχής. Το πλημμυρικό κύμα δημιουργείται στο ανάντη μη καρστικό τμήμα της υπολεκάνης απορροής SWS 5 και ταξιδεύει στην καρστική περιοχή SWS 3 (Φαράγγι Δίκταμος). Με βάση αυτή τη διαπίστωση, όπως προαναφέραμε εγκαταστάθηκαν οι δύο τηλεμετρικοί υδρομετρικοί σταθμοί (H3 και H2), προκειμένου να μελετηθεί το υδροδυναμικό σύστημα της περιοχής ενδιαφέροντος. Αναλυτικότερα, ο υδρομετρικός σταθμός (H3), εγκαταστάθηκε προκειμένου να καταγραφούν τα υδρολογικά δεδομένα στην ανάντη μη-καρστική περιοχή και ο δεύτερος (H2), στην κατάντη καρστική περιοχή (Εικόνα 5.2).

Η ανάλυση των πλημμυρικών υδρογραφημάτων μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία της γένεσης της απορροής τόσο σε καρστικές όσο και σε μη καρστικές περιοχές. Οι βασικοί μετεωρολογικοί και υδρολογικοί παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η συσσωρευμένη βροχόπτωση, η διάρκεια της πλημμυρικής παροχής και της αντίστοιχης βροχόπτωσης, η μέγιστη τιμή της πλημμυρικής αιχμής (παροχή και ύψος νερού), ο συντελεστής απορροής (runoff coefficient), ο χρόνος επιβράδυνση - συγκέντρωσης (lag – concentration time) και η μέση μέγιστη ικανότητα συγκράτησης της κάθε υπολεκάνης (basin mean maximum potential retention). Η πλειονότητα αυτών των παραμέτρων καταγράφονται άμεσα από τους σταθμούς (μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς), ενώ παράμετροι όπως ο συντελεστής απορροής, ο χρόνος επιβράδυνσης – συγκέντρωσης και η μέση μέγιστη ικανότητα συγκράτησης της κάθε υπολεκάνης προσδιορίζονται από την τελική μορφή των υδρογραφημάτων και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (Green and Nelson, 2002).

Παρακάτω θα αναλυθούν εκείνες οι υδρολογικές παράμετροι που διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των πλημμυρικών αιχμών.

Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής είναι ένας έμμεσος τρόπος υπολογισμού των απωλειών ροής. Με το όρο συντελεστής επιφανειακής απορροής C εκφράζουμε το λόγο του όγκου της άμεσης απορροής προς τον όγκο της βροχόπτωσης:

$$C = \frac{h_R}{h_r}, \quad (5.12)$$

Όπου:

h_R = Όγκος της άμεσης απορροής εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος (mm), και

h_r = Όγκος βροχόπτωσης εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος (mm).

Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής μπορεί να έχει μεγάλες τιμές διακύμανσης για κάθε ένα από τα διαφορετικά πλημμυρικά γεγονότα. Η μεγάλη διακύμανση του συντελεστή απορροής μέσα σε μικρές υδρολογικές λεκάνες, σε μερικές περιπτώσεις, σχετίζεται με την ένταση της βροχόπτωσης και τις συνθήκες υγρασίας πριν το πλημμυρικό γεγονός (De Vera, 1984).

Βασική παράμετρος των υδρογραφημάτων απαραίτητη για τον προσδιορισμό της πλημμυρικής αιχμής είναι η χρονική επιβράδυνση (Lag time) t_p , η οποία προσδιορίζεται ως ο χρόνος από το κέντρο βάρους της βροχόπτωσης ως την αιχμή της πλημμύρας. Η χρονική επιβράδυνση μπορεί να προσδιοριστεί εμπειρικά από τον τύπο (Sheeder et al., 2002) ως έξης:

$$t_p = \frac{2.587 \times I^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{(1900 \times Y^{0.5})} \quad (5.13)$$

Όπου

t_p = Χρονική επιβράδυνση (h),

I = Μήκος της λεκάνης απορροής σε (m),

Y = Μέση κλίση της λεκάνης απορροής (%) και

CN = Curve Number.

Σύμφωνα με την εμπειρική εξίσωση:

$$t_p = 0.6 \times t_c, \quad (5.14)$$

είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο χρόνος συγκέντρωσης του νερού t_c , ο οποίος ορίζεται ως ο χρόνος από τη στιγμή έναρξης της βροχόπτωσης μέχρι την εμφάνιση της πλημμυρικής αιχμής (Viessman et al., 1989).

Μια ακόμα πολύ σημαντική παράμετρο των υδατικών απωλειών κατά τη διάρκεια ενός στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος είναι η μέγιστη δυνατή ικανότητα συγκράτησης του νερού από τη λεκάνης απορροής, S (basin mean maximum potential retention) (mm). Η παράμετρος συγκράτησης S , αλλάζει μεταξύ των διαφόρων λεκανών απορροής εξαιτίας του διαφορετικού τύπου εδάφους, χρήσεων γης, των διαφορετικών κλίσεων και της γενικότερης διαχείρισης της λεκάνης απορροής. Επίσης μεταβάλλεται με το χρόνο εξαιτίας της αλλαγής της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό (Arnold et al., 1998). Η παράμετρος S σχετίζεται με το συντελεστή CN (Curve Number), σύμφωνα με την εξίσωση (USDA-SCS, 1986):

$$S = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (5.15)$$

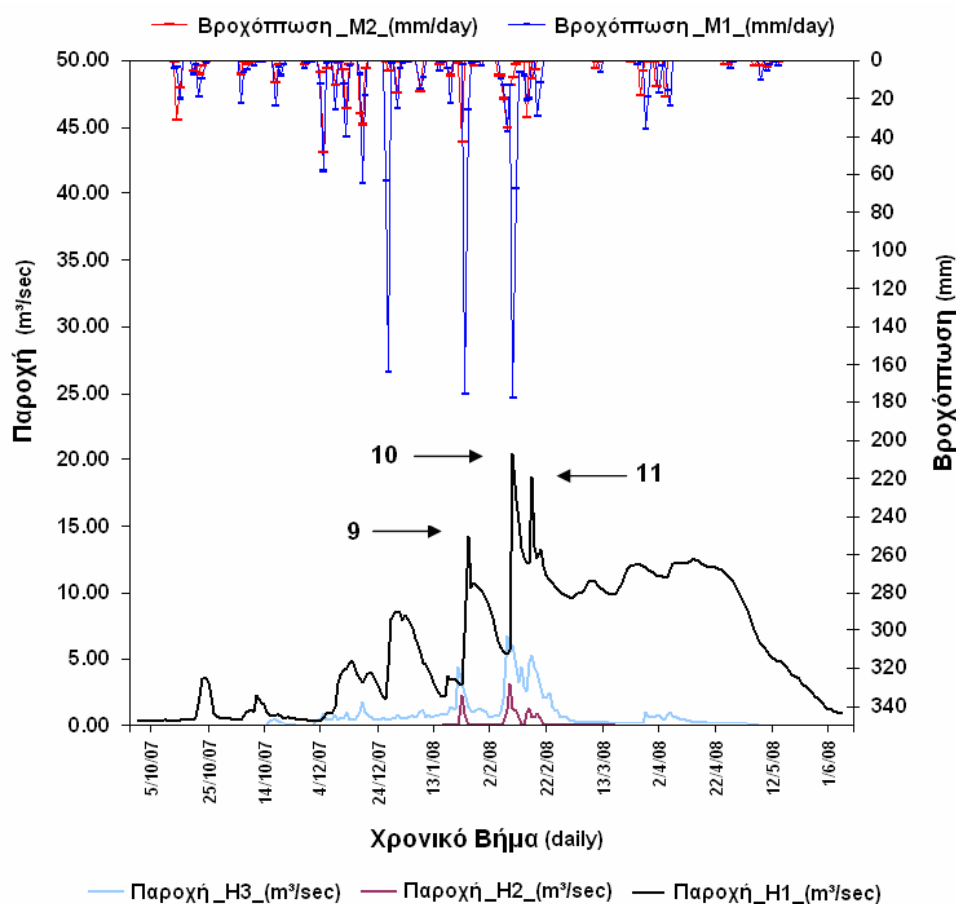
Η σταθερά 254, στην Εξίσωση (5.15) δίνεται σε mm.

5.6. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ

Σε μικρές λεκάνες απορροής, η ένταση της βροχόπτωσης και οι αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας είναι οι πιο σημαντικοί παράμετροι στη δημιουργία καρστικών και μη καρστικών στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων (Camarasa Belmonte and Segura Beltran 2001). Με βάση αυτή τη διαπίστωση, παράμετροι οι οποίοι περιγράφουν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης μπορούν να επηρεάσουν την τελική μορφή των πλημμυρικών αιχμών. Οι παράμετροι αυτοί καθώς επίσης και επιπρόσθετοι υδρολογικοί παράμετροι μέσω των υδρογραφημάτων περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω για τις στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές, 9, 10, και 11.

Ανάλυση των εξερχόμενων υδρογραφημάτων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται και αναλύονται τα υδρογραφήματα τα οποία δημιουργήθηκαν με βάση τα καταγραφόμενα υδρολογικά δεδομένα από τους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H2 και H3. Η ακόλουθη υδρολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με ωριαία υδρολογικά δεδομένα για τις στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές (9, 10, και 11), οι οποίες έλαβαν χώρα κατά το χρονικό διάστημα (1/7/2007 – 31/8/2008), στους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H2 και H3 (Εικόνα 5.7). Συνολικά μελετούνται εννέα καρστικά και μη καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα, έξι εκ των οποίων είναι μη καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (δεδομένα από του σταθμούς H1 και H3) και τρία καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (δεδομένα από το σταθμό H2). Για την παραπάνω χρονική περίοδο, η υψηλότερη ωριαία καταγραφόμενη παροχή ήταν 40.9 m³/sec και εμφανίστηκε στον υδρομετρικό σταθμό H1 τη 10η Φεβρουαρίου, 2008. Επιπρόσθετα, στατιστική ανάλυση των γεγονότων βροχής που προκάλεσαν τη δημιουργία των αντίστοιχων στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών, περιγράφονται στον Πίνακα 5.5.



Εικόνα 5. 7. Στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (9, 10, 11) και τα αντίστοιχα ημερήσια υδρομετεωρολογικά δεδομένα από όλους τους σταθμούς.

Τα απαραίτητα βροχομετρικά δεδομένα για την ανάλυση των εννέα στιγμιαίων πλημμυρικών υδρογραφημάτων, προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό M1. Η επιλογή του συγκεκριμένου μετεωρολογικού σταθμού βασίστηκε στο γεγονός ότι βρίσκεται στην ανάντη περιοχή του παραπόταμου Κεραμιώτη και κατά επέκταση τα συλλεγόμενα δεδομένα παρέχουν μια καλύτερη προσέγγιση του όγκου νερού που εισρέει στο ποτάμι.

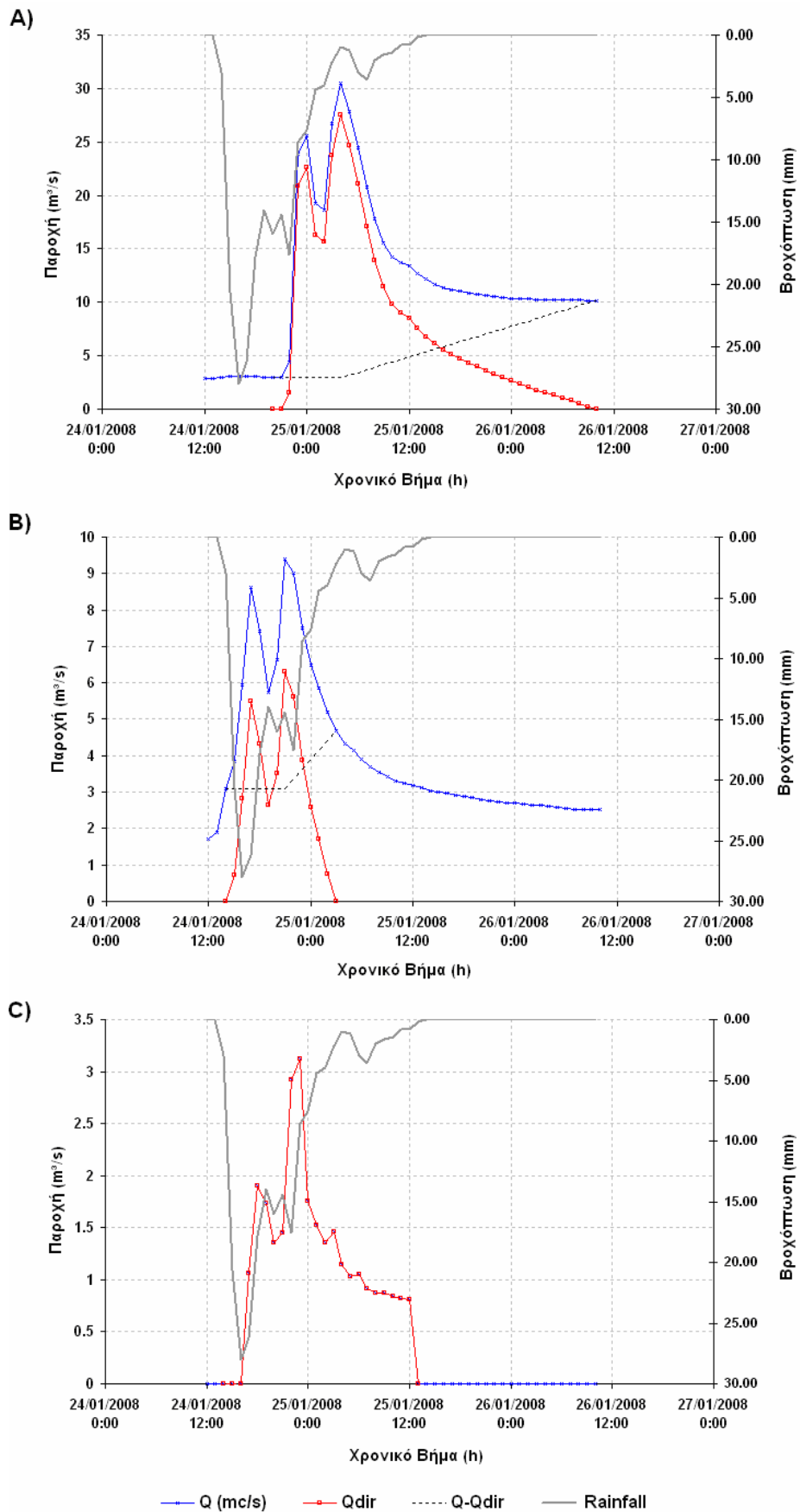
Πίνακας 5. 5. Βροχομετρικά χαρακτηριστικά των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών (9), (10) και (11).

Βροχομετρικά Χαρακτηριστικά Στιγμιαίων Πλημμυρικών Αιχμών (Σταθμός M1)	9	10	11
Συνολικό Ύψος Βροχής - [Total mean rainfall] (mm)	200	256.10	41
Διάρκεια Βροχόπτωσης - [Rainfall Duration] (h)	24	54	11
Μέση Ένταση Βροχόπτωσης - [Average Intensity] (mm/h)	8.33	4.57	3.15
Μέγιστη Ένταση Βροχόπτωσης - [Max Intensity] (mm/h)	28	13.20	5.80
Τυπική Απόκλιση - [Standard deviation] (mm)	7.44	3.43	1.8
Διακύμανση - [Variance] (mm ²)	55.35	11.76	3.24
Συντελεστής Διακύμανσης - [Coefficient of Variation] (%)	89.31	75.05	57.14

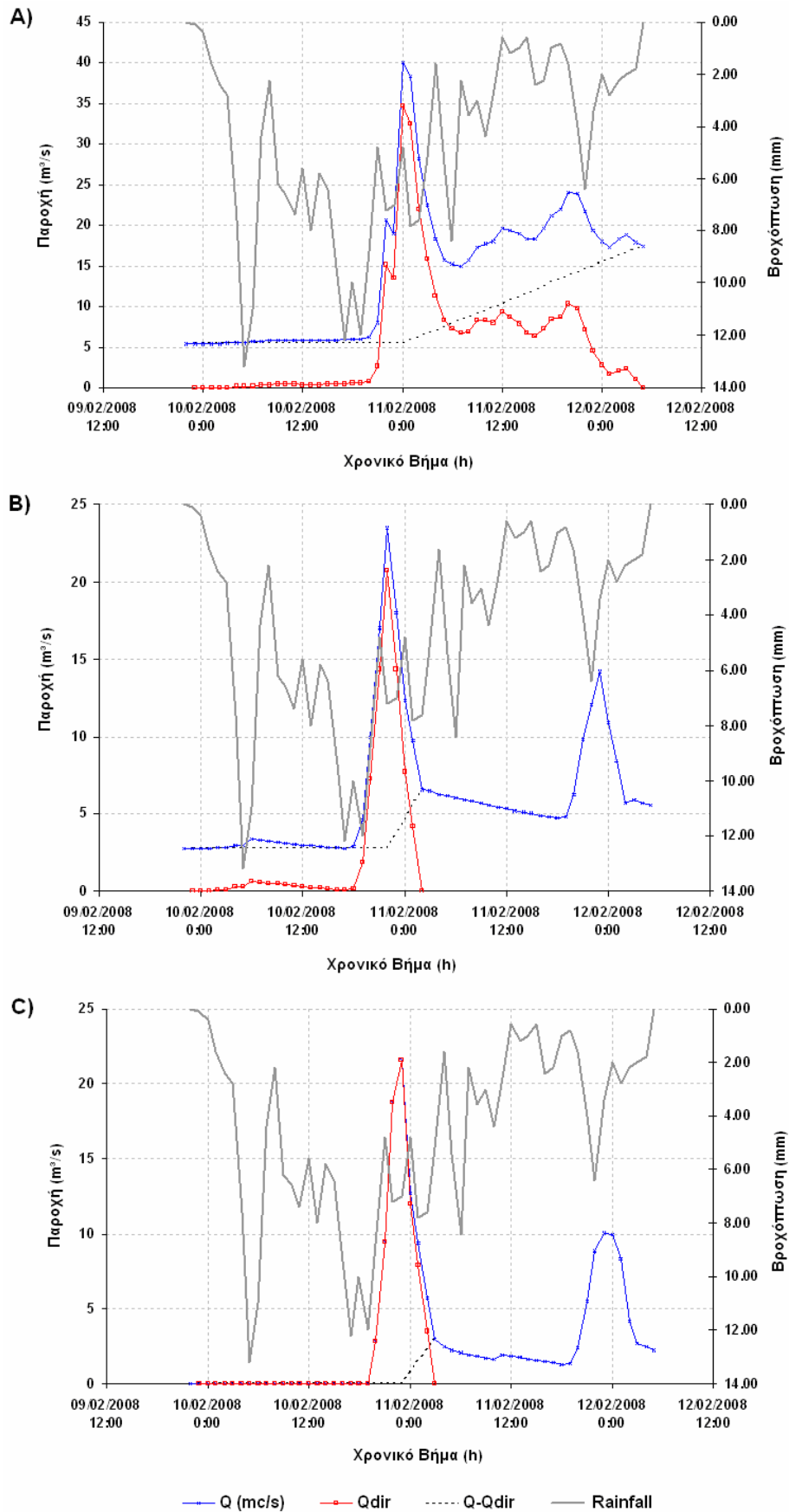
Οι Εικόνες 5.8, 5.9 και 5.10 περιγράφουν τα ωριαία πλημμυρικά υδρογραφήματα των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών 9, 10 και 11 για τους τρεις υδρομετρικούς σταθμούς. Επιπλέον στις ίδιες εικόνες περιγράφεται και η αντίστοιχη ωριαία βροχόπτωση από το μετεωρολογικό σταθμό M1 (σημειώνεται με τη γκρι συνεχή γραμμή). Τα τμήματα A και B των Εικόνων 5.8, 5.9 και 5.10 περιγράφουν τα υδρογραφήματα που προέρχονται από τους υδρομετρικούς σταθμούς H1 και H3, που καταγράφουν τα μη καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα. Αντίθετα το τμήμα C περιγράφει τα υδρογραφήματα από τον υδρομετρικό σταθμό H2, ο οποίος καταγράφει τα καρσικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα. Σε όλα τα υδρογραφήματα η παρατηρούμενη παροχή Q (σημειώνεται με μπλε γραμμή), η άμεση απορροή Q_{dir} (σημειώνεται με κόκκινη συνεχή γραμμή), και η βασική απορροή $Q - Q_{dir}$ (σημειώνεται με τη μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

Ο Πίνακας 5.5, περιγράφει τα χαρακτηριστικά των γεγονότων βροχής (σταθμός M1) που ευθύνονται για τη δημιουργία των πλημμυρικών αιχμών 9, 10 και 11. Ειδικότερα, περιγράφονται στατιστικοί παράμετροι, όπως είναι η μέση ένταση βροχόπτωσης, η τυπική απόκλιση, η διακύμανση και ο

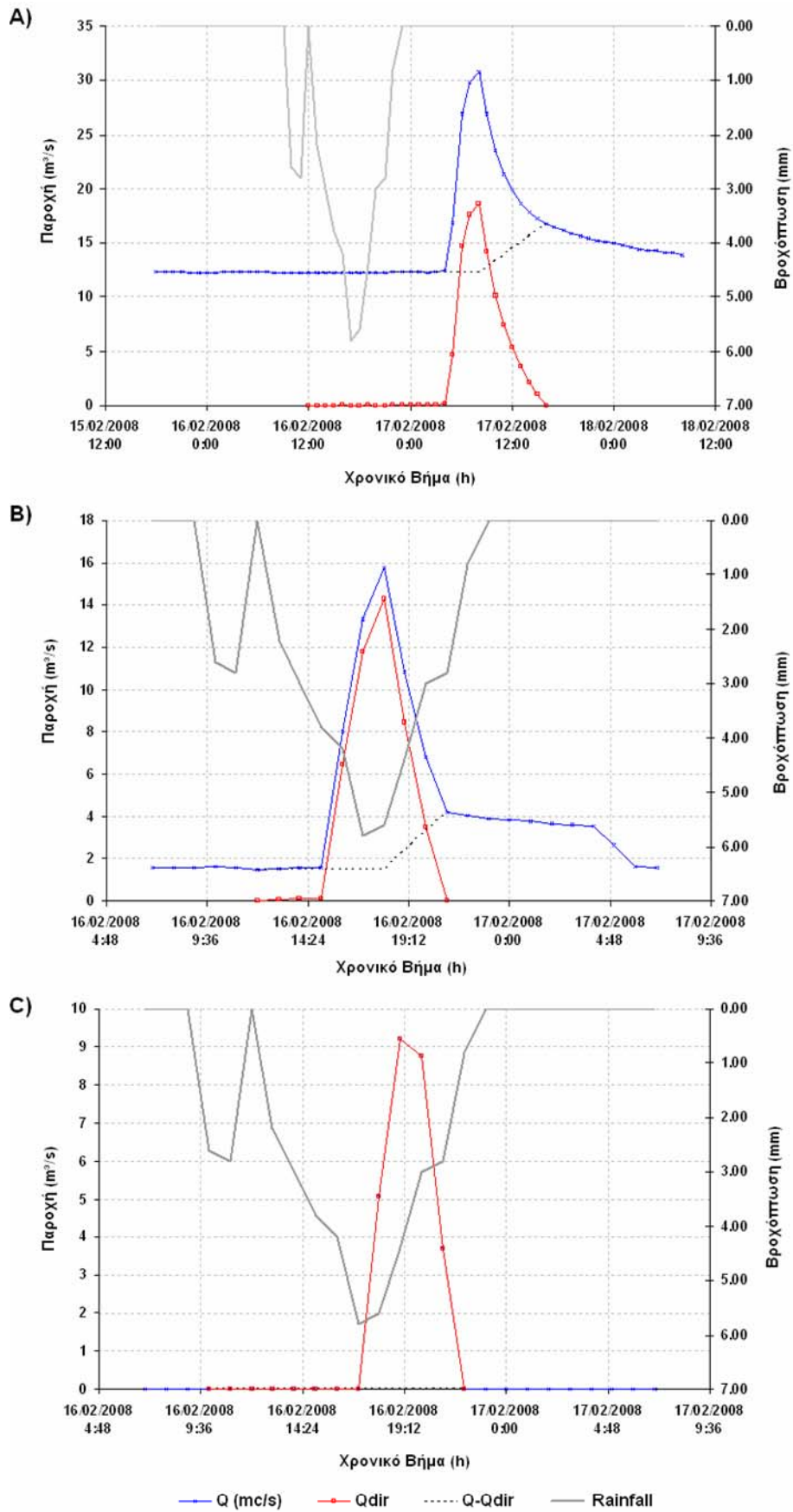
συντελεστής διακύμανσης. Αναλυτικότερα, για το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 9 το οποίο έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 24-25/01/2008, η συνολική ποσότητα βροχής προσδιορίστηκε στα 200 mm, η διάρκεια της βροχόπτωσης στις 24 ώρες, η μέση ένταση βροχής ήταν υψηλή και ίση με 8.33 mm/h, η τυπική απόκλιση ίση με 7.44 mm και ο συντελεστής διακύμανσης ίσος με 89.31%. Κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 10-12/02/2008 (πλημμυρικό γεγονός 10) η συνολική βροχόπτωση που προσδιορίστηκε στα 256.1 mm, είχε εκτεταμένη διάρκεια που έφτασε τις 54 ώρες, ενώ η μέση ένταση βροχής ήταν ίση με 4.57 mm/h. Επίσης η τυπική απόκλιση προσδιορίστηκε στα 3.43 mm και ο συντελεστής διακύμανσης στο 75.05%. Τη 16η Φεβρουαρίου, 2008 έλαβε χώρα η στιγμιαία πλημμυρική αιχμή 11, στην οποία η συνολική βροχόπτωση ήταν μικρή και ίση με 41 mm και η διάρκεια της προσδιορίστηκε στις 11 ώρες. Η μέση ένταση βροχής ήταν μικρότερη από τα δύο προηγούμενα γεγονότα βροχής και ίση με 3.15 mm/h, η τυπική απόκλιση προσδιορίστηκε στα 1.8 mm και ο συντελεστής διακύμανσης ήταν ίσος με 57.14%. Οι υδρολογικοί παράμετροι που παρέχονται από την ανάλυση των παραπάνω υδρογραφημάτων περιγράφονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.6, 5.7 και 5.8, για τους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H3 και H2.



Εικόνα 5. 8. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα 24-25/1/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς Η1, Η3, Η2.



Εικόνα 5. 9. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα 10-11/2/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς H1, H3, H2.



Εικόνα 5. 10. Ωριαία υδρογραφήματα για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που έλαβαν χώρα τη 16/2/2008 στους υδρομετρικούς σταθμούς Η1, Η3, Η2.

Υδρογραφήματα πλημμυρικής αιχμής (9), στους τρεις υδρομετρικούς σταθμούς

Όπως έχει αναφερθεί το πλημμυρικό κύμα αυξάνεται στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη (σταθμός H1), εξαιτίας της παροχής από τους δυο παραποτάμους και την εκφόρτιση των πηγών του Στύλου. Βάση αυτού το μη καρστικό στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός το οποίο καταγράφηκε στο υδρομετρικό σταθμό H1 αντιπροσωπεύει το σύνολο της επιφανειακής ροή που καταλήγει στο ποτάμιο σύστημα απο όλη τη λεκάνη απορροής. Η χρονική βάση (time base) του μελετούμενου υδρογραφήματος από τον υδρομετρικό σταθμό H1 (Εικόνα 5.8, Τμήμα Α) προσδιορίστηκε στις 41 ώρες. Ο ανιών κλάδος εμφανίζει απότομη κλίση με μέγιστη παροχή τα $30.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, η οποία και καταγράφηκε την 25η Ιανουαρίου, 2008 στις 4:00 και 9 μετά την έναρξη του πλημμυρικού γεγονότος. Η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 0.86 m. Επιπρόσθετα, ο κατιών κλάδος είχε μεγάλη διάρκεια 32 ωρών, ως αποτέλεσμα της αργής συνισφερόμενης υποεπιφανειακής ροής προερχόμενες από ιζηματογενής αποθέσεις. Η χρονική επιβράδυνση (t_p) και ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) προσδιορίστηκαν στις 11.7 και 22 ώρες αντίστοιχα. Όπως μπορούμε να δούμε στον Πίνακα 5.6, το 7.8% της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, με μια γενικότερα αργή απόκριση του συστήματος.

Η χρονική βάση (time base) του ωριαίου μη καρστικού πλημμυρικού υδρογραφήματος από τον υδρομετρικό σταθμό H3 (Εικόνα 5.8, Τμήμα Β) προσδιορίστηκε στις 16 ώρες, ενώ ο ανιών κλάδος εμφανίζει απότομη κλίση με μέγιστη παροχή που άγγιζε τα $9.4 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η συγκεκριμένη παροχή καταγράφηκε την 24η Ιανουαρίου, 2008 στις 21:00, 8 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού γεγονότος. Επίσης η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 0.80 m. Ο κατιών κλάδος είχε σχεδόν την ίδια χρονική διάρκεια με τον ανιόντα με χρονική επιβράδυνση (t_p) ίση με 0.3 ώρες και χρόνο συγκέντρωσης (t_c) ίσο με 0.5 ώρες. Η επιφανειακή απορροή προσδιορίστηκε ως το 15.8% της συνολικής βροχόπτωσης που καταγράφηκε από το μετεωρολογικό σταθμό M1.

Το υδρογράφημα του καρστικού στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος το οποίο καταγράφηκε στο σταθμό H2 ήταν σχετικά απλό καθώς δεν υπήρχε βασική απορροή (Εικόνα 5.8, Τμήμα C). Το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός διάρκεσε 20 ώρες. Η μορφή του υδρογραφήματος ήταν πολύ αιχμηρή με μικρή

χρονική βάση και απότομο ανιών κλάδο (τυπικό καρσικό πλημμυρικό υδρογράφημα). Η μοναδική διαμορφούμενη αιχμή προσέγγισε τη μέγιστη παροχή των $3.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ την 24η Ιανουαρίου, 2008 στις 23:00, 5 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού γεγονότος. Η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 0.55 m. Η χρονική επιβράδυνση (t_p) προσδιορίστηκε στις 5 ώρες, ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) έφτασε τις 8.33 ώρες, ενώ η επιφανειακή απορροή υπολογίστηκε ως το 1.3% της συνολικής βροχόπτωσης (σταθμός M1).

Υδρογραφήματα πλημμυρικής αιχμής (10), στους τρεις υδρομετρικούς σταθμούς

Σχετικά με το μη καρσικό στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός που καταγράφηκε στο σταθμό H1 η χρονική βάση (time base) του υδρογραφήματος (Εικόνα 5.9, Τμήμα Α) ήταν αρκετά μεγάλη και διάρκεσε 48 ώρες. Ο ανιών κλάδος του υδρογραφήματος ήταν απότομος με την παροχή αιχμής να φτάνει $40.1 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η συγκεκριμένη παροχή καταγράφηκε τη 11η Φεβρουαρίου, 2008 στις 00:00. Ο κατιών κλάδος διάρκεσε 27 hours, ενώ η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 1.10 m. Στο τέλος του στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος η βασική απορροή ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από ότι κατά την έναρξη του γεγονότος, ως αποτέλεσμα της αργής εκφόρτισης του συσσωρευμένου ύδατος το οποίο αποθηκεύτηκε σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής κατά τη διάρκεια του γεγονότος βροχής. Η χρονική επιβράδυνση (t_p) και ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) προσδιορίστηκαν στις 10.5 και 25 ώρες αντίστοιχα. Όπως μπορούμε να δούμε στον Πίνακα 5.7, το 8.6% της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή.

Η χρονική βάση (time base) του ωριαίου μη καρσικού πλημμυρικού υδρογραφήματος από τον υδρομετρικό σταθμό H3 (Εικόνα 5.9, Τμήμα Β) προσδιορίστηκε στις 23 ώρες, ο ανιών κλάδος του υδρογραφήματος και σε αυτήν την περίπτωση ήταν απότομος με την παροχή αιχμής να φτάνει τα $23.5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η συγκεκριμένη παροχή καταγράφηκε τη 10η Φεβρουαρίου, 2008 στις 22:00, 20 ώρες μετά την έναρξη του γεγονότος βροχής (χρόνος συγκέντρωσης). Επίσης η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 1.55 m. Ο κατιών κλάδος του υδρογραφήματος είχε σχεδόν την ίδια χρονική διάρκεια με τον ανιόντα, με χρονική επιβράδυνση (t_p) ίση με 0.1 ώρες. Ενώ η επιφανειακή απορροή προσδιορίστηκε στο 22.7% της συνολικής βροχόπτωσης (σταθμός M1).

Όσον αφορά το υδρογράφημα του στιγμιαίου καρστικού πλημμυρικού γεγονότος που δημιουργήθηκε από τα καταγραφόμενα δεδομένα του σταθμού H2 έχει την ίδια μορφή με αυτό του καρστικού πλημμυρικού γεγονότος 9, χωρίς βασική απορροή (Εικόνα 5.9, Τμήμα C). Το πλημμυρικό γεγονός διάρκεσε 9 ώρες. Η μορφή του υδρογραφήματος ήταν πολύ απότομη με μικρή χρονική βάση και απότομο ανιόντα κλάδο. Η μοναδική διαμορφούμενη αιχμή προσέγγισε τη μέγιστη παροχή των $21.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ τη 10η Φεβρουαρίου, 2008 στις 23:00, 24 ώρες μετά την έναρξη του γεγονότος βροχής (χρόνος συγκέντρωσης). Επίσης η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 0.85 m, με χρονική επιβράδυνση (t_p) ίση με 1.8 ώρες. Η επιφανειακή απορροή προσδιορίστηκε στο 6.2% της συνολικής βροχόπτωσης (σταθμός M1).

Υδρογραφήματα πλημμυρικής αιχμής (11), στους τρεις υδρομετρικούς σταθμούς

Η Εικόνα 5.10, Τμήμα A, περιγράφει το μη καρστικό στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός που καταγράφηκε από τον υδρομετρικό σταθμό H1. Σε αυτή την περίπτωση η χρονική βάση (time base) του υδρογραφήματος προσδιορίστηκε στις 27 ώρες. Ο ανιόν κλάδος εμφανίζεται απότομος, με μέγιστη παροχή αιχμής τα $30.8 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η συγκεκριμένη παροχή καταγράφηκε τη 17η Φεβρουαρίου, 2008 στις 8:00. Η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε το 1.0 m. Επίσης ο κατιών κλάδος του υδρογραφήματος είχε σχεδόν την ίδια χρονική διάρκεια με τον ανιόντα, ως αποτέλεσμα της μικρής ποσότητας ύδατος (συσσωρευμένη βροχόπτωση), το οποίο αποθηκεύτηκε στη λεκάνη απορροής. Γι' αυτό το λόγο στο τέλος του στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος η βασική απορροή είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη βασική απορροή στην αρχή του πλημμυρικού γεγονότος. Η χρονική επιβράδυνση (t_p) και ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) προσδιορίστηκαν στις 16.1 και 21 ώρες αντίστοιχα. Επίσης όπως περιγράφεται και στον Πίνακα 5.8, το 59.5% της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή.

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.10, Τμήμα B η χρονική βάση (time base) του υδρογραφήματος (σταθμός) H3 προσδιορίστηκε στις 8 ώρες. Ο ανιόν κλάδος και σε αυτήν την περίπτωση ήταν απότομος με μέγιστη παροχή αιχμής τα $15.8 \text{ m}^3/\text{sec}$, η οποία καταγράφηκε τη 16η Φεβρουαρίου, 2008 στις 18:00, 8 ώρες μετά την έναρξη του γεγονότος βροχής (χρόνος συγκέντρωσης). Επίσης η

μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε τα 0.4 m. Ο κατιών κλάδος του υδρογραφήματος είχε σχεδόν την ίδια χρονική διάρκεια με τον ανιόντα, με χρονική επιβράδυνση (t_p) ίση με 1.4 ώρες, ενώ η επιφανειακή απορροή υπολογίστηκε ως το 43.7% της συνολικής βροχόπτωσης (σταθμός M1).

Τέλος το υδρογράφημα του καρστικού στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος, το οποίο καταγράφηκε τη 16η Φεβρουαρίου, 2008 στις 19:00 από τον υδρομετρικό σταθμό H2 δεν είχε βασική απορροή (Εικόνα 5.10, Τμήμα C). Το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός διάρκεσε μόνον 4 ώρες, ενώ το σχήμα του υδρογραφήματος ήταν πολύ απότομο με πολύ μικρή χρονική βάση και σχεδόν κάθετο ανιόντα κλάδο. Το εν λόγω στιγμιαίο καρστικό γεγονός εμφανίζει μια μοναδική αιχμή με μέγιστη παροχή τα 9.2 m³/sec, η οποία καταγράφηκε 9 ώρες μετά την έναρξη του γεγονότος βροχής (χρόνος συγκέντρωσης). Η μέγιστη στάθμη νερού την ίδια χρονική στιγμή έφτασε το 0.20 m. Η χρονική επιβράδυνση (t_p) προσδιορίστηκε στις 3 ώρες και η επιφανειακή απορροή αποτέλεσε το 6.1% της συνολικής βροχόπτωσης (σταθμός M1).

Επιπλέον υδρολογικοί παράμετροι των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών 9, 10, και 11 περιγράφονται στους Πίνακες 5.6, 5.7 και 5.8, αντίστοιχα.

**Πίνακας 5. 6.Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός
24-25/1/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (9).**

Υδρομετρικός Σταθμός	H1	H3	H2
Ποτάμι – Παραπόταμος	Κοιλιάρης	Κεραμιώτης	Κεραμιώτης
Εμβαδό λεκάνης (kmq)	130	21.15	38.2
CN	60.58	64.44	55.52
S [Μέγιστη ικανότητα συγκράτησης νερού (mm)]	165.3	140.2	203.5
Ύψος Συνολικής Απορροής (mm)	15.58	31.66	2.64
Ύψος Άμεσης Απορροής (mm)	8.64	6.88	2.64
Άμεση Απορροή (10 ⁶ m ³)	1.12	0.15	0.1
Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	30.5	9.4	3.1
Άμεση Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	27.6	6.3	3.1
Ύψος Νερού Αιχμής (m)	0.86	0.8	0.55
Χρόνος Εμφάνισης Παροχής Αιχμής	25/1/2008, 4.00	24/1/2008, 21.00	24/1/2008, 23.00
Συνολικός Συντελεστής Απορροής	0.078	0.158	0.013
Συντελεστής Άμεσης Απορροής	0.043	0.034	0.013
Mq [Κέντο βάρους απορροής (h)]	20.7	9.2	14
Mr [Κέντο βάρους βροχής (h)]	8.9	8.9	8.9
T [Χρόνος άμεσης απορροής (h)]	37	13	20
tp [Χρονική επιβράδυνση (h)], [tp = Mq – Mr]	11.7	0.3	5
tc [Χρόνος Συγκέντρωσης (h)]	19	7	8.33

**Πίνακας 5. 7. Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός
10/2/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (10).**

Υδρομετρικός Σταθμός	H1	H3	H2
Ποτάμι – Παραπόταμος	Κοιλιάρης	Κεραμιώτης	Κεραμιώτης
Εμβαδό λεκάνης (km ²)	130	21.15	38.2
CN	60.58	64.44	55.52
S [Μέγιστη ικανότητα συγκράτησης νερού (mm)]	165.3	140.2	203.5
Ύψος Συνολικής Απορροής (mm)	21.96	58.03	15.87
Ύψος Άμεσης Απορροής (mm)	8.61	12.58	7.17
Άμεση Απορροή (10 ⁶ m ³)	1.12	0.27	0.27
Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	40.1	23.5	21.6
Άμεση Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	34.7	20.8	21.6
Ύψος Νερού Αιχμής (m)	1.1	1.55	0.85
Χρόνος Εμφάνισης Παροχής Αιχμής	11/2/2008, 00.00	10/2/2008, 22.00	10/2/2008, 23.00
Συνολικός Συντελεστής Απορροής	0.086	0.227	0.062
Συντελεστής Άμεσης Απορροής	0.034	0.050	0.028
M _q [Κέντο βάρους απορροής (h)]	34.6	24.3	25.9
M _p [Κέντο βάρους βροχής (h)]	24.1	24.1	24.1
T [Χρόνος άμεσης απορροής (h)]	48	23	6
t _p [Χρονική επιβράδυνση (h)], [t _p = M _q – M _p]	10.5	0.1	1.8
t _c [Χρόνος Συγκέντρωσης (h)]	25	20	24

Πίνακας 5. 8. Οι κύριοι υδρολογικοί παράμετροι για το πλημμυρικό γεγονός 16-17/2/2008, στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (11).

Υδρομετρικός Σταθμός	H1	H3	H2
Ποτάμι – Παραπόταμος	Κοιλιάρης	Κεραμιώτης	Κεραμιώτης
Εμβαδό λεκάνης (km ²)	130	21.15	38.2
CN	60.58	64.44	55.52
S [Μέγιστη ικανότητα συγκράτησης νερού (mm)]	165.3	140.2	203.5
Ύψος Συνολικής Απορροής (mm)	24.4	17.94	2.52
Ύψος Άμεσης Απορροής (mm)	2.63	7.62	2.52
Άμεση Απορροή (10 ⁶ m ³)	0.36	0.16	0.1
Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	30.8	15.8	9.2
Άμεση Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	18.6	14.3	9.2
Ύψος Νερού Αιχμής (m)	1	0.4	0.2
Χρόνος Εμφάνισης Παροχής Αιχμής	17/2/2008, 8.00	16/2/2008, 18.00	16/2/2008, 19.00
Συνολικός Συντελεστής Απορροής	0.595	0.437	0.061
Συντελεστής Άμεσης Απορροής	0.064	0.186	0.061
Mq [Κέντο βάρους απορροής (h)]	39.4	11.8	13.4
Mr [Κέντο βάρους βροχής (h)]	23.4	10.4	10.4
T [Χρόνος άμεσης απορροής (h)]	27	8	4
tp [Χρονική επιβράδυνση (h)], [tp = Mq – Mr]	16.1	1.4	3.0
tc [Χρόνος Συγκέντρωσης (h)]	21	8	9

Τα καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα τα οποία καταγράφηκα από τον υδρομετρικό σταθμό H2 είχαν μικρότερη μέγιστη παροχή αιχμής σε σχέση με τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα που καταγράφηκαν από τους άλλους δυο υδρομετρικούς σταθμούς (H1,H3). Αυτό δημιουργείται εξαιτίας του συνδυασμού της υψηλής υδροπερατότητας του καρστικού καναλιού (υδατορεύματος) και της υψηλής τιμής της μέγιστης ικανότητας συγκράτησης νερού στην καρστική περιοχή (SWS3).

Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλημμυρικού κύματος καθώς αυτό ταξιδεύει στα κατάντη. Επιπλέον στον υδρομετρικό σταθμό H2, εξαιτίας της καρστικής γεωμορφολογίας όλα τα πλημμυρικά υδρογραφήματα δεν έχουν βασική απορροή.

Επίσης ένα άλλο σημείο στο οποίο πρέπει να σταθούμε είναι ο συντελεστής απορροής. Ο συγκεκριμένος συντελεστής για τις στιγμιαίες

πλημμυρικές αιχμές 9 και 10 είναι πολύ χαμηλός, ενώ για το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 11 λαμβάνει αρκετά υψηλή τιμή, ίση με 59.5%. Η αιτία αυτού του φαινομένου σχετίζεται με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της βροχοπτώσης η οποία προκάλεσε το πλημμυρικό γεγονός και του αμέσως προηγούμενου γεγονότος βροχής. Ειδικότερα στην περίπτωση των στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων 9 και 10 το χρονικό διάστημα από το προηγούμενο γεγονός βροχής ήταν πολύ μεγάλο, γεγονός το οποίο δημιούργησε υψηλό ρυθμό διήθησης στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, όσον αφορά το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 11 το παραπάνω χρονικό διάστημα ήταν πολύ μικρότερο, γεγονός το οποίο προκάλεσε αντίστοιχα χαμηλό ρυθμός διήθησης στην επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας με τη σειρά του υψηλό συντελεστή επιφανειακής απορροής.

Επίσης όπως περιγράφεται στους Πίνακες 5.6, 5.7, και 5.8, ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) των πλημμυρικών αιχμών για τον υδρομετρικό σταθμό H1, σε όλες τις περιπτώσεις, είναι πάνω από 19 ώρες, χρόνος επαρκής για την πρόβλεψη, την αποτροπή του κινδύνου και τη μείωση των συνεπειών από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό γεγονός στα κατάντη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Είναι φανερό ότι ο προσδιορισμός του χρόνου συγκέντρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την πρόβλεψη των στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων. Για το λόγο αυτό, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να μελετήσουμε τη σχέση μεταξύ του χρόνου συγκέντρωσης (t_c) και των βροχοπτώσεων, που προκαλούν τις αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές.

Ο Πίνακας 5.5, περιγράφει τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων που προκάλεσαν τη δημιουργία των τριών στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών. Τα τρία αυτά μελετούμενα γεγονότα βροχής διαφέρουν ως προς τη ποσότητα της βροχοπτώσης, τη διάρκεια και τη μέση ένταση αυτής. Πιο αναλυτικά, η βροχοπτώση που προκάλεσε το πλημμυρικό γεγονός (9) παρουσίασε υψηλή τιμή συνολικής ποσότητας βροχής, μέτρια διάρκεια και πολύ υψηλή ένταση. Η βροχοπτώση που δημιούργησε το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός (10) παρουσίασε πολύ υψηλό όγκο βροχής, υψηλή διάρκεια και μέση ένταση. Τέλος όσον αφορά τη βροχοπτώση που προκάλεσε το πλημμυρικό γεγονός (11) εμφάνισε χαμηλό όγκο βροχής, χαμηλή διάρκεια και μέση ένταση.

Συνοψίζοντας την παραπάνω ανάλυση συμπεραίνουμε ότι, όταν η ένταση βροχής είναι πολύ υψηλή (σταθμός M1), ο χρόνος συγκέντρωσης μιας επικείμενης πλημμυρικής αιχμής μειώνεται. Όταν όμως η ένταση της

βροχόπτωσης είναι μεσαίου ή μικρού μεγέθους, ο χρόνος συγκέντρωσης σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια της βροχόπτωσης, (όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της βροχόπτωσης τόσο αυξάνεται και ο χρόνος συγκέντρωσης για ένα επερχόμενο πλημμυρικό γεγονός στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη).

5.7. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΤΙΓΜΙΑΙΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΙΧΜΩΝ

Σε πολύπλοκες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής αποτελούμενες από καρστικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, η έκταση την οποία καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής θα πρέπει να καθορίζεται όχι μόνον από την επιφανειακή μορφολογία (τοπογραφία) της λεκάνης απορροής αλλά και από την αντίστοιχη υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης (Bakalowicz, 2005).

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απρόβλεπτη συμπεριφορά των στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων, κάνει την πρόβλεψη αυτών ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα. Το κλειδί στην πρόβλεψη των στιγμιαίων πλημμυρών είναι η γρήγορη αναγνώριση του κινδύνου όταν η παροχή αιχμής ενός στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος πλησιάζει ή βρίσκεται πάνω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο - ανώτερο κατώφλι (threshold level) (Lin, 1999). Το συγκεκριμένο κατώφλι, σε προκαθορισμένο σημείο του ποτάμιου συστήματος, προσδιορίζεται ως το ύψος ύδατος ή πλημμυρική παροχή, που όταν το επικείμενο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός υπερβεί, θα εμφανιστεί πλημμυρικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης (bankfull flash flood).

Βάση αυτού, η πρόβλεψη των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών δεν απαιτεί τη χρήση ενός πολύπλοκου μοντέλου (Lin, 1999). Πέραν όμως του καθορισμού της πλημμυρικής παροχής θα πρέπει επίσης να καθοριστεί το ανώτερο επιπέδο-κατώφλι βροχόπτωσης (rainfall threshold), το οποίο μπορεί να δημιουργήσει στιγμιαία πλημμυρική αιχμή ίση ή μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη πλημμυρική παροχή. Το συγκεκριμένο επίπεδο - κατώφλι βροχόπτωσης εξαρτάται από την ποσότητα και τη διάρκεια του γεγονότος βροχής, καθώς επίσης από τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας πριν την έναρξη της βροχόπτωσης (Norbiato et al., 2008). Με βάση τα παραπάνω, όταν η καταγραφή ενός επερχόμενου γεγονότος βροχής ξεπεράσει το ανώτερο κατώφλι βροχόπτωσης, γίνεται η αναγνώριση του κινδύνου και κατά επέκταση η πρόβλεψη ενός επερχόμενου καταστροφικού πλημμυρικού γεγονότος. Στην

επόμενη ενότητα θα γίνει λεπτομερή ανάλυση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών.

5.8. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΡΟΠΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Ο πιο καθοριστικός παράγοντας στη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων σε μικρές λεκάνες απορροής με σύνθετη γεωμορφολογία είναι: η ένταση της βροχόπτωσης, ο υψηλός συνολικός όγκος βροχής και οι συνθήκες εδαφικής υγρασίας πριν την έναρξή του γεγονότος βροχής (Camarasa Belmonte and Segura Beltran, 2001; Carmi and Berliner, 2008). Αναλυτικότερα γνωρίζοντας τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας πριν την έναρξή του γεγονότος βροχής και την ποσότητα βροχής που συσσωρεύεται για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα π.χ. (0.5, 1, 2, 3, 4.....24 h) στο μετεωρολογικό σταθμό M1, θα έχουμε τη δυνατότητα να προβλέψουμε τον κίνδυνο πλημμυρικού φαινομένου στα κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη.

Το μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης και αποτροπής πλημμυρικού κινδύνου που αναπτύσσεται παρακάτω βασίζεται σε δυο κύριες συνθήκες:

- α) Στα βροχομετρικά δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού M1 και
- β) Στις ιδιαίτερες συνθήκες παροχής του παραπόταμου Κεραμιώτη.

Αναλυτικότερα:

A) Η επιλογή του μετεωρολογικού σταθμού M1 πραγματοποιήθηκε για τους εξής λόγους:

- 1) Ο μετεωρολογικός σταθμός M1 βρίσκεται στο πάνω ρου του παραπόταμου Κεραμιώτη και ουσιαστικά γειτνιάζει με τις πηγές τροφοδοσίας του.
- 2) Με βάση την υδρολογική ανάλυση που προηγήθηκε (Ενότητα 5.6), ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή της έναρξης της βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό M1 μέχρι τη συγκέντρωση του νερού στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη (χρόνος συγκέντρωσης), είναι ικανοποιητικός προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα προειδοποίησης των αρμόδιων φορέων και των κατοίκων των περιοχών που ενδεχομένως να πληγούν από ένα πλημμυρικό φαινόμενο τις επόμενες ώρες. Αυτός ο χρόνος σύμφωνα με την υδρογραφική ανάλυση που προηγήθηκε είναι πάνω από 19 ώρες.

3) Τα μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό M1 μεταφέρονται τηλεμετρικά σε κεντρικό υπολογιστικό σύστημα του Πολυτεχνείου Κρήτης (Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος - Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής). Έτσι υπάρχει η δυνατότητα της άμεσης και σε πραγματικό χρόνο γνώσης των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή (σταθμός M1) και κατά επέκταση της βροχοπτώσης που συσσωρεύεται σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα.

B) Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παραπόταμου διαλείπουσας ροής Κεραμιώτη, τα οποία μπορούν να συμβάλουν καταλυτικά ή μη στη δημιουργία πλημμυρικού φαινομένου στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη. Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω:

1) Όπως προαναφέραμε για το ίδιο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός ο παραπόταμος Κεραμιώτης εμφανίζει να έχει μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και να μεταφέρει μεγαλύτερο όγκο ιζήματος σε σχέση με τον παραπόταμο Αναβρετή. Με βάση αυτή τη διαπίστωση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παραπόταμου Κεραμιώτη συμβάλουν στη δημιουργία: α) υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς νερού στα κατάντη της λεκάνης απορροής, β) φαινομένων διάβρωσης της κοίτης στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη και γ) αυξημένων ποσοτήτων φερτών υλών που μεταφέρονται και αποτίθενται στα κατάντη τμήματα του ποταμού.

2) Ένα μεγάλο τμήμα του παραπόταμου Κεραμιώτη διασχίζει την υπολεκάνη SWS 4 (φαράγγι Δίκταμος) η οποία διαθέτει καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο και κατ' επέκταση μεγάλη διηθητικότητα. Η ιδιαίτερη μορφολογία του συγκεκριμένου τμήματος του παραπόταμου δημιουργεί ιδιαίτερες συνθήκες παροχής στην έξοδο του καρστικού τμήματος του ποταμού και κατά επέκταση κάνει δύσκολη την πρόβλεψη του πλημμυρικού κινδύνου στα κατάντη.

5.8.1. Προσδιορισμός πλημμυρικής παροχής (Flooding flow)

Προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών, είναι απαραίτητο να ορίσουμε την πλημμυρική παροχή (Flooding flow), ως την παροχή εκείνη η οποία εμφανίζεται όταν οι όχθες του υδατορεύματος είναι πλήρως καλυμμένες με νερό (Carpenter et al., 1999). Παροχές ίσες ή υψηλότερες από την προαναφερόμενη πλημμυρική παροχή δύναται να προκαλέσουν μικρές ή μεγάλες καταστροφές (υποδομές – καλλιέργειες) και απώλειες ανθρώπινων ζώων. Η εν λόγω πλημμυρική παροχή

προσδιορίστηκε για τον υδρομετρικό σταθμό H1, μιας και αυτός βρίσκεται στο σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων, καθώς επίσης και λόγω του ότι η περιοχή από τον υδρομετρικό σταθμό H1 ως τις εκβολές του ποταμού (κατάντη περιοχή) έχει σχεδόν επίπεδο ανάγλυφο με πολύ μικρή εδαφική κλίση. Προκειμένου να προσδιορίσουμε την πλημμυρική παροχή εφαρμόσαμε και συγκρίναμε δυο τεχνικές:

A) Η εφαρμογή της καμπύλης στάθμης - παροχής. Η καμπύλη στάθμης παροχής αποτελεί την καλύτερη ένδειξη της διάταξης ροής του υδατορεύματος για μια συγκεκριμένη διατομή ελέγχου. Η καμπύλη στάθμης παροχής παραμένει κατά προσέγγιση σταθερή συναρτήσει του χρόνου, υπό την προϋπόθεση ότι η γεωμετρία και η τραχύτητα της διατομής μετρήσεων δεν μεταβάλλονται από φαινόμενα διαβρώσεων και αποθέσεων της κοίτης και των πρηνών του υδατορεύματος. Στην περίπτωση του υδρομετρικού σταθμού H1, μετά από συνεχείς μετρήσεις, τόσο σε υψηλές και μεσαίες όσο και σε χαμηλές παροχές, προέκυψε η καμπύλη στάθμης - παροχής, η οποία συνίσταται από δύο επιμέρους καμπύλες, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2.:

i) Όταν η στάθμη (H), στο υδρομετρικό σταθμό H1, είναι μικρότερη ή ίση με 0.4 m τότε η παροχή (Q) του υδατορεύματος στην περιοχή του υδρομετρικού σταθμού H1, προκύπτει από την εξίσωση:

$$Q = 7 \times H^{2.1}, \quad (5.15)$$

ii) Όταν η στάθμη (H) είναι μεγαλύτερη από 0.4m τότε η παροχή (Q) του υδατορεύματος στην περιοχή του υδρομετρικού σταθμού H1, προκύπτει αντίστοιχα από την εξίσωση:

$$Q = 29.54 \times H - 10.782, \quad (5.16)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και γνωρίζοντας ότι το υδραυλικό βάθος της διατομής (σταθμός H1) πλήρως καλυμμένης με νερό είναι ίσο με 3.4m, η αντίστοιχη πλημμυρική παροχή, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.16) θα είναι $Q_{\text{flood_A}} = 92.6 \text{ m}^3/\text{sec}$.

B) Σε πολλές όμως περιπτώσεις οι τιμές μετρήσεων των παραμέτρων Q και H που αντιστοιχούν σε πλημμυρικά γεγονότα είναι σχετικά μειωμένης ακριβείας λόγω της δυσκολίας των μετρήσεων της ταχύτητας ροής, σε πολύ υψηλές παροχές (Τσακίρης 1995). Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε και μια δεύτερη τεχνική προκειμένου να προσδιορίσουμε την πλημμυρική παροχή

στον υδρομετρικό σταθμό Η1. Η δεύτερη αυτή τεχνική χρησιμοποιεί την παρακάτω εμπειρική εξίσωση (Carpenter et al., 1999):

$$Q_{flood_B} = \frac{B_b \times D_b^{5/3} \times S_c^{0.5}}{n}, \quad (5.17)$$

Όπου:

Q_{flood_B} = Πλημμυρική παροχή, στον υδρομετρικό σταθμό Η1, (m³/sec)

B_b = Πλάτος της άνω διατομής του υδατορεύματος πλήρως καλυμμένου με νερό, (m)

D_b = Υδραυλικό βάθος της πλήρους καλυμμένης διατομής με νερό, (m)

S_c = Τοπική κλίση του υδατορεύματος, (αδιάστατη)

n = Συντελεστής τραχύτητας Manning's.

Είναι φανερό ότι η πλημμυρική παροχή στην Εξίσωση (5.17) προσδιορίζεται από τη γεωμετρία της διατομής του υδατορεύματος και το συντελεστή τραχύτητας Manning's. Οι Georgakakos et al. (1991) βασιζόμενοι στα δεδομένα του Jarrett (1984), παρουσίασαν μια εξίσωση προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας Manning's (για $n > 0.035$) σε συνάρτηση της τοπικής κλίσης του υδατορεύματος S_c και του υδραυλικού βάθους D_b :

$$n = \frac{0.43 \times S_c^{0.37}}{D_b^{0.15}}, \quad (5.18)$$

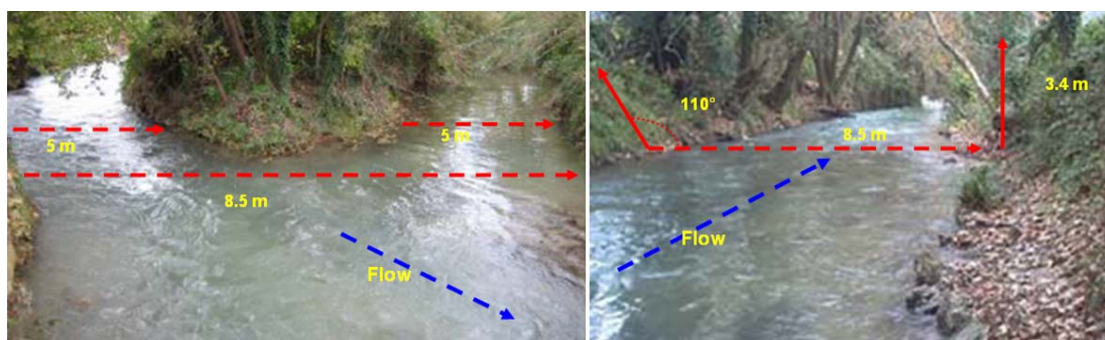
Η Εξίσωση 5.18, μπορεί να εφαρμοστεί στον ποταμό Κοιλιάρη (υδρομετρικός σταθμός Η1), ο οποίος χαρακτηρίζεται ως φυσικό υδατόρευμα (καλυπτόμενο από φυσική βλάστηση) με συντελεστή τραχύτητας $n > 0.035$.

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η γεωμετρία της διατομής του ποταμού Κοιλιάρη στο σημείο που έχει εγκατασταθεί ο υδρομετρικός σταθμός Η1. Σύμφωνα με τη γεωμετρία της διατομής (τραπεζοειδή μορφή) και εφαρμόζοντας τις Εξισώσεις 5.17 και 5.18, προκύπτει η πλημμυρική παροχή για τον υδρομετρικό σταθμό Η1 και κατά επέκταση για την κατάντη περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη. (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5. 9. Γεωμετρία - Πλημμυρική παροχή, υδρομετρικός σταθμός Η1.

Υδρομετρικός σταθμός	Bb (m)	Db (m)	Sc (%)	n	Q_{flood_B} (m ³ /sec)
H1	9.39	3.4	0.0025	0.0389	92.017

Συγκρίνοντας την πλημμυρική παροχή στο σταθμό H1 από την εφαρμογή των δυο παραπάνω τεχνικών, [$Q_{\text{flood_A}} = 92.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (πρώτη τεχνική) και $Q_{\text{flood_B}} = 92.017 \text{ m}^3/\text{sec}$ (δεύτερη τεχνική)], προκύπτει ότι η τιμή της τελικής προσδιοριζόμενης πλημμυρικής παροχής για τον υδρομετρικό σταθμό H1 είναι και για τις δυο τεχνικές σχεδόν η ίδια. Για λόγους όμως ασφάλειας, θα επιλέξουμε ως πλημμυρική παροχή για τον υδρομετρικό σταθμό H1 τη μικρότερη εκ των δυο. Ορίζουμε λοιπόν, ως πλημμυρική παροχή στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη παροχή ίση ή μεγαλύτερη της $Q_{\text{flood}} = 92.017 \text{ m}^3/\text{sec}$.



Εικόνα 5. 11. Γεωμετρία διατομής του ποταμού Κοιλιάρη στο σημείο που έχει εγκατασταθεί ο υδρομετρικός σταθμός H1.

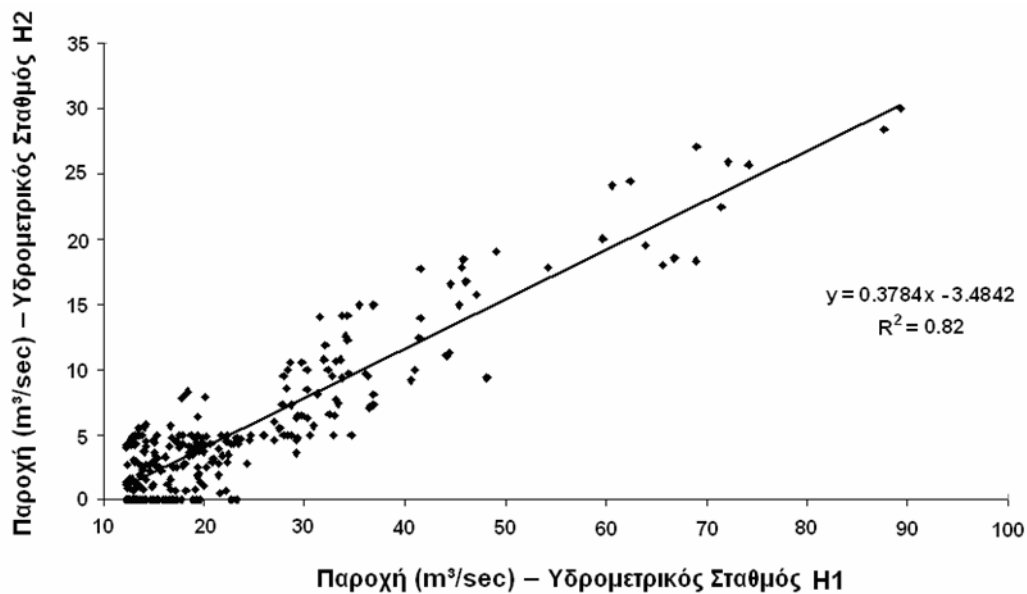
Με βάση τις ωριαίες παροχές που προέκυψαν μετά τη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου HSPF για τα έτη 2006-2008 (Kourgialas et al., 2008 και Kourgialas et al., 2010), προσδιορίστηκε η ωριαία γραμμική συσχέτιση μεταξύ των υψηλών παροχών του υδρομετρικού σταθμού H2 και αυτών του υδρομετρικού σταθμού H1, (Εικόνα 5.12). Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των ωριαίων υψηλών παροχών στους δυο υδρομετρικούς σταθμούς H1 και H2 περιγράφεται με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$Q_{(H2)} = 0.3784 \times Q_{(H1)} - 3.4842, \quad R^2 = 0.82, \quad (5.19)$$

Όπου:

$Q_{(H2)}$ = Παροχή στον υδρομετρικό σταθμό H2,

$Q_{(H1)}$ = Παροχή στον υδρομετρικό σταθμό H1.



Εικόνα 5. 12. Ωριαία γραμμική συσχέτιση μεταξύ υψηλών παροχών (υδρομετρικός σταθμός Η2 και υδρομετρικός σταθμός Η1).

Λαμβάνοντας υπόψη μας την πλημμυρική παροχή στο υδρομετρικό σταθμό Η1 (92.017 m³/sec) και χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (5.19), προκύπτει η αντίστοιχη παροχή στον υδρομετρικό σταθμό Η2, η οποία είναι ίση με 31.335 m³/sec.

Σύμφωνα με την Εξίσωση (5.19), όταν η παροχή στον υδρομετρικό σταθμό Η2 υπερβεί την τιμή των 31.335 m³/sec, η παροχή στον υδρομετρικό σταθμό Η1 θα είναι ίση ή μεγαλύτερη από 92.017 m³/sec. Με άλλα λόγια όταν η παροχή στον υδρομετρικό σταθμό Η2 υπερβεί την τιμή των 31.335 m³/sec, τότε στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη υπάρχει άμεσος κίνδυνος πλημμυρικής παροχής και κατά επέκταση δημιουργίας πλημμυρικού φαινομένου. Προκειμένου να βρούμε τη συνολική ποσότητα βροχόπτωσης (cumulative rainfall) σε σχέση με τη χρονική περίοδο ενός γεγονότος βροχής (μετεωρολογικός σταθμός Μ1), ικανή να δημιουργήσει επιφανειακή απορροή στην έξοδο του καρστικού τμήματος του παραπόταμου Κεραμιώτη (υδρομετρικός σταθμός Η2) ίση ή μεγαλύτερη από 31.335 m³/sec, θα ακολουθήσουμε την ακόλουθη μεθοδολογία:

5.8.2. Δημιουργία καμπυλών μέγιστης επιτρεπτής έντασης βροχής για την αποτροπή πλημμυρικού κινδύνου

Στο καρστικό τμήμα του παραπόταμου Κεραμιώτη, κατά την έναρξη της βροχόπτωσης όλη σχεδόν η ποσότητα βροχής χάνεται μέσα στο καρστικό κανάλι, λόγω του υψηλού ρυθμού διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής. Η επιφανειακή απορροή σε αυτό το κομμάτι του ποταμού ξεκινάει μόνο όταν η ικανότητα εδαφικής απορρόφησης φτάσει στο ανώτερο επίπεδο - κατώφλι [(threshold soil absorption level (P_0)], το οποίο καθορίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις, (Camarasa and Tilford, 2002):

$$\sum E = 0 \quad \text{για} \quad \sum P \leq P_0, \quad (5.20)$$

$$\sum E = \frac{(\sum P - P_0)^2}{\sum P + 4P_0} \quad \text{για} \quad \sum P > P_0, \quad (5.21)$$

$$i = \frac{(\sum P - P_0)^2}{t_R \times (\sum P + 4P_0)} \quad \text{για} \quad \sum P > P_0, \quad (5.22)$$

Όπου:

$\sum E$ = Αποτελεσματική βροχόπτωση (mm), και

$\sum P$ = Συνολική βροχόπτωση (cumulative rainfall) από την έναρξη της βροχόπτωσης (mm),

P_0 = Κατώφλι επιφανειακής απορροής (mm).

Εάν διαιρεθούν και τα δύο τμήματα της Εξίσωσης (5.21), με τη διάρκεια της αποτελεσματικής βροχόπτωσης (t_R) δημιουργείται η Εξίσωση (5.22), στην οποία ορίζουμε ως (i) την αποτελεσματική ένταση βροχόπτωσης (mm/h).

Σημαντικές αντιθέσεις εμφανίζουν τα όρια - κατώφλια επιφανειακής απορροής σε σχέση με τα διαφορετικά λιθολογικά περιβάλλοντα, καταδεικνύοντας έτσι τη σημασία του υποστρώματος στη διαδικασία της διήθησης. Καρστικά γεωλογικά πετρώματα επιτρέπουν υψηλό ρυθμό διήθησης, ενώ συνεκτικές δομές (ύλης, πηλός), δημιουργούν χαμηλό ρυθμό διήθησης άρα σημαντικές ποσότητες επιφανειακής απορροής (Camarasa and Tilford, 2002; Keppel and Renard, 1962).

Επίσης διαφορετικές τιμές στα όρια - κατώφλια επιφανειακής απορροής παρατηρούνται για διαφορετικά πλημμυρικά γεγονότα στην ίδια λεκάνη απορροής σε σχέση με τον εποχιακό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής (P_0) εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή κατά τη διάρκεια των χειμερινών - φθινοπωρινών μηνών, ακολουθούν οι ανοιξιάτικοι, ενώ τις μικρότερες τιμές εμφανίζουν οι καλοκαιρινοί μήνες. Το παραπάνω, αν και φαινομενικά αντιφατικό, πιθανόν σχετίζεται με τον τύπο της βροχόπτωσης και τη συμπεριφορά του εδάφους. Τους καλοκαιρινούς - ανοιξιάτικους μήνες οι βροχοπτώσεις συνήθως εμφανίζουν έντονο και σποραδικό χαρακτήρα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμοί με τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης της εδαφικής θερμότητας και την παρατηρούμενη σε μερικές περιπτώσεις υδροφοβική συμπεριφορά του εδάφους ίσως να αλλάζουν την εδαφική δομή με αποτέλεσμα την πιο γρήγορη υπέρβαση της διηθητικής ικανότητας και τη δημιουργία Hortonian's απορροής. Όσον αφορά τους φθινοπωρινούς - χειμωνιάτικους μήνες συνήθως οι βροχοπτώσεις έχουν μικρότερη ένταση αλλά μεγαλύτερη διάρκεια, γεγονός που βοηθάει το σύστημα να ανταποκριθεί πιο σταδιακά (Camarasa Belmonte, A.M. and Segura Beltran, F., 2001).

Η ποσοτικοποίηση του ορίου (P_0), κάτω από το οποίο επιφανειακή απορροή δεν υφίσταται, καθορίζει την ποσότητα της βροχόπτωσης (μετεωρολογικός σταθμός M1) που απαιτείται για να δημιουργηθεί επιφανειακή απορροή στον υδρομετρικό σταθμό H2. Ο προσδιορισμός του όρου (P_0), πραγματοποιήθηκε με βάση τη γραμμική σχέση μεταξύ της συνολικής βροχόπτωσης για ένα γεγονός βροχής και της αντίστοιχης επιφανειακής απορροής, σε ωριαία βάση, σύμφωνα με τη μέθοδο των Osborn και Lane (1969). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη γενική εξίσωση:

$$Q = a \times P \pm b \quad (5.23)$$

Όπου:

Q = Επιφανειακή απορροή,

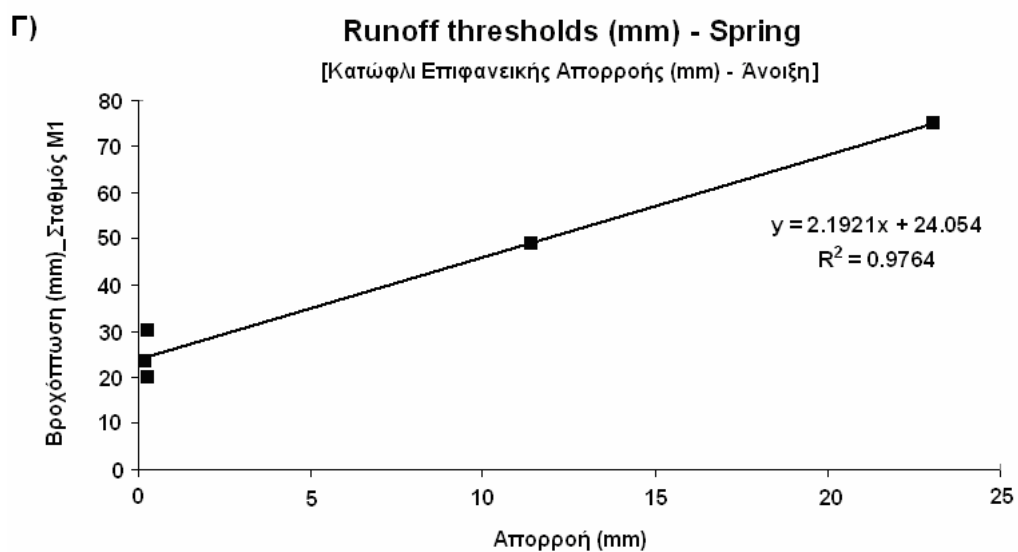
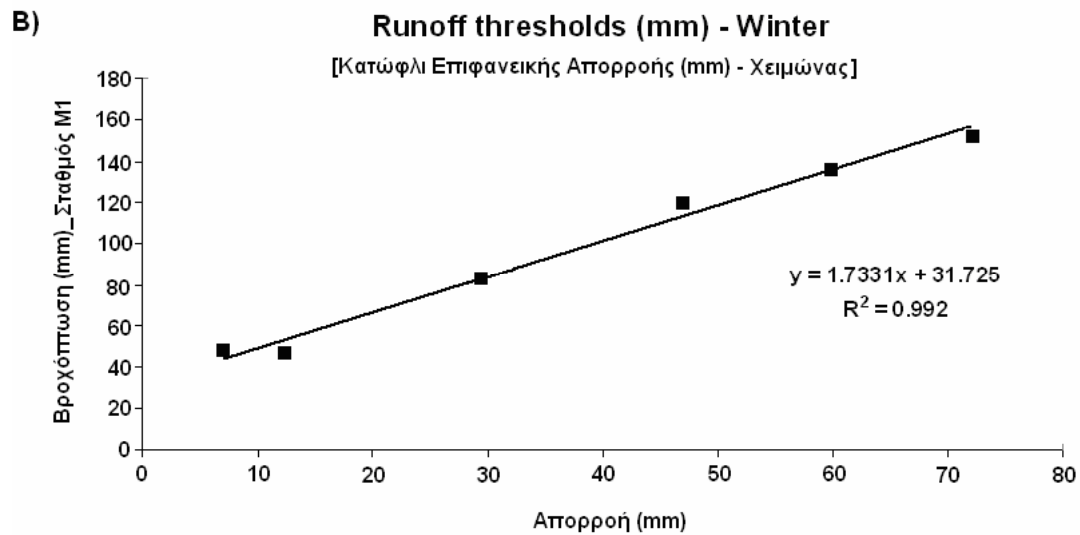
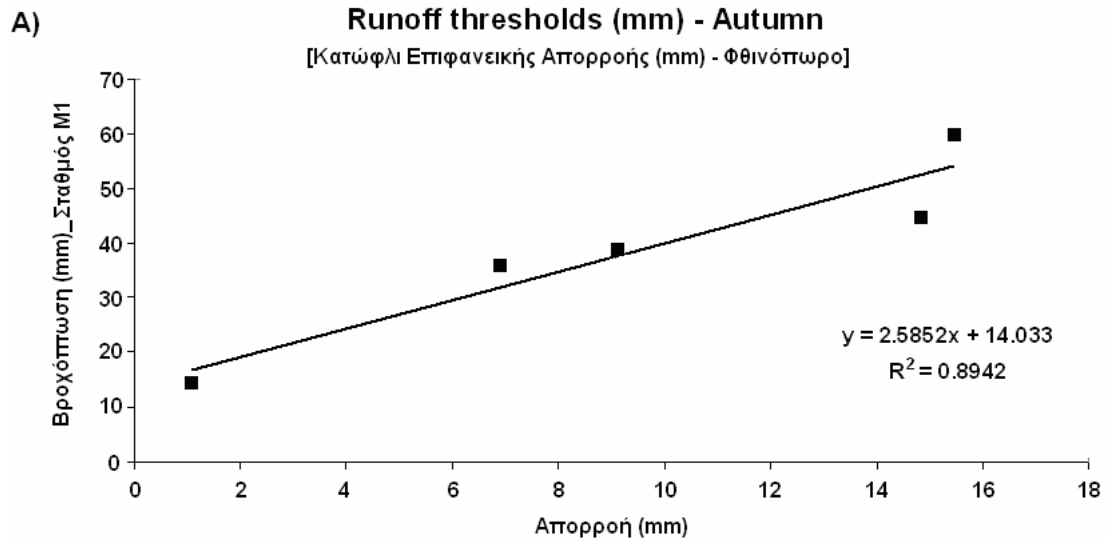
P = Συνολική βροχόπτωση, και

a, b = αριθμητικές τιμές, που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά της ευθείας.

Θέτοντας $Q=0$ και επιλύοντας ως προς (P) βρίσκουμε την ποσότητα (P_0).

Σύμφωνα με την Εξίσωση (5.23) και προκειμένου να προσδιορίσουμε το συντελεστή (P_0), στον υδρομετρικό σταθμό H2, προσδιορίσαμε την ωριαία γραμμική σχέση μεταξύ συνολικής βροχόπτωσης (μετεωρολογικός σταθμός M1) και της αντίστοιχης επιφανειακής απορροής στον υδρομετρικό σταθμό H2 (έξοδος φαραγγιού Δίκταμος). Η παραπάνω συσχέτιση εφαμνόστηκε ξεχωριστά για κάθε μια από τις τρεις εποχές (φθινόπωρο – χειμώνα – άνοιξη), διότι τους καλοκαιρινούς μήνες δεν υπάρχει επιφανειακή απορροή. Η Εικόνα 5.13 (Α, Β και Γ) περιγράφει τη γραμμική σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής η οποία καταγράφηκε για τις τρεις παραπάνω εποχές. Με τον παραπάνω τρόπο ο όρος (P_0) προσδιορίστηκε στην έξοδο του καρστικού φαραγγιού (σταθμός H2). Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την Εικόνα 5.13 (Α, Β και Γ) για να έχουμε επιφανειακή απορροή στην έξοδο του καρστικού φαραγγιού (σταθμός H2) θα πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω:

- Το φθινόπωρο, στο μετεωρολογικό σταθμό M1, το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (rainfall event) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την τιμή $P_{0_Autumn} = 14.033 \text{ mm}$,
- Το χειμώνα, στο μετεωρολογικό σταθμό M1, το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (rainfall event) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την τιμή $P_{0_Winter} = 31.725 \text{ mm}$, και
- Την άνοιξη, στο μετεωρολογικό σταθμό M1, το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (rainfall event) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την τιμή $P_{0_Spring} = 24.054 \text{ mm}$.



Εικόνα 5. 13 Α, Β και Γ. Γραμμικές σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή P_0 , για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου.

Σύμφωνα με την Εξίσωση (5.22), γνωρίζοντας το κατώφλι επιφανειακής απορροής (P_0) και την αποτελεσματική ένταση βροχόπτωσης (i) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μπορούμε να προσδιορίσουμε το συνολικό ύψος βροχής ($\sum P$), που απαιτείται, για να δημιουργηθεί επιφανειακή απορροή (Q_{peak}) ίση ή μεγαλύτερη των 31.335 m³/sec στην έξοδο του καρστικού καναλιού (υδρομετρικός σταθμός Η2). Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τη συνολική ποσότητα βροχής (μετεωρολογικός σταθμός Μ1) κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος, ικανή να δημιουργηθεί στην έξοδο του καρστικού καναλιού επιφανειακή απορροή ίση ή μεγαλύτερη των 31.335 m³/sec, η οποία με τη σειρά της θα μπορούσε να δημιουργήσει πλημμυρικά φαινόμενα στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη.

Η μαθηματική σχέση η οποία συνδέει την επιφανειακή απορροή (Q_{peak}) στον υδρομετρικό σταθμό Η2, με την αποτελεσματική ένταση βροχόπτωσης (i), στο μετεωρολογικό σταθμό Μ1, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (Carpenter et al., 1999):

$$Q_{peak} = \frac{2.42 \times i \times t_R \times A}{\Pi^{0.4} \times (1 - 0.218 \times t_R / \Pi^{0.4})} \quad (5.24)$$

Όπου (Π) ορίζεται ως:

$$\Pi = \frac{L^{2.5}}{i \times A \times R_L \times a^{1.5}} \quad (5.25)$$

Όπου η παράμετρος (a) εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a = \frac{S_c^{0.5}}{n \times B^{2/3}} \quad (5.26)$$

Όπου:

A = Εμβαδό της υπολεκάνης απορροής (Km²),

t_R = Διάρκεια της αποτελεσματικής βροχόπτωσης ανά ώρα (duration of effective rainfall (h)),

L = Μήκος του κύριου ρου του ποταμού (Km),

i = Αποτελεσματική ένταση βροχόπτωσης (cm/h),

R_L = Horton's length ration (αδιάστατο),

S_c = Τοπική κλίση του υδατορεύματος (αδιάστατη),

n = Συντελεστής τραχύτητας Manning's, και

B = το ανώτερο πλάτος το ποταμού (m).

Προκειμένου να βρούμε το συντελεστή R_L για τον παραπόταμο Κεραμιώτη, εφαρμόζουμε την παρακάτω εξίσωση (Tarboton, 1996):

$$R_L = \frac{L_w}{L_{w-1}} \quad (5.27)$$

Όπου:

L_w = Μέσο μήκος των υδατορευμάτων, του παραπόταμου Κεραμιώτη (Km), και

w = Stream order (αρίθμηση των διακλαδώσεων του παραπόταμου Κεραμιώτη).

Η παράμετρος (w), μπορεί να υπολογιστεί με βάση το σύστημα αρίθμησης Strahler (αριθμητική μέτρηση της πολυπλοκότητας των κλάδων του ποτάμιου συστήματος), (Strahler, 1952). Για τον παραπόταμο Κεραμιώτη, η παράμετρος (w), σύμφωνα με το σύστημα αρίθμησης Strahler, παίρνει την τιμή 5. Έτσι η Εξίσωση 5.27 βάση των παραπάνω μπορεί να μετατραπεί ως εξής:

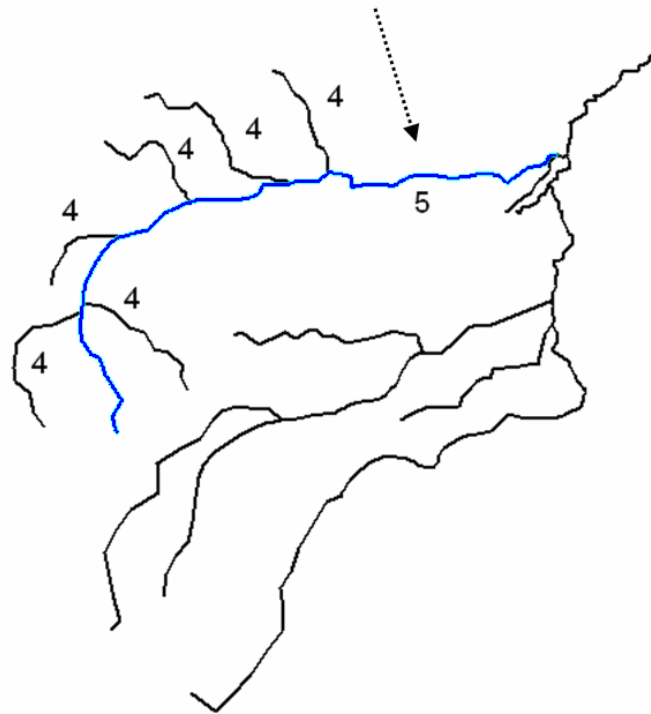
$$R_{L_{(keramiotis)}} = \frac{L_5}{L_4} = \frac{9.253}{2.99} = 3.0946 \quad (5.28)$$

Όπου:

L_5 = Το μήκος του κύριου ρου του παραπόταμου Κεραμιώτη (Km),

L_4 = Το μέσο μήκος των επιμέρους παραποτάμων στον κύριο ρου του παραπόταμου Κεραμιώτη. (Εικόνα 5.14).

Stream Order - Παραπόταμος Κεραμιώτης



Εικόνα 5. 14. Σύστημα αρίθμησης Strahler, για το ποτάμιο σύστημα, του παραπόταμου Κεραμιώτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι τιμές των παραμέτρων που ενσωματώνονται στην Εξίσωση (5.24), για τον παραπόταμο Κεραμιώτη, συνοψίζονται παρακάτω:

L (km)	A (km ²)	R _L	α	Sc	n	B(m)	Q _{peak} (m ³ /sec)
9.253	50.189	3.0946	0.37249524	0.08829	0.14428	13	31.335

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (5.24) και (5.25), προκύπτει η τελική εξίσωση της μορφής:

$$Q_{peak} \times \left(\frac{L^{2.5}}{A \times R_L \times a^{1.5}} \right)^{0.4} - Q_{peak} \times 0.218 \times t_R \times i^{0.4} - 2.42 \times i^{1.4} \times t_R \times A = 0 \quad (5.29)$$

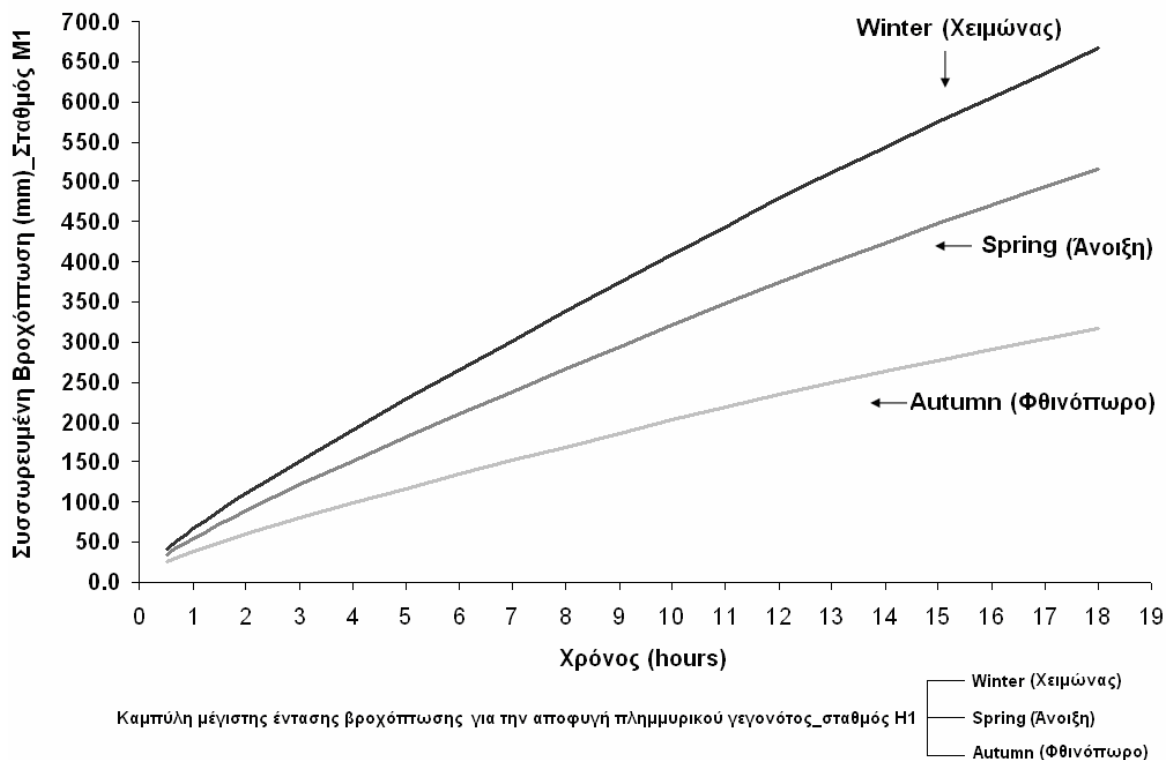
Βάση των παραπάνω, με τη χρήση της Εξίσωσης (5.29), μπορεί να προσδιοριστεί η αποτελεσματική ένταση βροχοπτώσης (i), για τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα (t_R), (χρήση προγράμματος Matlab).

Επιπρόσθετα, εισάγοντας στην Εξίσωση (5.22) τις τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου P₀ μελετούμενες εποχές του χρόνου (P_{0_winter}, P_{0_Spring}, P_{0_autumn}) και την αποτελεσματική ένταση βροχοπτώσης (i), που υπολογίστηκε με

βάση την Εξίσωση (5.29), μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συνολική ποσότητα βροχόπτωσης (σταθμός M1), ανά χρονική στιγμή [$t_R = 0.5, 1, 2, 3, 4, \dots, 20$ h] και ανά εποχή ($\Sigma P_{\text{winter}}, \Sigma P_{\text{Spring}}, \Sigma P_{\text{autumn}}$), ικανή να προκαλέσει πλημμυρικά φαινόμενα στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη, (Πίνακες 5.10). Η Εικόνα (5.15), αναπαριστά γραφικά τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή έντασης βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό M1 ανά εποχή, πάνω από την οποία είναι πολύ πιθανό να έχουμε πλημμυρική παροχή στον υδρομετρικό σταθμό H1 και κατά επέκταση πλημμυρικό φαινόμενο στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 5. 10. Συνολικό ύψος βροχής (σταθμός M1) σε σχέση με το χρόνο και την εποχή ικανή να προκαλέσει πλημμυρικό γεγονός στο σταθμό H1.

T_R (h)	ΣP_{Autumn} (mm)	ΣP_{Winter} (mm)	ΣP_{Spring} (mm)
0.5	25.5	41.8	35.1
1	38.4	66.6	54.9
2	60.3	110.3	89.3
3	80.2	150.9	121.1
4	98.9	189.8	151.4
5	117.3	228.1	181.1
6	134.9	265.2	209.8
7	152.0	301.6	238.0
8	168.9	337.6	265.8
9	185.8	373.7	293.6
10	202.1	408.8	320.6
11	218.6	444.4	348.0
12	234.8	479.3	374.8
13	248.9	511.1	398.9
14	263.4	543.5	423.6
15	277.4	575.2	447.6
16	291.0	606.2	471.1
17	304.1	636.5	493.9
18	316.8	666.2	516.2
19	329.0	695.2	537.9
20	340.8	723.5	558.9



Εικόνα 5. 15. Καμπύλες μέγιστης επιτρεπτής έντασης βροχής (σταθμός M1), ανά εποχή, προκειμένου να αποφευχθεί πλημμυρικό γεγονός στο σταθμό H1.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, οι βασικές συνιστώσες που επηρεάζουν την εμφάνιση στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών είναι: α) η ποσότητα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης, β) η ένταση της βροχόπτωσης και γ) οι αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, που σχετίζονται με τις αλλαγές των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους και οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της αμέσως προηγούμενης βροχόπτωσης και αυτής που ευθύνεται για το πλημμυρικό γεγονός.

Μέχρι τώρα, στην ανάπτυξη του ενοποιημένου μοντέλου πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών, λάβαμε υπόψη μας τις δύο από τις τρεις συνιστώσες. Η εδαφική υγρασία πριν την εμφάνιση ενός γεγονότος βροχής είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη γένεση στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται πως η τρίτη συνιστώσα του μοντέλου πρόβλεψης επηρεάζει την εμφάνιση στιγμιαίων πλημμυρών στον υδρομετρικό σταθμό H1.

5.8.3. Η εδαφική υγρασία σε σχέση με το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των γεγονότων βροχής

Κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων βασικές φυσικές ιδιότητες της εδαφικής επιφάνειας μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά. Οι αλλαγές αυτές σε διαφορετικό βαθμό μπορεί να προέλθουν τόσο κατά τη διάρκεια μιας συνεχόμενης βροχόπτωσης (continuous rainstorm) όσο και κατά τη διάρκεια συνακόλουθων γεγονότων βροχής (intermittent rainstorm). Πιο αναλυτικά φυσικές ιδιότητες του εδάφους όπως η στεγανοποίηση του εδάφους [(εδαφική κρούστα (soil crust)], η εδαφική υγρασία, ο ρυθμός διήθησης και η τραχύτητα του εδάφους μπορούν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχής. Η δημιουργία εδαφικής κρούστας (soil crust) στην ανώτερη ζώνη του εδάφους διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στις εν λόγω αλλαγές και σχετίζεται άμεσα με την εδαφική υγρασία. Η εδαφική κρούστα (soil crust) μπορεί να δημιουργηθεί σε διαφορετικό βαθμό τόσο κατά τη διάρκεια μιας συνεχόμενης βροχόπτωσης όσο και κατά τη διάρκεια συνακόλουθων γεγονότων βροχής.

Κυρίως σε άνυδρες περιοχές, η επιφανειακή απορροή συχνά εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της δημιουργίας κρούστας (crust) στην επιφάνεια του εδάφους. Η εδαφική κρούστα είναι εκείνο το ανώτερο λεπτό εδαφικό στρώμα που εμφανίζει υψηλότερη συνεκτικότητα, μικρότερο πορώδες και χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα από ότι το υποκείμενο έδαφος (Carmi and Berliner, 2008).

Η δημιουργία της εδαφικής κρούστας (soil crust) επηρεάζεται από το χρονικό διαστήματα που μεσολαβεί μεταξύ των γεγονότων βροχής. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Fohrer et al., 1999 στην περίπτωση των συνακόλουθων γεγονότων βροχής, ο ρυθμός διήθησης στην αρχή κάθε χρονικού διαστήματος είναι υψηλός. Όμως η μετέπειτα μείωση του ρυθμού διήθησης εξαιτίας της επακόλουθης στεγανοποίησης του εδάφους (εδαφική κρούστα), είναι πιο απότομη και έντονη από ότι στη διάρκεια μιας μεμονωμένης συνεχόμενης βροχόπτωσης. Έτσι στην περίπτωση συνακόλουθων γεγονότων βροχής (μικρά χρονικά διάστημα μεταξύ των γεγονότων βροχής), ακόμα και μικρές ποσότητες βροχής μπορούν να δημιουργήσουν γρήγορα και σημαντική επιφανειακή απορροή μιας και η υψηλή αρχική εδαφική υγρασία βοηθάει στη γρήγορη δημιουργία εδαφικής κρούστας (Fohrer et al., 1999).

Επίσης η ομαλοποίηση της τραχύτητας του εδάφους λόγω της βροχόπτωσης είναι πιο έντονη στην περίπτωση συνακόλουθων γεγονότων

βροχής, σε σχέση με την περίπτωση συνεχόμενης βροχόπτωσης. Η αλλαγή αυτή στην επιφανειακή τραχύτητα του εδάφους έχει με τη σειρά της θετική επίδραση στην αύξηση της ταχύτητας απορροής και κατά επέκταση στη μείωση του χρόνου επιβράδυνσης ενός πλημμυρικού γεγονότος (Fohrer et al., 1999). Γίνεται φανερό λοιπόν ότι εκτός από την ποσότητα της βροχόπτωσης και την ένταση αυτής το χρονικό κενό μεταξύ δυο διαδοχικών βροχοπτώσεων και η δημιουργία ή όχι εδαφικής κρούστας στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους, μπορεί να διαδραματίσει καταλυτικό ρόλο στη δημιουργία μεγάλης και γρήγορης επιφανειακής απορροής και κατά επέκταση να αυξήσει τον κίνδυνο πλημμυρικού φαινομένου.

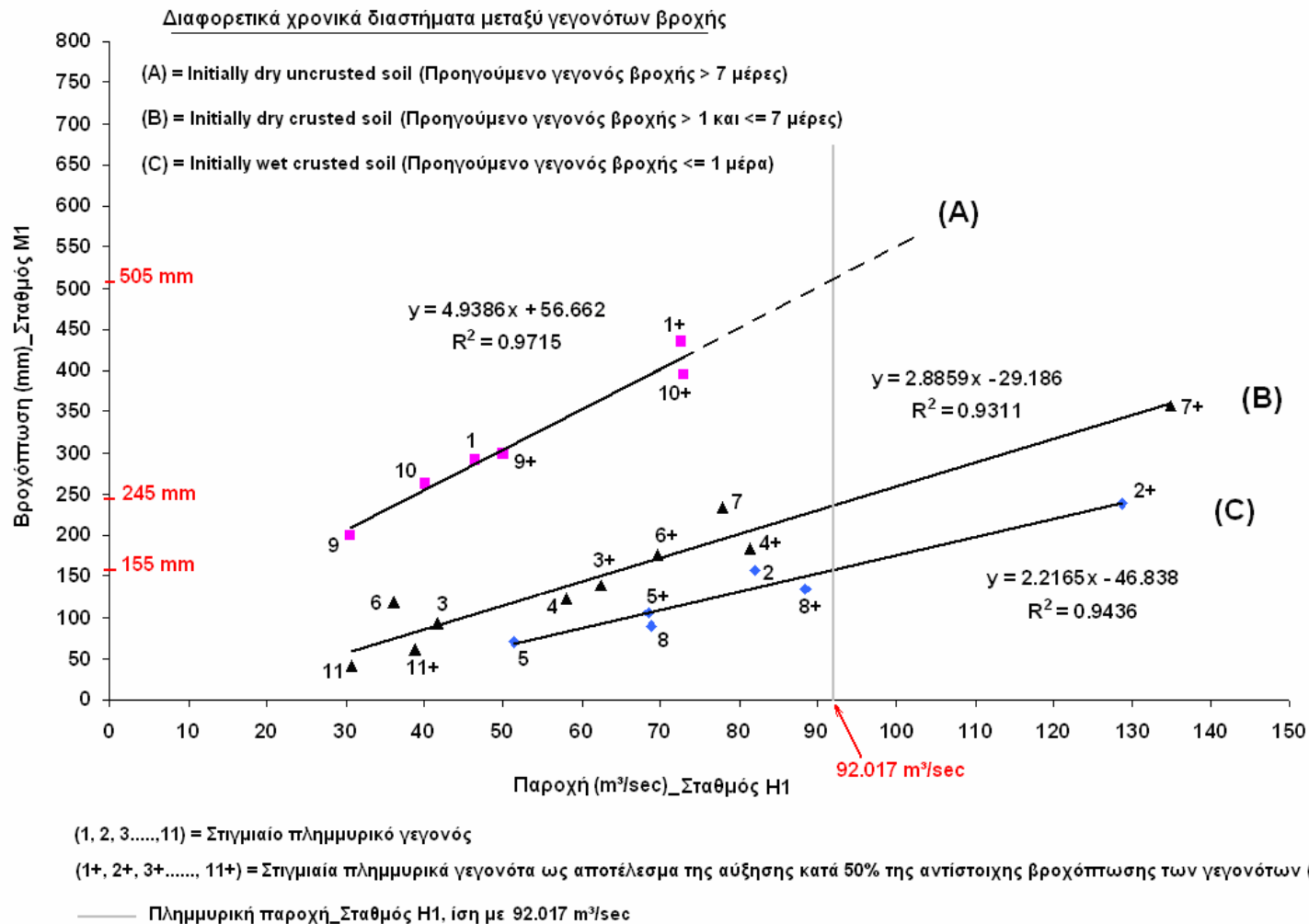
Με βάση τα παραπάνω, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οι 11 πλημμυρικές αιχμές κατατάχθηκαν ανάλογα με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της αμέσως προηγούμενης βροχόπτωσης και αυτής που ευθύνεται για το πλημμυρικό γεγονός. Προέκυψαν έτσι τρεις καμπύλες που περιγράφουν αφενός την παραπάνω κατάταξη αλλά και αφετέρου τη σχέση συσσωρευμένης βροχόπτωσης με τις αντίστοιχες μέγιστες παροχές των 11 πλημμυρικών αιχμών, (Εικόνα 5.16).

Η πρώτη καμπύλη (Α) εκφράζει τις πλημμυρικές αιχμές που έλαβαν χώρα σε ξηρό έδαφος χωρίς εδαφική κρούστα [dry uncrusted soil], όπου το χρονικό διάστημα μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχής και του αμέσως προηγούμενου είναι πάνω από 7 μέρες (προηγούμενη βροχόπτωση > 7 μέρες). Την καμπύλη αυτή εκφράζουν οι πλημμυρικές αιχμές 1, 9, και 10 (Εικόνα 5.16).

Η δεύτερη καμπύλη (Β) εκφράζει τις πλημμυρικές αιχμές που έλαβαν χώρα σε ξηρό έδαφος όπου υπήρχε ήδη εδαφική κρούστα [dry crusted soil]. Στην περίπτωση αυτή το χρονικό διάστημα μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχής και του αμέσως προηγούμενου είναι από μία ως επτά μέρες (προηγούμενη βροχόπτωση > 1 έως ≤ 7 μέρες). Την καμπύλη αυτή εκφράζουν οι πλημμυρικές αιχμές 11, 6, 3, 4, και 7 (Εικόνα 5.16).

Η τρίτη καμπύλη (C) εκφράζει τις πλημμυρικές αιχμές όπου έλαβαν χώρα σε υγρό έδαφος με εδαφική κρούστα [wet crusted soil]. Στην περίπτωση αυτή το χρονικό διάστημα μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχής και του αμέσως προηγούμενου είναι μικρότερο από 24 ώρες (προηγούμενη βροχόπτωση ≤ 1 μέρας). Την καμπύλη αυτή εκφράζουν οι πλημμυρικές αιχμές 5, 8, και 2 (Εικόνα 5.16).

Προκειμένου να αυξήσουμε τα σημεία (πλημμυρικές αιχμές) και να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία στις εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες A, B, και C, χρησιμοποιήσαμε το βαθμονομημένο μοντέλο HSPF (Kourgialas et al., 2010). Πιο συγκεκριμένα εκτελέσαμε την προσομοίωση των 11 μελετούμενων στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων, στο βαθμονομημένο μοντέλο HSPF, θεωρώντας την αντίστοιχη βροχόπτωση αυξημένη κατά 50%. Προέκυψαν έτσι οι αντίστοιχες 11 νέες θεωρητικές πλημμυρικές αιχμές (1+, 2+,...11+). Η τελική μορφή των τριών καμπυλών - εξισώσεων περιγράφονται στην Εικόνα 5.16. Λαμβάνοντας υπόψη μας την πλημμυρική παροχή των $92.017 \text{ m}^3/\text{sec}$, η μέγιστη ποσότητα συσσωρευμένης βροχόπτωσης πάνω από την οποία μπορεί να εμφανιστεί πλημμυρικό φαινόμενα στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη είναι για την καμπύλη (A) τα 505mm για την (B) τα 245 mm και για την (C) τα 155 mm.



Εικόνα 5. 16. Καμπύλες συσχέτισης συσσωρευμένης βροχόπτωσης (σταθμός M1) και των αντίστοιχων υψηλών παροχών - αιχμών (σταθμός H1), ανάλογα με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε σε σχέση με το προηγούμενο γεγονός βροχής.

5.8.4. Συνδυασμός των επιμέρους συνιστωσών του μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών και τελικά αποτελέσματα

Σκοπός μας ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου ελέγχου και πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κουλιάρη. Το παραπάνω εγχείρημα μπορεί να γίνει εφικτό με τη συνδυασμένη χρήση:

1) Των καμπυλών έντασης βροχόπτωσης, όπου όταν οι παρατηρούμενες τιμές έντασης βροχής υπερβαίνουν τις παραπάνω καμπύλες είναι δυνατό να δημιουργήσουν πλημμυρικό γεγονός στα κατάντη και

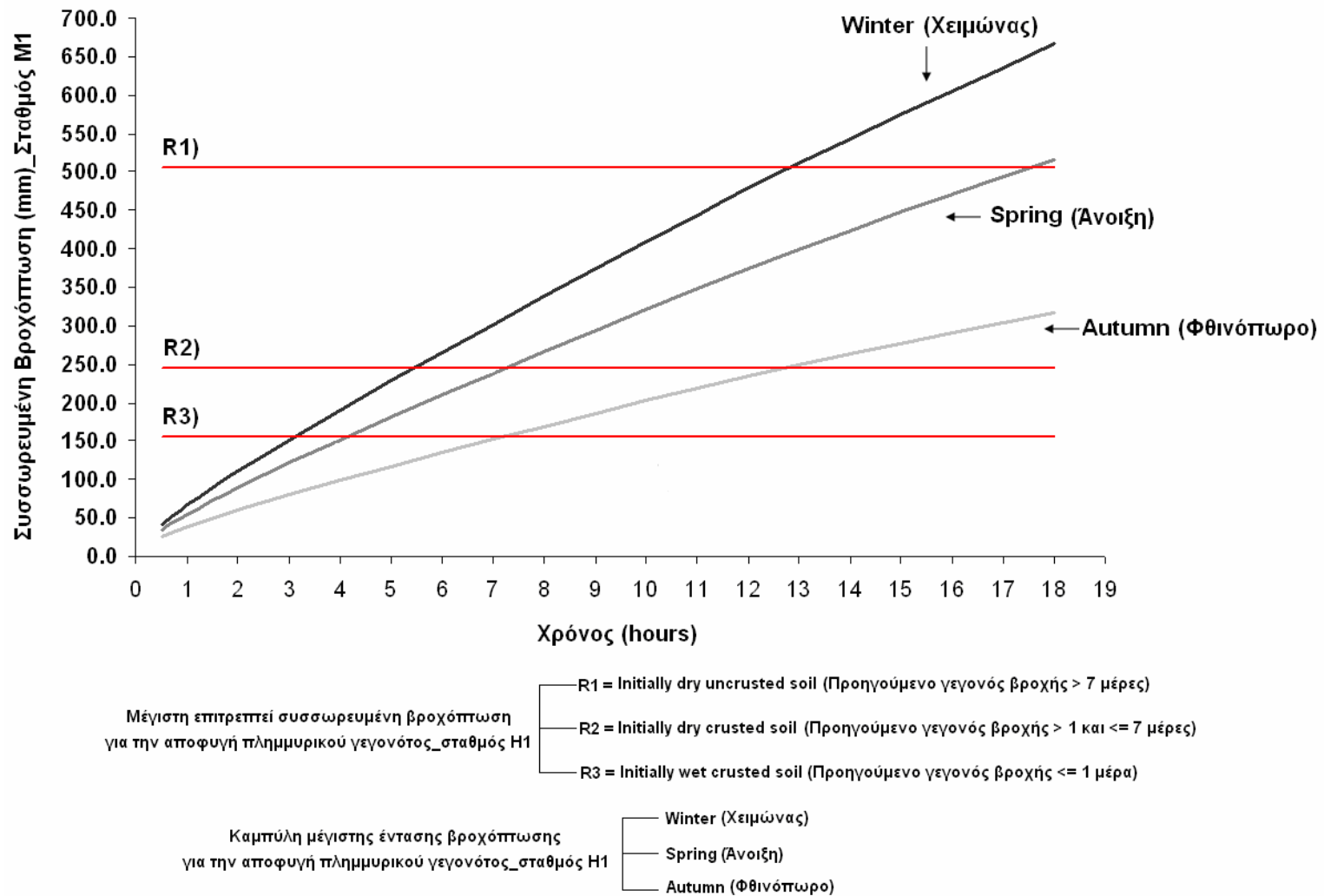
2) Της μέγιστης δυνατής συσσωρευμένης ποσότητας βροχής πάνω από την οποία θα εμφανιστεί πλημμυρικό φαινόμενο, σε σχέση με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από το προηγούμενο γεγονός βροχόπτωσης (intervals between the rainstorms).

Γνωρίζοντας έτσι σε πραγματικό χρόνο (μετεωρολογικός σταθμός M1):

A) την ποσότητα της βροχόπτωσης, B) το χρόνο διάρκειας της βροχόπτωσης, Γ) την εποχή που λαμβάνει χώρα το γεγονός και Δ) το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το προηγούμενο γεγονός βροχόπτωσης, είναι δυνατό να προσδιορίσουμε αν το συγκεκριμένο γεγονός βροχής δύναται να προκαλέσει πλημμυρικό φαινόμενο.

Η Εικόνα 5.17 περιγράφει το συνδυασμό των παραπάνω σε ένα διάγραμμα. Οι γραμμές (R1), (R2) και (R3), περιγράφουν τη μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα συσσωρευμένης βροχόπτωσης, σε σχέση με την εδαφική υγρασία οι οποίες είναι 505mm, 245mm και 155mm, αντιπροσωπεύοντας τις αντίστοιχες πλημμυρικές παροχές των καμπυλών (A), (B) και (C). Οι καμπύλες Winter (Χειμώνας), Spring (Άνοιξη) και Autumn (Φθινόπωρο), περιγράφουν τη μέγιστη επιτρεπτή ένταση βροχόπτωσης σε σχέση με την εποχή.

Συνδυάζοντας τις γραμμές (R1), (R2) και (R3), με αυτές των καμπυλών Winter, Spring και Autumn, προκύπτουν 9 συνδυασμοί [(R1)-Winter, (R2)-Winter, (R3)-Winter, (R1)-Spring, (R2)-Spring, (R3)-Spring, (R1)-Autumn, (R2)-Autumn, και (R3)-Autumn] ανάλογα με την εποχή και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του προηγούμενου γεγονότος βροχής και αυτού που μελετάμε.

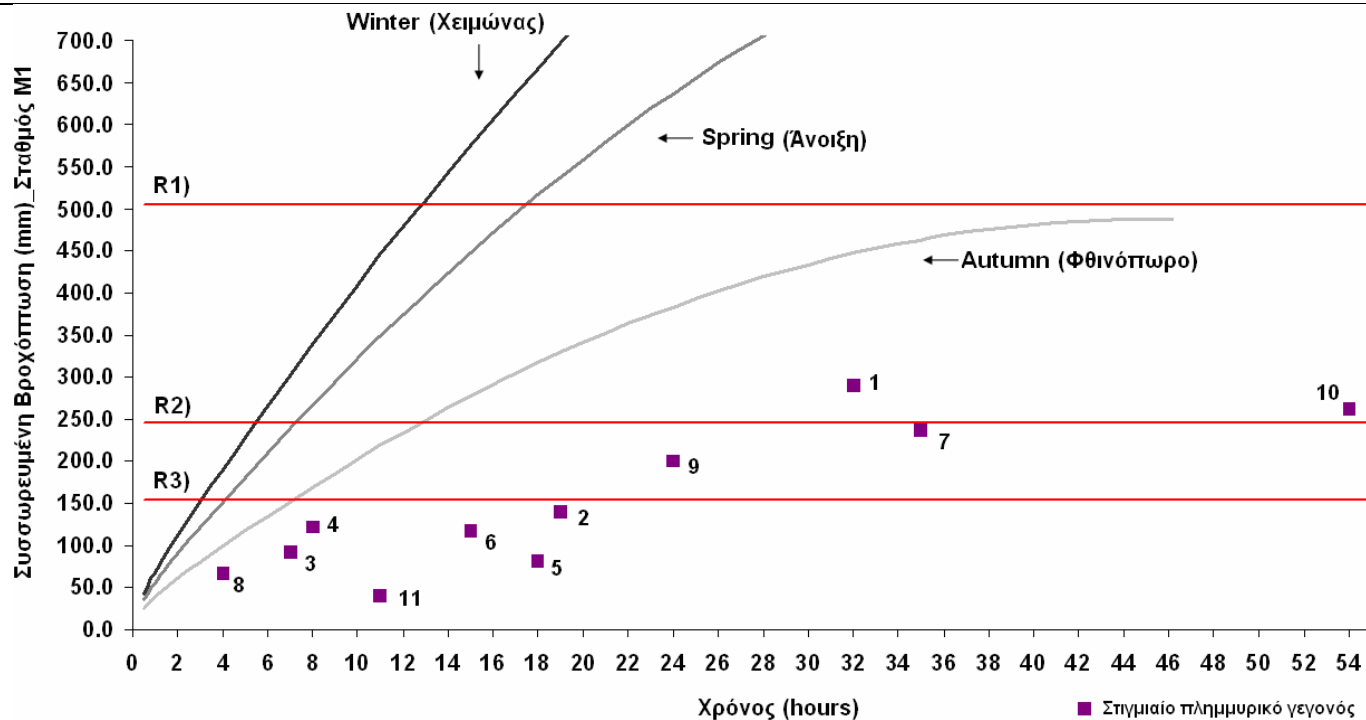


Εικόνα 5. 17. Γραφική απεικόνιση των δύο συνιστωσών του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω όταν το μελετούμενο γεγονός βροχόπτωσης, που καταγράφεται από το μετεωρολογικό σταθμό M1, βρίσκεται εντός της περιοχής που περικλείεται μεταξύ του ζεύγους καμπύλης - γραμμής που το χαρακτηρίζει, τότε ο κίνδυνος πλημμυρικού φαινομένου στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη περιορίζεται σημαντικά (Εικόνα 5.17). Το επόμενο στάδιο αφορά την επαλήθευση του μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών με τα 11 παρατηρούμενα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα. Ο Πίνακας 5.11, περιγράφει τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων που προκάλεσαν τις 11 μελετούμενες στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές και τις αρχικές εδαφικές συνθήκες (εδαφική υγρασία) πριν το γεγονός βροχής. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.11 και τις Εικόνες 5.3 και 5.18, παρατηρούμε ότι κάθε ένα από τα 11 στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα επαληθεύει το μοντέλο ελέγχου και πρόβλεψης στιγμιαίων πλημμυρικών γεγονότων στα κατάντη τμήματα του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 5. 11. Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, αρχικές εδαφικές συνθήκες και εποχή που λαμβάνει χώρα το κάθε στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός.

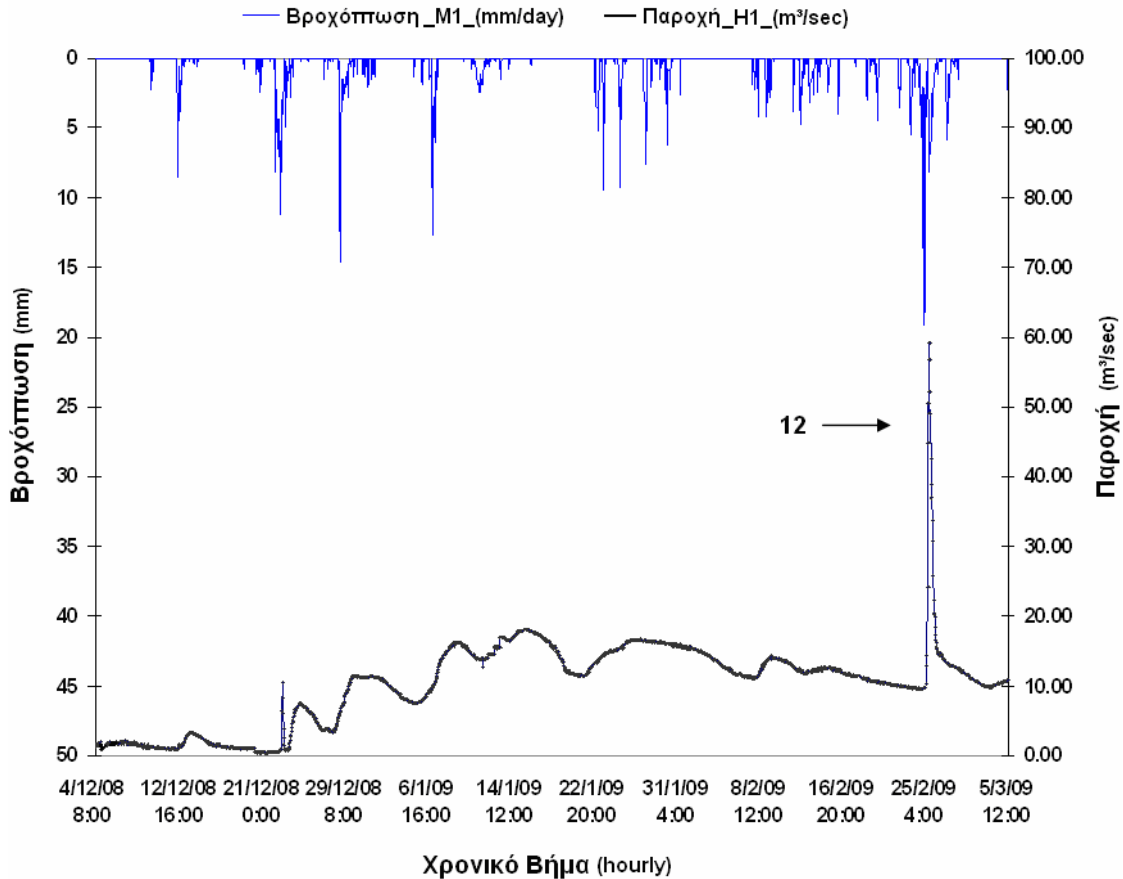
Πλημμυρική Αιχμή	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Συσσωρευμένη βροχόπτωση (mm)	290.6	140.0	93.2	122.5	80.9	117.8	237.6	67.0	200.0	256.1	41.0
Διάρκεια Βροχής (h)	32	19	7	8	18	15	35	4	24	54	11
Εποχή	Winter	Winter	Winter	Autumn	Autumn	Winter	Winter	Spring	Winter	Winter	Winter
Αρχικές Εδαφικές Συνθήκες	R1	R3	R2	R2	R3	R2	R2	R3	R1	R1	R2



Εικόνα 5. 18. Επαλήθευση του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρών, μέσω των πλημμυρικών αιχμών (1-11).

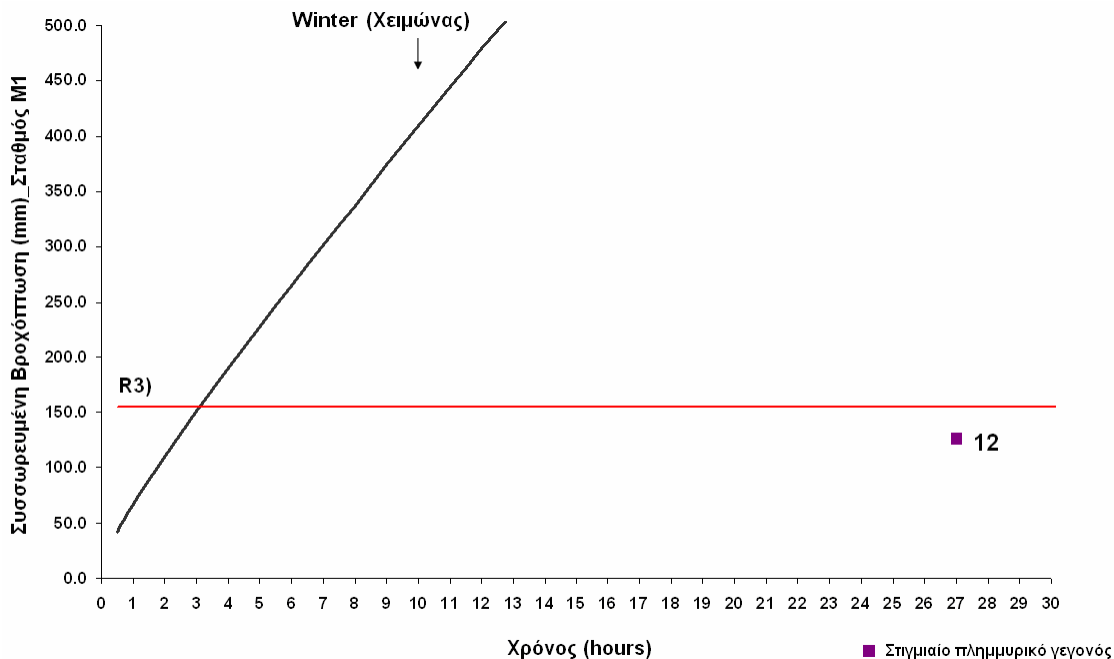
Ειδικότερα, για τα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (2) και (7), κατά τη διάρκεια των οποίων η ωριαία καταγραφόμενη παροχή (υδρομετρικός σταθμός Η1), ήταν αρκετά κοντά στην τιμή της πλημμυρικής παροχής, το αναπτυσσόμενο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών επαληθεύει την παραπάνω διαπίστωση μίας και η απεικόνιση των σημείων 2 και 7 στην Εικόνα 5.18, επιβεβαιώνει ότι αυτά βρίσκονται πολύ κοντά στο ανώτερο όριο της περιοχής που εσωκλείεται από το ζεύγος γραμμής – καμπύλης που αντιστοιχεί σε καθένα από τα δύο γεγονότα. Με αυτό τον τρόπο όλες οι παρατηρούμενες πλημμυρικές αιχμές επαληθεύουν τα αποτελέσματα του μοντέλου πρόβλεψης.

Για την πιο πρόσφατη χρονική περίοδο 1/12/2008 έως 15/3/2009 στον υδρομετρικό σταθμό Η1 ένα άλλο μεγάλο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός (12) καταγράφηκε. Η συγκεκριμένη πλημμυρική αιχμή έλαβε χώρα την 25/2/2009 στις 19:00 (Εικόνα 5.19). Η ποσότητα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης που προκάλεσε τη στιγμιαία πλημμυρική αιχμή (12) έφτασε τα 126.6 mm, ενώ η χρονική διάρκεια της συγκεκριμένης βροχόπτωσης ήταν 27 ώρες. Επίσης το χρονικό διάστημα που είχε μεσολαβήσει από το αμέσως προηγούμενο γεγονός βροχής ήταν μικρότερο των 24 ωρών [Γραμμή (R3)].



Εικόνα 5. 19. Πλημμυρική αιχμή (12), ωριαία καταγραφόμενη παροχή και βροχόπτωση (σταθμοί Η1 - Μ1).

Προκειμένου να επαληθεύσουμε και το συγκεκριμένο στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός (12) με το αναπτυσσόμενο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών, χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω χαρακτηριστικά βροχόπτωσης και αρχικών συνθηκών εδαφικής υγρασίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω η συγκεκριμένη πλημμυρική αιχμή περιγράφεται από το ζεύγος γραμμής - καμπύλης [Winter-(R3)], (Εικόνα 5.20). Η παροχή της στιγμιαίας πλημμυρικής αιχμής (12) προσδιορίστηκε στην τιμή $59.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, κοντά στην πλημμυρική παροχή των $92.017 \text{ m}^3/\text{sec}$. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται στην Εικόνα 5.20, καθώς το καταγραφόμενο σημείο για το στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός (12) είναι αρκετά κοντά στην οριακή κόκκινη γραμμή (R3).



Εικόνα 5. 20. Επαλήθευση του δημιουργούμενου μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών με την πλημμυρική αιχμή (12).

5.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει αναφερθεί, η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση πολλών στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών. Επιπλέον, τα υπάρχοντα γεωλογικά ρήγματα (καρστικές γεωλογικές δομές) ευθύνονται για τη δημιουργία καρστικών στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών. Σε αυτό το κεφάλαιο, με βάση τα υδρολογικά δεδομένα των τριών υδρολογικών σταθμών μελετήθηκαν τρία συγκεκριμένα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (9, 10 και 11). Τα υδρογραφήματα σε όλες τις περιπτώσεις ήταν πολύ απότομα με απότομους ανιόντες κλάδους και σύντομους χρόνους επιβράνδυσης. Επιπρόσθετα, μόνο ένα μικρό τμήμα της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, ειδικότερα στην καρστική περιοχή (υδρομετρικός σταθμός H2), όπου ο συντελεστής επιφανειακής απορροής είναι ίσος με 1.3% (στιγμιαίο πλημμυρικό γεγονός 9). Οι υψηλές αυτές τιμές απωλειών λόγω μεταφοράς κατά μήκος του καρστικού καναλιού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποφυγή μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη (υδρομετρικός σταθμός H1). Εάν απουσίαζε η εν λόγω καρστική περιοχή

κατά μήκος του παραπόταμου Κεραμιώτη, το πλημμυρικό κύμα θα αυξάνονταν σημαντικά κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του προς τα κατάντη και πολύ πιθανόν να προκαλούσε συχνές και καταστροφικές πλημμύρες.

Προκειμένου να αποφύγουμε υψηλές τιμές στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη, αναπτύχθηκε ένα ενοποιημένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών. Όμως το αναπτυσσόμενο μοντέλο πρόβλεψης θα ήταν χρήσιμο μόνο εάν ο χρόνος συγκέντρωσης ενός επερχόμενου στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος, στον υδρομετρικό σταθμό Η1, είναι επαρκής. Στην περίπτωση της λεκάνης του Κοιλιάρη σε όλες τις περιπτώσεις των μελετούμενων πλημμυρικών αιχμών, ο χρόνος συγκέντρωσης ήταν μεγαλύτερος από 19 ώρες. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αφορά το χρόνο από την έναρξη του γεγονότος βροχής (μετεωρολογικός σταθμός Μ1) μέχρι την εμφάνιση του πλημμυρικού γεγονότος στον υδρομετρικό σταθμό Η1. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (αναγνώριση κινδύνου – εμφάνιση πλημμύρας) θα πρέπει να γίνει γρήγορη ενημέρωση των αρμοδίων φορέων για τη λήψη άμεσων και βασικών μέτρων προστασίας των πολιτών και των περιουσιών τους.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι ο προσδιορισμός των κύριων υδρομετεωρολογικών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη διαχείριση των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών. Έτσι η ανάπτυξη του εν λόγω μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών βασίζεται στον προσδιορισμό – καταγραφή βασικών υδρομετεωρολογικών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα το αναπτυσσόμενο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του, σε πραγματικό χρόνο, παραμέτρους όπως είναι α) η ποσότητα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης (μετεωρολογικός σταθμός Μ1), β) η διάρκεια του γεγονότος βροχής, γ) η εποχή που το μελετούμενο γεγονός βροχής λαμβάνει χώρα, και δ) το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχόπτωσης και του αμέσως προηγούμενου. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών επαληθεύτηκε με 12 καταγεγραμμένα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα από τον υδρομετρικό σταθμό Η1. Εν κατακλείδι, η γνώση σε πραγματικό χρόνο όλων των παραπάνω παραμέτρων και ο μετέπειτα συνδυασμός τους, κάνει το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο και την πρόβλεψη μεγάλων και επικίνδυνων πλημμυρικών γεγονότων στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

6.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE SHE & MIKE 11

6.1.1. Γενικά

Η κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους θεωρείται ροή μέσα σε αγωγό με περατά τοιχώματα, χαρακτηρίζεται ως χωρικά μεταβαλλόμενη, ασταθής ροή με πλευρική παροχή, η οποία λαμβάνει χώρα υπό μορφή διήθησης μέσα από τη διαβρεχόμενη επιφάνεια του αγωγού (Winter, 1999).

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ποτάμια, ρέματα, λίμνες και στο υπόγειο νερό καθορίζεται από τη θέση του επιφανειακού νερού σε σχέση με το σύστημα της υπόγειας ροής, από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, όπου λαμβάνει χώρα η υπόγεια ροή και τέλος από το κλίμα της υπό εξέταση περιοχής (Winter, 1999). Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο επιφανειακό και στο υπόγειο νερό ελέγχεται από την κατανομή και το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας στο σχετιζόμενο με το ρέμα υδροφορέα, από τη σχέση της στάθμης του ρέματος με την παρακείμενη υπόγεια στάθμη, από τη γεωμετρία και τη θέση του ρέματος στον υδροφορέα.

Γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η αλληλεπίδραση των επιφανειακών και των υπογείων ροών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής, από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και από τη σχετική θέση του επιφανειακού νερού ως προς την υπόγεια στάθμη. Τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής σχετίζονται με τη χρονική και χωρική κατανομή της στάθμης του ρέματος, τη ταχύτητα ροής και τη θερμοκρασία του ρευστού στο ρέμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι διαφορετικά χαρακτηριστικά στη ροή του επιφανειακού νερού είναι δυνατό να μεταβάλλουν την υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου μέσω διάβρωσης ή απόθεσης φερτών υλικών, επηρεάζοντας έτσι την ένταση της αλληλεπίδρασης της επιφανειακής με την υπόγεια ροή (Sophocleous, 2002).

Κατά καιρούς έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες ταυτόχρονης προσομοίωσης της επιφανειακής και της υπόγειας ροής του νερού. Η μαθηματική προσομοίωση του συνδυασμού αυτού περιλαμβάνει α) την επίλυση των εξισώσεων της επιφανειακής ροής, β) την επίλυση της κατάλληλης εξίσωσης υπόγειας ροής και γ) το συνδυασμό της επιφανειακής και της υπόγειας ροής μέσω της διαρροής

(διήθησης), που λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια επιφανειακής και υπόγειας ροής (Winter, 1999).

Το επίπεδο της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου μαθηματικής προσομοίωσης εξαρτάται α) από τις παραδοχές, που γίνονται για την απλούστευση των ισχυουσών εξισώσεων, β) από τη χωρική διάσταση (1-D, 2-D, 3-D) και γ) από το εάν η ροή έχει χρονική διάσταση ή όχι, δηλαδή ασταθής (μη μόνιμη) ή σταθερή (μόνιμη). Επίσης τα διάφορα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται μεταξύ τους βάσει του τύπου των εξισώσεων και των μεθόδων επίλυσης τους, καθώς και από τον τρόπο συνδυασμού της επιφανειακής και της υπόγειας ροής.

Η κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να αντιπροσωπευθεί από δύο συνιστώσες, την επιφανειακή κίνηση του νερού (overland flow) και την κίνηση του νερού σε ανοιχτούς αγωγούς (channel flow). Οι μηχανισμοί προσομοίωσης της κίνησης του νερού μπορεί να είναι απλές προσομοιώσεις τύπου Muskingum-Cunge, όπου οι τυπικά βαθμονομημένες παράμετροι της μεθόδου Muskingum συνδέονται με φυσικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, (προέλευση και ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, κλίση πυθμένα του ρέματος, παροχή ανά μονάδα πλάτους), είτε με την πιο λεπτομερή και ορθή θεωρητικά μέθοδο της περιγραφής της κίνησης του νερού σε ανοιχτούς αγωγούς, που διέπεται από ένα σύστημα δύο διαφορικών εξισώσεων, γνωστών ως εξισώσεων Saint-Venant. Οι εξισώσεις Saint-Venant εκφράζουν μαθηματικά τις αρχές της διατήρησης της μάζας και της ενέργειας.

Τα φυσικά ρέματα μπορεί να βρίσκονται σε υδραυλική επαφή με τους υπόγειους υδροφορείς μέσω του πυθμένα τους, οπότε η διήθηση και η υπόγεια ροή θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα δια μέσου κορεσμένου πορώδους μέσου. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ικανοποιητικά από κάποια απλή εξίσωση, που βασίζεται στο νόμο του Darcy. Σε διαφορετική όμως περίπτωση, ο υπολογισμός της διήθησης και της υπόγειας ροής γίνεται, είτε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο διήθησης όπως αυτά των Horton, Kostiaikov, Green-Ampt, Philip, κ.λ.π., είτε με την πιο αυστηρή θεωρητικά μέθοδο προσομοίωσης της κίνησης του νερού σε ένα κορεσμένο – ακόρεστο πορώδες μέσο, με βάση την εξίσωση Richards.

Η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού μέσα σε φυσικά υδατορεύματα, ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις την αναλυτική και την αριθμητική.

Αναλυτική ονομάζεται η λύση εξισώσεων με τη χρήση μαθηματικών τύπων και αριθμητική, η λύση των εξισώσεων που λαμβάνεται με μια διαδικασία επαναλαμβανόμενων βημάτων. Εκτός από ειδικές περιπτώσεις οι εξισώσεις Saint-Venant και η εξίσωση Richards δεν έχουν αναλυτικές λύσεις. Για την επίλυση τους χρησιμοποιούμε αριθμητικές προσεγγίσεις, δηλαδή διαδικασίες επαναλαμβανόμενων βημάτων, με τη βοήθεια μεθόδων πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων όγκων. Γενικά η ακρίβεια της αριθμητικής προσομοίωσης του φυσικού φαινομένου εξαρτάται καταρχήν από τη μαθηματική περιγραφή του, την αριθμητική τεχνική, που χρησιμοποιείται στην επίλυση της εξίσωσης καθώς και από την ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων, που υπεισέρχονται στις εξισώσεις.

6.1.2. Χαρακτηριστικά - πεδία εφαρμογών υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE & υδραυλικού μοντέλου MIKE 11

Το MIKE SHE (Système Hydrologique Européenne) είναι ένα δυναμικό εργαλείο ολοκληρωμένης προσομοίωσης του επίγειου υδρολογικού κύκλου. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software (<http://www.dhisoftware.com/mikeshe>). Το μοντέλο έχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών σε προβλήματα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς και σε προβλήματα περιβάλλοντος, όπως:

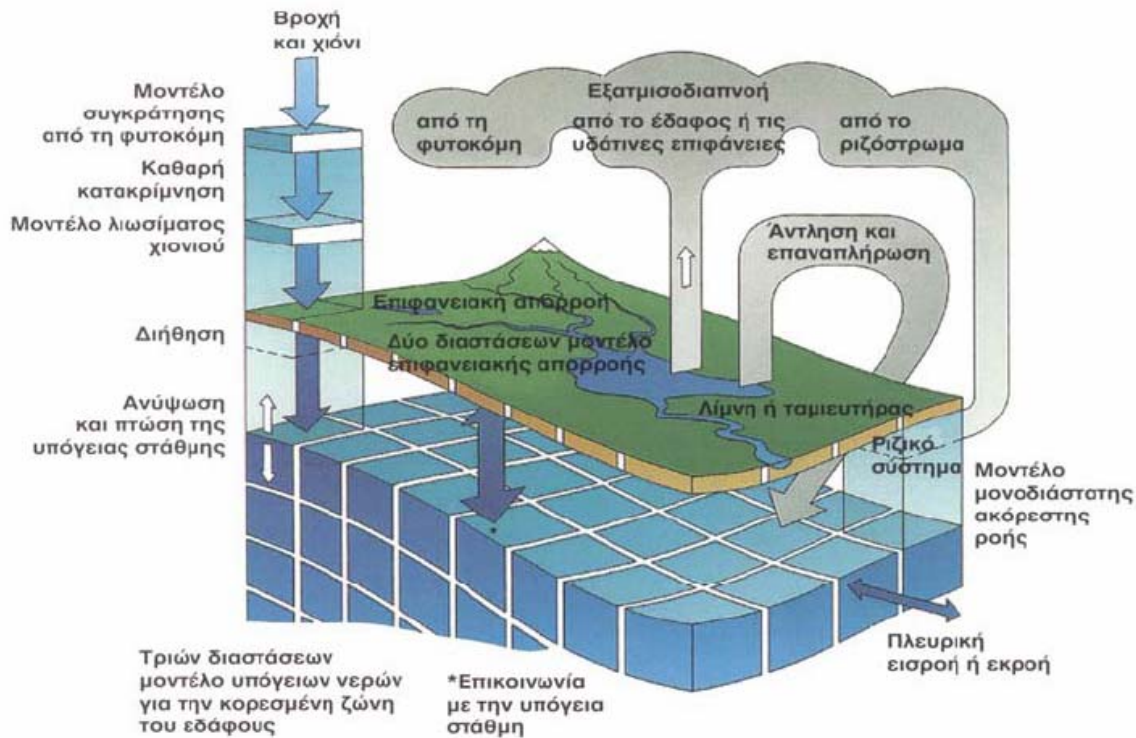
- επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων
- συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων
- διαχείριση λεκάνης απορροής
- εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- δυναμική επανατροφοδοσία υδροφορέων
- διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων
- μελέτες πλημμυρών
- εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές στις χρήσεις γης και στο κλίμα

- εκτίμηση επιπτώσεων από γεωργικές πρακτικές.

Το μοντέλο MIKE SHE προσομοιώνει τις παρακάτω διεργασίες καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους (Εικόνα 6.1):

- κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιονόπτωση)
- εξατμοδιαπνοή, περιλαμβανομένης και της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα
- επίγεια απορροή
- ροή σε υδατορεύματα / ανοιχτούς αγωγούς
- ακόρεστη ροή στο έδαφος
- κορεσμένη υπόγεια ροή.

Για κάθε διεργασία, το MIKE SHE παρέχει εναλλακτικούς τρόπους μαθηματικής περιγραφής, που κυμαίνονται από απλές, συγκεντρωτικές προσεγγίσεις έως εξελιγμένες, κατανεμημένες προσεγγίσεις φυσικής βάσης (MIKE SHE User Manual, 2007). Οι εν λόγω προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν με μεγάλη ευελιξία, παρέχοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να προσαρμόσει το μοντέλο στο υδρολογικό πρόβλημα που εξετάζεται και στα διαθέσιμα δεδομένα.



Εικόνα 6. 1. Αλληλουχία υδρολογικών διεργασιών που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE SHE.

Το μοντέλο ακόρεστης ροής του MIKE SHE είναι ένα μοντέλο εδαφικού προφίλ, που αλληλεπιδρά τόσο με την επιγεια ροή (μέσω της επιλίμνασης των υδάτων στην επιφάνεια του εδάφους) όσο και με το μοντέλο υπόγειων νερών (αφού η στάθμη του υδροφορέα αποτελεί την κατώτατη οριακή συνθήκη της ακόρεστης ζώνης). Το MIKE SHE παρέχει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, και συγκεκριμένα: (α) ένα απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που υποθέτει διακριτοποίηση της ακόρεστης ζώνης σε δύο περιοχές, (β) ένα μοντέλο ροής με βαρύτητα, και (γ) ένα πλήρες μοντέλο επίλυσης των εξισώσεων Richards. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ο προσδιορισμός ορισμένων χαρακτηριστικών του εδάφους. Το μοντέλο ακόρεστης ροής συνεργάζεται με το μοντέλο εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή εκτιμάται με βάση τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και τα χαρακτηριστικά της χλωρίδας (MIKE SHE User Manual, 2007).

Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής, το MIKE SHE περιλαμβάνει ένα διδιάστατο και ένα τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, που ακολουθεί παρόμοια προσέγγιση με το γνωστό μοντέλο MODFLOW. Η γεωλογία περιγράφεται με τη μορφή ζωνών (layers) ή φακών (lenses), στα οποία δίνονται χαρακτηριστικές

υδραυλικές ιδιότητες. Οι τελευταίες ορίζονται είτε ανά κυψέλη είτε ανά περιοχή (πολύγωνο). Για κάθε ζώνη, ο χρήστης δίνει τις οριακές συνθήκες. Ειδικού τύπου όρια είναι ο λίμνες, τα ποτάμια και οι γεωτρήσεις.

Όσον αφορά στην προσομοίωση της ροής σε ποτάμια, το MIKE SHE συνεργάζεται με το μονοδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 11. Το τελευταίο παρέχει υπολογιστικά σχήματα διαφορετικής πολυπλοκότητας, όπως απλά μοντέλα διάδοσης τύπου Muskingum έως σύνθετα σχήματα επίλυσης των εξισώσεων Saint-Venant. Τέλος, η προσομοίωση της ροής στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται με εφαρμογή ενός σχήματος πεπερασμένων διαφορών, που βασίζεται σε ένα διδιάστατο μοντέλο διάχυσης κύματος. Η επίγεια ροή αλληλεπιδρά με το ποτάμι, την ακόρεστη ζώνη καθώς και τον υδροφορέα, (MIKE 11 User Manual, 2007).

6.1.3. Τεχνικές επίλυσης Αριθμητικών μοντέλων MIKE SHE & MIKE 11

Η μαθηματική προσομοίωση του φαινομένου μέσω του ολοκληρωμένου μοντέλου, MIKE SHE – MIKE 11 περιλαμβάνει τη συνδυασμένη λύση εξισώσεων, για την επιφανειακή και την υπόγεια ροή του νερού με διαρροή από το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, η χρονική και χωρική κατανομή της στάθμης του ρέματος μπορεί να καθοριστεί από τη λύση διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν τη ροή σε ανοικτό αγωγό και περιλαμβάνουν την επίδραση του υπογείου νερού, μέσω της βρεχόμενης επιφάνειας του αγωγού.

Με τον όρο αριθμητικό μοντέλο εννοούμε: α) το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες σε συνδυασμό με τις κατάλληλες βοηθητικές (αρχικές και οριακές) συνθήκες, περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο, β) τη μέθοδο αριθμητικής προσέγγισης αυτών των εξισώσεων (υπολογιστικό σχήμα), καθώς και γ) τον τρόπο επίλυσης όλου του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα με τον όρο υπολογιστικό σχήμα εννοούμε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, που προσομοιώνουν ένα φυσικό φαινόμενο, στο οποίο οι μεταβλητές, οι συντελεστές των εξισώσεων και οι σταθεροί όροι ορίζονται σε καθορισμένα σημεία, τους κόμβους του υπολογιστικού δικτύου. Εάν σε κάθε εξίσωση του σχήματος υπάρχει μόνον ένας άγνωστος, τότε το σχήμα ονομάζεται ρητό. Εάν κάθε εξίσωση περιέχει περισσότερους από ένα αγνώστους, οι οποίοι είναι δυνατό να βρεθούν λύνοντας ένα σύστημα αλγεβρικών

εξισώσεων, τότε το σχήμα ονομάζεται πεπλεγμένο. Τα ρητά σχήματα είναι πιο απλά, όμως για να επιτύχουν ευστάθεια απαιτούν πολύ μικρό χρονικό βήμα, οδηγώντας σε μεγάλο όγκο αριθμητικών πράξεων. Αντίθετα, τα πεπλεγμένα σχήματα είναι ευσταθή και για μεγαλύτερα χρονικά βήματα (Hantush, 2005).

Γενικά ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη αριθμητική τεχνική, διακρίνουμε υπολογιστικά σχήματα πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων όγκων. Οι παλαιότερες τεχνικές είναι αυτές των πεπερασμένων διαφορών. Μετά το 1965, παρατηρήθηκε μια στροφή των ερευνητών στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως είναι: εύκολη προσέγγιση σύνθετων και ανομοιογενών περιοχών, εύκολη εισαγωγή οριακών συνθηκών, έχουν όμως το πολύ σημαντικό μειονέκτημα ότι η κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο σύνθετη και δαπανηρή σε σχέση με αυτών των πεπερασμένων διαφορών.

Οι αριθμητικές προσεγγίσεις των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων διαφέρουν ως προς τη σύλληψη τους. Στα υπολογιστικά σχήματα πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μια τιμή για την άγνωστη μεταβλητή σε ένα κόμβο του υπολογιστικού δικτύου, η οποία τιμή αποτελεί επίσης το μέσο όρο της τιμής της άγνωστης μεταβλητής για την περιοχή γύρω από τον κόμβο αυτόν. Στα υπολογιστικά σχήματα πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίζεται ακριβώς η μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα στο κάθε στοιχείο, χρησιμοποιώντας γραμμικές ή μη συναρτήσεις παρεμβολής (Anderson and Woessner, 1992).

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων είναι μία ευρέως διαδεδομένη υπολογιστική μέθοδος επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται χωρίζοντας αρχικά το πεδίο ορισμού σε πεπερασμένους όγκους αναφοράς, έτσι ώστε κάθε κόμβος του πλέγματος να περιβάλλεται από έναν όγκο αναφοράς. Στη συνέχεια ολοκληρώνεται η μερική διαφορική εξίσωση στον όγκο αναφοράς. Τα ολοκληρώματα υπολογίζονται αναλυτικά υποθέτοντας ότι οι τιμές της άγνωστης εξαρτημένης μεταβλητής είναι σταθερές ή ότι μεταβάλλονται γραμμικά σε κάθε όγκο αναφοράς. Οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν ονομάζονται εξισώσεις πεπερασμένων όγκων και το σύστημα επιλύεται χρησιμοποιώντας τις απ' ευθείας ή τις επαναληπτικές τεχνικές επίλυσης συστημάτων (Anderson and Woessner, 1992).

Η αλληλεπίδραση της κίνησης του νερού στον ανοικτό αγωγό και στο πορώδες μέσο προϋποθέτει τη λύση στον ίδιο χρόνο των διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν το κάθε φαινόμενο. Οι αναλυτικές λύσεις των παραπάνω εξισώσεων συχνά βασίζονται σε παραδοχές απλοποίησης του μελετούμενου φαινομένου, οι οποίες περιορίζονται σε απλά μόνον προβλήματα. Επίσης η συνεχής αλλαγή των οριακών συνθηκών, όπως βάθος νερού του ρέματος, η διήθηση κ.λ.π., αυξάνει τη δυσκολία εφαρμογής αναλυτικών λύσεων. Παρόλα αυτά οι αναλυτικές λύσεις αποτελούν σημαντικά εργαλεία για προκαταρκτική εκτίμηση και κατανόηση των διαφόρων διαδικασιών στο μελετούμενο φαινόμενο. Από την άλλη πλευρά, οι αριθμητικές τεχνικές είναι εύκολο να εφαρμοστούν στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων συστημάτων ρεμάτων – υδροφορέα (Hantush, 2005), αν και ο συνδυασμός της επιφανειακής και της υπόγειας ροής στα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης δεν είναι απλός, εξαιτίας της διαφορετικής ταχύτητας των μεταβολών στην επιφάνεια και στην υπόγεια ροή καθώς επίσης και των πιθανών προβλημάτων, που σχετίζονται με τη σύγκλιση και την αριθμητική αστάθεια. Η ροή του νερού στην επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ταχύτερες μεταβολές σε σχέση με την αντίστοιχη υπόγεια. Έτσι, ένα μεγάλο χρονικό βήμα, το οποίο θα ήταν κατάλληλο για την προσομοίωση μόνον της υπόγειας ροής, μπορεί να μειώσει την ακρίβεια στο επιφανειακό μοντέλο. Ένα μικρό χρονικό βήμα, αν και κατάλληλο για επιφανειακή ροή μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και να καταστήσει τη διαδικασία ανεπαρκή για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας του νερού βραχυπρόθεσμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κατάλληλο χρονικό βήμα θα πρέπει να συνδυάζει την ανάγκη για ακρίβεια και για ένα αποτελεσματικό και εφικτό σύστημα προσομοίωσης (Hantush, 2005).

Βασικές μαθηματικές εξισώσεις προσομοίωσης ανοικτών αγωγών, MIKE 11

Οι διαφορικές εξισώσεις, που χρησιμοποιούνται στο MIKE 11, περιγράφουν τη συνεχή ασταθή ροή του νερού σε ανοικτούς αγωγούς με τραχέα και σταθερά τοιχώματα. Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στην υδραυλική ως εξισώσεις Saint-Venant ή εξισώσεις αβαθούς νερού και συνδέουν το βάθος και τη ταχύτητα ροής σε ένα αγωγό.

Οι εξισώσεις Saint-Venant ή εξίσωση του αβαθούς νερού για τη μονοδιάστατη ασταθή ροή σε ανοικτούς αγωγούς, είναι δύο:

A) Η γενική εξίσωση συνέχειας που αντιπροσωπεύει το νόμο διατήρησης της μάζας και για ανοικτό αγωγό οποιασδήποτε διατομής έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = I \quad 6.1$$

B) Η γενική εξίσωση κίνησης (δυναμική εξίσωση) που μπορεί να αντιπροσωπεύει το νόμο της διατήρησης της ποσότητας κίνησης για ανοικτό αγωγό οποιασδήποτε διατομής, έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_o - S_f) - \frac{I(V - U_I)}{A} \quad 6.2$$

Όπου :

A= το εμβαδό της υγρής διατομής, [L²],

Q = παροχή, [L³/T],

V = μέση ταχύτητα ροής, [L/T],

t = χρόνος, [T],

x = οριζόντια απόσταση, [L],

y = βάθος ροής, [L],

g = επιτάχυνση της βαρύτητας, [L/T²],

I = πλευρική παροχή ανά μονάδα μήκους αγωγού, [L²/T]. Ο παράγοντας αυτός είναι συνάρτηση της απόστασης x και του χρόνου t και μπορεί να αντιπροσωπεύει είτε νερό, που εισέρχεται στον αγωγό (βροχόπτωση, εισροή υπογείων υδάτων) και έχει θετική τιμή, είτε νερό, που εκρέει από τον αγωγό (διήθηση, υπερχειλίση), οπότε έχει αρνητική τιμή, ή να εκφράζει το συνδυασμό των παραπάνω.

U_I = x- συνιστώσα της ταχύτητας της πλευρικής παροχής, [L/T], όταν εισέρχεται υπό γωνία ≠ 90°.

S_o = κλίση του πυθμένα του αγωγού, [L/L], και

S_f = κλίση τριβών, [L/L]. Αν και δεν είναι γνωστή η ακριβής σχέση ανάμεσα στην κλίση τριβών και τις χαρακτηριστικές μεταβλητές της ροής, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στην Υδραυλική ανοικτών αγωγών μια από τις εμπειρικές σχέσεις του Chezy ή Manning.

Από μαθηματική άποψη οι εξισώσεις του Saint-Venant αποτελούν ένα σύστημα δύο μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, πρώτης τάξης και υπερβολικού τύπου. Για την επίλυση των συστημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων υπερβολικού τύπου, το μοντέλο MIKE 11, χρησιμοποιεί τις πεπερασμένες διαφορές. Για την κατασκευή ενός υπολογιστικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών, θεωρείται στο καρτεσιανό επίπεδο στον άξονα των τετμημένων η οριζόντια απόσταση, x , και στον άξονα των τεταγμένων ο χρόνος, t . Ορίζεται έτσι ένα υπολογιστικό δίκτυο με πλευρές Δx και Δt (MIKE 11 User Manual, 2007).

Βασικές μαθηματικές εξισώσεις προσομοίωσης κορεσμένου – ακόρεστου πορώδους μέσου, MIKE SHE

Όσον αφορά τη ροή σε ένα κορεσμένο – ακόρεστο πορώδες μέσο, για τον πιο ακριβή υπολογισμό της διήθησης και της υπόγειας ροής το υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE χρησιμοποιεί την εξίσωση Richards.

Η εξίσωση, που περιγράφει τόσο την κορεσμένη όσο και την ακόρεστη ροή ενός ελαφρώς συμπιεστού ρευστού μέσα σε ένα συμπιεστό και ελαστικό πορώδες μέσο, με την παραδοχή ότι η παραμόρφωση του πορώδους μέσου λαμβάνει χώρα μόνον ως προς την κατακόρυφο, είναι γνωστή ως εξίσωση Richards και περιγράφονται ως εξής (Zaradny, 1993):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = [S_w S_s + C(h)] \frac{\partial H}{\partial t} \quad 6.3$$

Όπου :

H = πιεζομετρικό ύψος ή φορτίο, [L],

h = ύψος πίεσης, [L],

K_x , K_y και K_z = συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη x , y και z διεύθυνση αντίστοιχα, [L/T],

S_w = βαθμός κορεσμού του πορώδους μέσου, που ορίζεται ως ο λόγος της κατά όγκο περιεχόμενης υγρασίας του μέσου, θ , προς την υγρασία κορεσμού, θ_s .

$C(h)$ = $d\theta/dh$, υδραυλική χωρητικότητα, $[L^{-1}]$,

S_s = συντελεστής ειδικής αποθήκευσης, $[L^{-1}]$,

ρ = πυκνότητα του ρευστού, $[M/L^3]$,

g = επιτάχυνση της βαρύτητας, $[L/T^2]$,

x , y και z = χωρικές συντεταγμένες, όπου η κατακόρυφη συντεταγμένη z θεωρείται με θετική φορά προς τα πάνω, $[L]$, και

t = χρόνος, $[T]$.

Από μαθηματική άποψη, η εξίσωση Richards είναι μια μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση, δεύτερης τάξης, η οποία είναι παραβολικού τύπου για $C(h) \neq 0$ (ακόρεστη ροή) ή $S_s \neq 0$ (κορεσμένη ροή), και ελλειπτικού τύπου αν $C(h) = 0$ και $S_s = 0$ (κορεσμένη ροή).

Για την επίλυση της εξίσωσης Richards, το ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE χρησιμοποιεί και σε αυτή την περίπτωση αριθμητικές προσεγγίσεις με τη βοήθεια πεπερασμένων διαφορών.

Οι συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ του ύψους πίεσης, h , της κατά όγκο υγρασίας, θ , ενός πορώδους μέσου, της υδραυλικής αγωγιμότητας K , και της κατά όγκο υγρασίας, θ , καθώς και της παραγώγου $\partial\theta/\partial h$, γνωστής ως υδραυλική χωρητικότητα του πορώδους μέσου, είναι βασικές παράμετροι, που χρησιμοποιούνται στα μαθηματικά μοντέλα κίνησης νερού σε ακόρεστο ή σε κορεσμένο- ακόρεστο πορώδες μέσο.

Οι εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται από το υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE για την περιγραφή της σχέσης ύψους πίεσης και κατά όγκο υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη, είναι οι παρακάτω:

Brooks and Corey (1964):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_\beta}{|h|} \right)^\lambda, \text{ για } h > h_\beta \quad 6.4$$

$$S_e = 1, \text{ για } h \leq h_\beta$$

Brutsaert (1966):

$$S_e = \frac{\alpha}{\alpha + |h|^\beta} \quad 6.5$$

van Genuchten (1980):

$$S_e = [1 + (\alpha|h|)^n]^{-m}, \text{ για } h < 0 \quad 6.6$$

$$S_e = 1, \text{ για } h \geq 0$$

Όπου :

S_e = αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού,

θ = κατά όγκο εδαφική υγρασία, $[L^3/L^3]$,

θ_s = υγρασία κορεσμού, $[L^3/L^3]$,

θ_r = υπολειμματική υγρασία, $[L^3/L^3]$,

h_β = πίεση των φυσαλίδων αέρα, (bubbling pressure ή air entry pressure), $[L]$,

h = ύψος πίεσης του εδαφικού νερού, $[L]$,

λ = εμπειρική παράμετρος που σχετίζεται με την κατανομή μεγέθους των πόρων του πορώδους μέσου,

α και β = θετικές εμπειρικές παράμετροι, που προσδιορίζονται πειραματικά (εξίσωση Brutsaert),

α $[L^{-1}]$, n = εμπειρικές παράμετροι, που προσδιορίζονται πειραματικά (εξίσωση van Genuchten) , και

$m = 1 - (1/n)$, όπου $0 < m < 1$ και $n > 1$.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος στην ολοκληρωμένη διαχείριση των πλημμυρών, είναι η δυνατότητα εκτίμησης των ζημιών από ένα επερχόμενο πλημμυρικό φαινόμενο. Όπως προαναφέραμε, το ολοκληρωμένο μοντέλο MIKE SHE - MIKE 11, μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε πλημμυρικά φαινόμενα χωρίς όμως να μπορούμε να αποτιμήσουμε τις τυχόν οικονομικές ζημιές. Για το λόγο αυτό, δημιουργήσουμε ένα κατανεμημένο μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών ζημιών, το οποίο ενσωματώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω του ολοκληρωμένου μοντέλου MIKE SHE - MIKE 11. Στην παρακάτω ενότητα θα γίνει αναλυτική παρουσίαση αυτού του μοντέλου.

6.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ - FLOOD IMPACT (RISK) ANALYSIS

6.2.1. Γενικά

Οι πλημμύρες είναι ο δαπανηρότερος φυσικός κίνδυνος παγκοσμίως και αποτελεί το 31% των οικονομικών απωλειών που σχετίζονται με φυσικές καταστροφές. (Yalcin and Akyurek, 2004). Οι οικονομικές απώλειες των Ευρωπαϊκών χωρών από πλημμυρικά φαινόμενα από το 1998 ως το 2003 υπολογίζονται σε περισσότερο από 60 δισεκατομμύρια USA (\$) (Plate, 2003). Επίσης πλημμυρικά γεγονότα, την περίοδο των τελευταίων δέκα έως δεκαπέντε ετών, δείχνουν ότι στην Ευρώπη οι οικονομικές απώλειες αυξάνονται εντυπωσιακά, κυρίως επειδή διαπιστώνεται μια καταγεγραμμένη αύξηση στον αριθμό ανθρώπων και περιουσιών που βρίσκονται στις ζώνες πλημμυρικού κινδύνου. Δεν θα πρέπει επίσης να αγνοηθεί ότι η υποτίμηση του κινδύνου των πλημμυρών συμβάλλει στην αύξηση των ζημιών σε σχέση με αυτές που αναμένονταν, ενώ η περιττή υπερεκτίμηση οδηγεί στο δαπανηρό σχεδιασμό μέτρων προστασίας. Επίσης μια ακατάλληλη μελέτη διαχείρισης κινδύνου από τις πλημμύρες (ή η απουσία αυτής) μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες ανθρώπινων ζώων και καταστροφές περιουσιών.

Ποια είναι όμως η διαφορά μεταξύ της επικινδυνότητας και κινδύνου πλημμύρας; Η πλημμυρική επικινδυνότητα σε ένα δεδομένο σημείο της επιρρεπούς περιοχής είναι η πιθανότητα κατανομής (εξάπλωσης) σε συνάρτηση με το μέγεθος της πλημμύρας, σε αυτό το σημείο. Το μέγεθος της επικινδυνότητας καθορίζεται από διαφορετικές μεταβλητές σχετιζόμενες με τις πλημμυρικές ζημιές,

όπως είναι το μέγιστο βάθος του νερού, η μέγιστη ταχύτητα, η διάρκεια της πλημμύρας, η ποσότητα των ιζημάτων, κ.λ.π. Στις περισσότερες όμως των περιπτώσεων η πρώτη μεταβλητή είναι και η αντιπροσωπευτικότερη.

Ο πλημμυρικός κίνδυνος ή επιπτώσεις των πλημμυρών καθορίζεται ως η μέση ετήσια ζημιά ανά μονάδα - περιοχή. Η ζημιά υπό μια ευρεία έννοια, μπορεί να περιλάβει οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές απώλειες. Οι πιθανές πλημμυρικές ζημιές εξετάζονται μέσω της τρωτότητας (ευπάθειας) κάθε στοιχείου της επιρρεπούς σε πλημμύρα περιοχής. Η τρωτότητα είναι συνάρτηση του μεγέθους της πλημμύρας και λαμβάνει συνήθως τη μορφή καμπύλης βάθος-ζημιάς (Grigg and Helweg, 1975). Βάση των παραπάνω, η πλημμυρική επίπτωση σε μια καθορισμένη χρήση γης είναι το πιθανολογικό ολοκλήρωμα του συνδυασμού της πλημμυρικής επικινδυνότητας και της τρωτότητας της χρήσης γης (Francés et al., 2001 and Plate, 2002).

Πολύ συχνά παραβλέπεται ότι ο στόχος των μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας είναι να μειωθούν οι συνολικές επιπτώσεις των πλημμυρών, και όχι συγκεκριμένα η επικινδυνότητα των πλημμυρών. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα από τα μη- κατασκευαστικά μέτρα δεν αλλάζουν την επικινδυνότητα, μειώνουν απλά τις συνέπειες από τις πλημμύρες που οφείλονται στις αλλαγές της τρωτότητας των χρήσεων γης (Yevjevich 1994). Η παγκόσμια εμπειρία έχει δείξει ότι σε μακροχρόνια κλίμακα στις περισσότερες περιπτώσεις τα μη-κατασκευαστικά μέτρα είναι και τα αποτελεσματικότερα (Natural Hazards Research and Applications Information Center, 1992; Smith and Ward, 1998).

Η ανάλυση του κινδύνου (επιπτώσεων) των πλημμυρών είναι ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να συγκριθούν τα διαφορετικά σενάρια αντιπλημμυρικής προστασίας που προκύπτουν κυρίως λόγω των αλλαγών στις χρήσεις γης και λόγω των μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας που μπορούν να επιλεγθούν. Για να αποφευχθεί ο πλημμυρικός κίνδυνος, είναι απαραίτητη μια λεπτομερής ανάλυση του πλημμυρικού κινδύνου (risk analysis) για όλα τα διαφορετικά πιθανά σενάρια (στρατηγική διαχείρισης) που πρέπει να διατυπωθούν βασισμένα στην ανάλυση του κινδύνου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί και να αξιολογηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης επικινδυνότητας πλημμυρών,

το οποίο να περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για τις διαφορετικές φάσεις διαχείρισης του κινδύνου. Βάση αυτού του συστήματος, μπορούν να αναλυθούν οι επιπτώσεις ενός προτεινόμενου σχεδίου αλλαγής χρήσεων γης, για τα διαφορετικά σενάρια πλημμυρικών φαινομένων (π.χ. σενάρια για βροχοπτώσεις περιόδου επαναφοράς 25-έτη, 50-έτη και 100-έτη) (Dutta et al., 2006).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές συνιστώσες ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανάλυσης επικινδυνότητας πλημμυρών.

6.2.2. Ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης επικινδυνότητας πλημμυρών

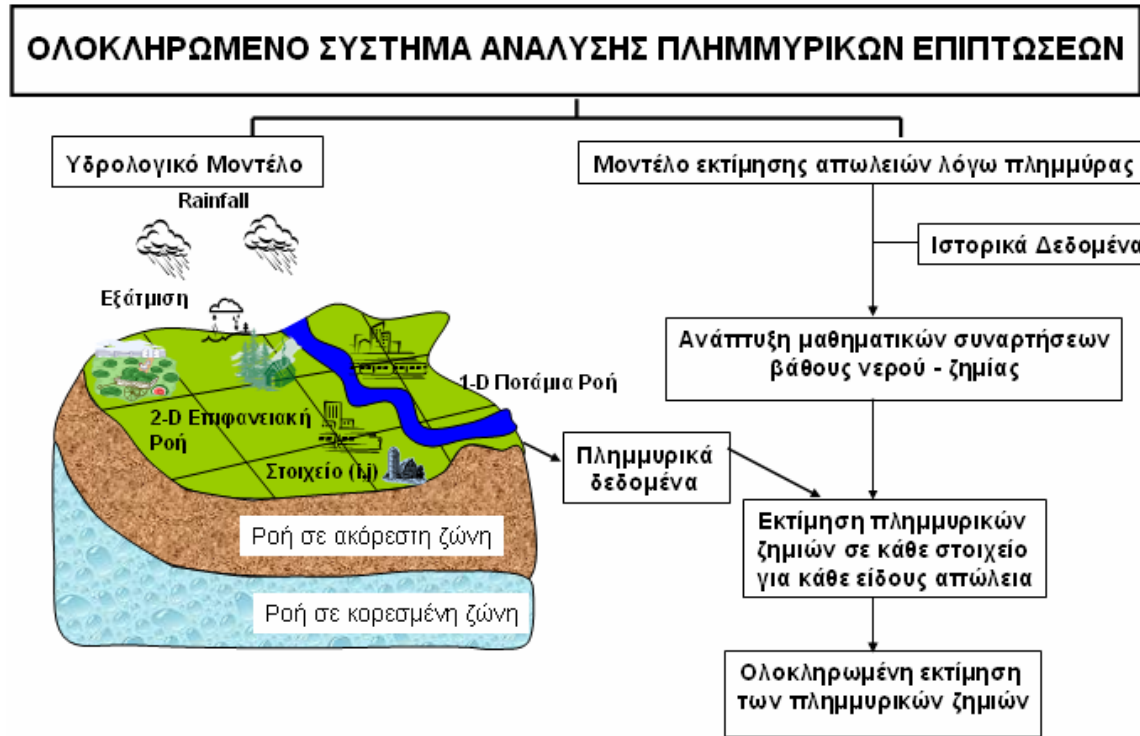
Το προτεινόμενο ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων (Integrated Flood Risk-impact Analysis System - IFRAS) έχει δύο κύριες συνιστώσες, (Εικόνα 6.2):

- A) Ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο με φυσική σημασία για πλημμυρικά φαινόμενα, το οποίο να είναι πλεγματικό και να προσομοιώνει τις πλημμυρικές παραμέτρους για τις δεδομένους υδρολογικές συνθήκες στο χώρο και στο χρόνο, και
- B) Ένα μοντέλο εκτίμησης απωλειών από πλημμύρες, (Dutta et al., 2006).

Οι δυο παραπάνω συνιστώσες του IFRAS αλληλεπιδρούν δυναμικά. Οι παράμετροι των πλημμυρών που προσομοιώνονται από το υδρολογικό μοντέλο στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, εισάγονται στο μοντέλο πλημμυρικών απωλειών για να υπολογιστεί τελικά η ζημιά που προκαλείται από τις πλημμύρες.

Το υδρολογικό μοντέλο με φυσική σημασία πρέπει να έχει τη δυνατότητα 1-D προσομοίωσης της ροής ποταμού, και 2-D επιφανειακής απορροής. Επίσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του την υπόγεια ροή (ακόρεστη και κορεσμένη) και την εξατμισοδιαπνοή.

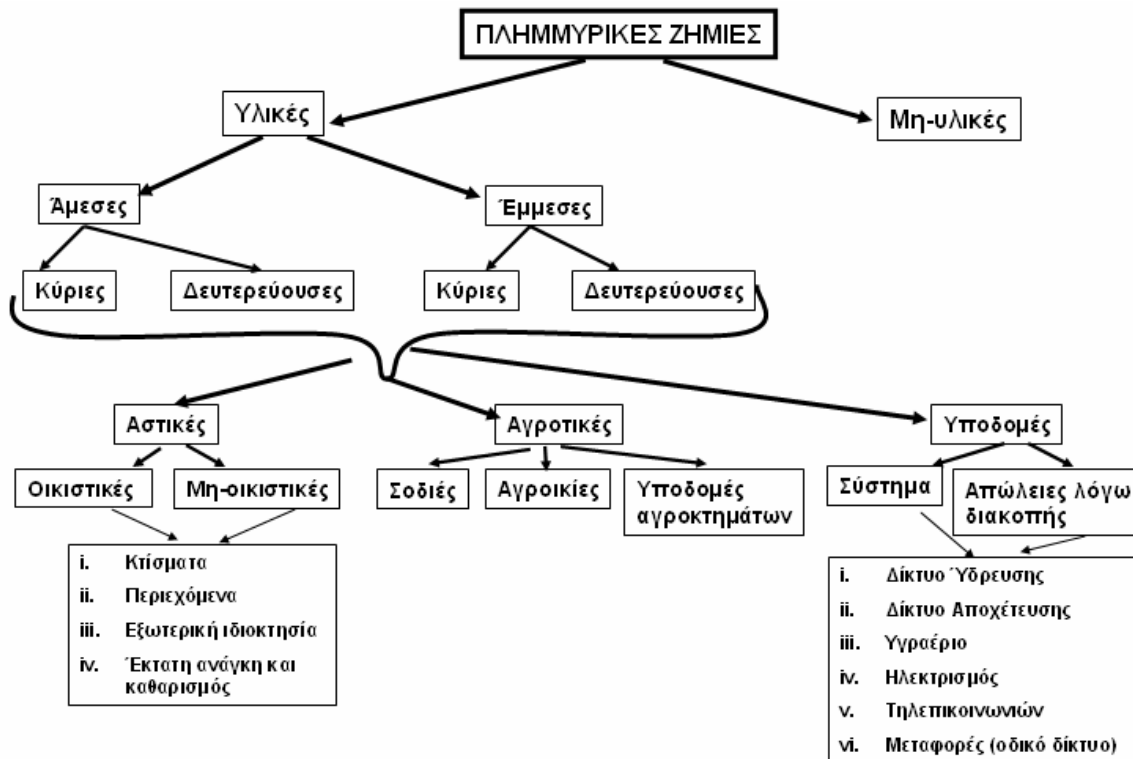
Σε αυτό το σημείο θα δοθεί έμφαση στο μοντέλο ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου, δεδομένου ότι το υδρολογικό – υδραυλικό μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε (MIKE SHE - MIKE 11) θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 6. 2. Ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης κινδύνου – επιπτώσεων των πλημμυρών (IFRAS).

Μοντέλο εκτίμησης απωλειών από πλημμύρες (The flood loss estimation model):

Οι ζημιές από τις πλημμύρες μπορούν να διαχωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες τις υλικές - χρηματικές, προκαλούμενες από την άμεση επαφή με το νερό της πλημμύρας και τις μη- υλικές. Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω πλημμυρών, θα επικεντρωθούμε στις υλικές ζημιές. Αναλυτικότερα, οι υλικές ζημιές από τις πλημμύρες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε άμεσες και έμμεσες (Green et al., 1983; Parker, 1992, 2000; Smith, 1994 and Dutta et al., 2006). Επίσης ανάλογα με το πεδίο εμφάνισης αυτών των ζημιών μπορούν να ταξινομηθούν σε: 1) αστικές, 2) αγροτικές και 3) ζημιές υποδομών. Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες υποδιαιρείται σε διάφορες υποκατηγορίες βασισμένες στα χαρακτηριστικά των ζημιών (Dutta et al., 2006), Εικόνα 6.3.

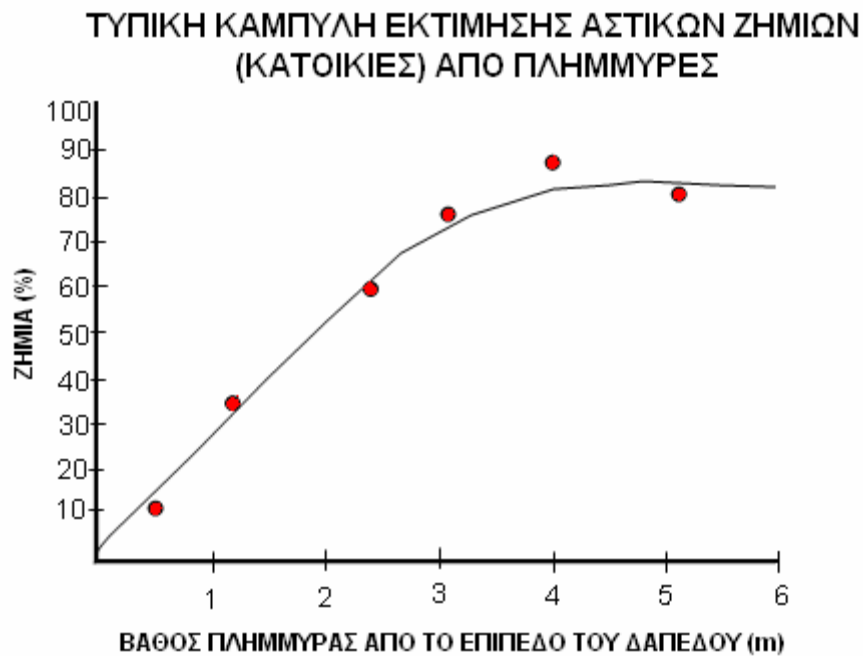


Εικόνα 6. 3. Οι υποκατηγορίες των ζημιών από τις πλημμύρες.

Το μοντέλο εκτίμησης απωλειών από πλημμύρες είναι βασισμένο στην έννοια της απώλειας ως μονάδας – στοιχείο για τις διαφορετικές κατηγορίες ζημιάς (Dutta et al., 2006, Smith, 1994). Η συνάρτηση (σχέση) βάθους πλημμυρικού νερού – ζημιών αναπτύσσεται βάση ιστορικών στοιχείων για να υπολογίσει το ποσοστό ζημιάς ανά μονάδα για οποιοδήποτε αντικείμενο και για ένα δεδομένο σύνολο πλημμυρικών συνθηκών. Η συνολική ζημιά από την πλημμύρα μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε περιοχή (πλέγμα) του τομέα της μελέτης, δημιουργώντας μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του χρησιμοποιούμενου υδρολογικού μοντέλου και του μοντέλου εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών. Το υδρολογικό μοντέλο τροφοδοτεί το μοντέλο εκτίμησης απωλειών με τις κατάλληλες πλημμυρικές παραμέτρους (π.χ. βάθος πλημμύρας) και βάση της συνάρτησης (σχέση) βάθους πλημμυρικού κύματος – ζημιών το μοντέλο εκτίμησης απωλειών υπολογίζει τη ζημιά από την πλημμύρα για κάθε κατηγορία.

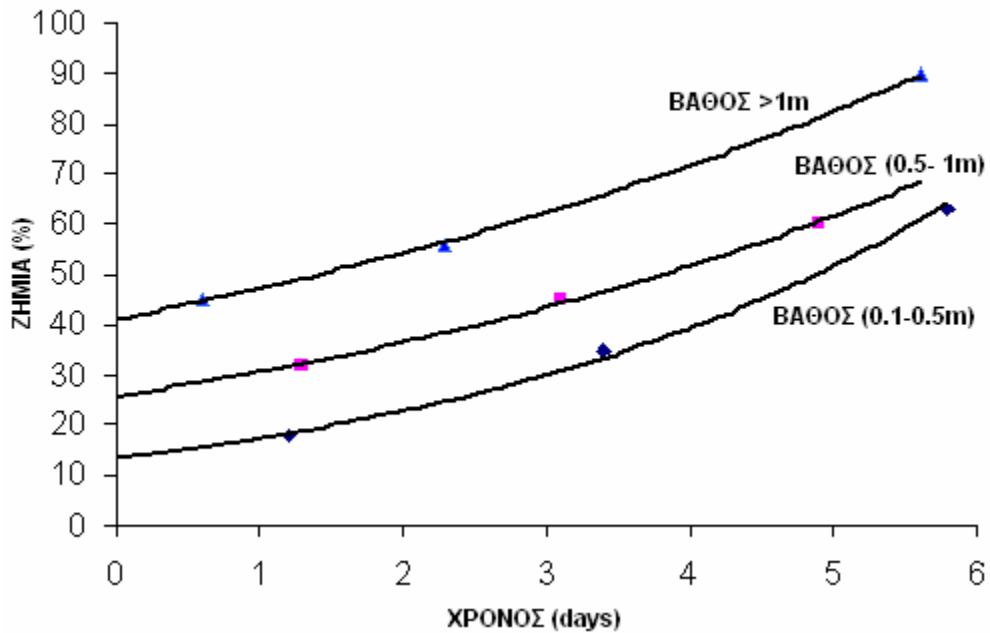
Ανάλογα με την κατηγορία ζημιών (π.χ. αστικές ,αγροτικές) δημιουργείται μια συνάρτηση (σχέση) δυναμικού βάθους πλημμύρας - ζημιών για να υπολογίσει τη ζημιά σε κάθε αντικείμενο της συγκεκριμένης κατηγορίας. Στις Εικόνες 6.4 και

6.5, παρουσιάζονται δύο τυπικές συνάρτησης (σχέση) βάθους πλημμύρας – ζημιών για κτιριακές εγκαταστάσεις και αγροτικές καλλιέργειες, αντίστοιχα (Dutta et al., 2006). Χρησιμοποιώντας αυτές τις συναρτήσεις το μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών, μπορεί να υπολογίσει τη ζημιά κάθε κατηγορίας σε κάθε κελί – πλέγμα του κάνναβου (πλημμυρική περιοχή). Η συνολική ζημιά υπολογίζεται ως άθροισμα των ολικών ζημιών από κάθε κελί – πλέγμα (Dutta et al., 2006).



Εικόνα 6. 4. Τυπική καμπύλη βάθους πλημμυρικού νερού και ποσοστού ζημιάς σε κατοικίες.

ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΖΗΜΙΩΝ
ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ



Εικόνα 6. 5. Τυπικές δυναμικές καμπύλες βάθους πλημμυρικού νερού και ποσοστού ζημιάς σε γεωργικές καλλιέργειες.

Τα μαθηματικά μοντέλα για τις διάφορες κατηγορίες ζημιών και για κάθε πλεγματοειδές κελί μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Dutta et al., 2006):

i) Αστικές ζημιές

Ζημιές σε κατοικημένα κτίρια

Ζημιές κατασκευών:

$$D_{str} = \sum_{k=1}^{rt} NR(k) \times FA(k) \times UP_{str}(k) \times C_{str}(k) \quad 6.7$$

Ζημιές εντός κτιρίου:

$$D_{con} = NF \times UP_{con} \times C_{con} \quad 6.8$$

Ζημιές εξωτερικών χώρων:

$$D_{opr} = N \times UP_{opr} \times C_{opr} \quad 6.9$$

Δαπάνες έκτακτων αναγκών και καθαρισμού:

$$D_{ecl} = N \times UP_{ecl} \times C_{ecl} \quad 6.10$$

Ζημιές σε μη- κατοικημένα κτίρια

Ζημιές ακίνητης περιουσίας:

$$D_{pro} = \sum_{n=1}^{NI} NU(n) \times UP_{pro}(n) \times C_{pro}(n) \quad 6.11$$

Ζημιές εντός κτιρίου:

$$D_{stc} = \sum_{n=1}^{NI} NU(n) \times UP_{stc}(n) \times C_{stc}(n) \quad 6.12$$

Ζημιές εξωτερικών χώρων:

$$D_{otp} = \sum_{n=1}^{NI} NU(n) \times UP_{otp}(n) \times C_{otp}(n) \quad 6.13$$

Δαπάνες έκτακτων αναγκών και καθαρισμού:

$$D_{ecc} = \sum_{n=1}^{NI} NU(n) \times UP_{ecc}(n) \times C_{ecc}(n) \quad 6.14$$

Όπου:

rt : αριθμός των ειδών – τύπων κατοικημένων κτιρίων (ανάλογα με το υλικό κατασκευής),

NR(k) : αριθμός των κατοικημένων κτιρίων του τύπου (k),

FA(k) : εμβαδό ανά μονάδα κατοικημένου δαπέδου - ορόφου, για κάθε κτίριο τύπο (k),

NF : αριθμός νοικοκυριών (οικοσκευών),

N : αριθμός συνολικών κατοικημένων κτιρίων,

UP : αξία ανά μονάδα της αντίστοιχης κατηγορίας, στις παρούσες συνθήκες,

C : σχέση (συνάρτηση) ζημιάς - βάθους πλημμύρας (depth-damage) για την αντίστοιχη κατηγορία,

NI : συνολικός αριθμός των διαφόρων τύπων βιομηχανίας, και
 NU(n): αριθμός των μονάδων για τον κάθε τύπο βιομηχανίας (n).

ii) Γεωργικές ζημιές

$$AD = \sum_{k=1}^n DUA(k) \times TAC(k) \times CUW(k) \quad 6.15$$

Όπου:

AD : συνολική γεωργική ζημιά,

n : συνολικός αριθμός καλλιεργειών,

DUA(k): ζημιά στη καλλιέργεια (k) ανά μονάδα εμβαδού (ζημιά ως ποσοστό),

TAC(k): συνολικό εμβαδό της καλλιέργειας (k),

CUW(k): εκτιμώμενο κόστος ανά μονάδα βάρους της καλλιέργειας (k).

iii) Ζημιές υποδομών

Ζημιά για κάθε συνιστώσα (x) ενός συστήματος υποδομών π.χ. (δίκτυο ύδρευσης, τηλεπικοινωνίες, ηλεκτρισμός, οδικές αρτηρίες)

$$SD_x = \sum_{i=1}^{nc} TC \times \left[\sum_{i=1}^n DR_i \times P(ds_i) \right] \quad 6.16$$

Απώλειες υπηρεσιών από τη διακοπή κάθε είδους συστήματος υποδομών εξαιτίας των ζημιών σε οποιαδήποτε συνιστώσα (x) του συστήματος

$$SL_x = \sum_{i=1}^{nc} SC \times \left[\sum_{i=1}^n RF_i \times P(ds_i) \right] \quad 6.17$$

Όπου:

nc : συνολικός αριθμός των υποδομών (x),

TC: δαπάνες αντικατάστασης της κάθε υποδομής (x),

DR_i : αναλογία της παρούσας ζημιάς με τη συνολική ζημιά της κρατικής μηχανής,

$P(ds_i)$: πιθανότητα ύπαρξης ζημιάς στην κρατική μηχανή,

n : συνολικός αριθμός των ζημιών στην κρατική μηχανή,

SC : απώλειες υπηρεσιών ανά μέρα λόγω της διακοπής τους,

RF_i : κόστος αποκατάστασης των ζημιών από την κρατική μηχανή.

Τόσο για τις ζημιές στο σύστημα όσο και για τις απώλειες λόγω διακοπής αυτού, οι κρατικές ζημιές μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με το είδος των αντικειμένων και σύμφωνα με την ταξινόμηση που γίνεται από τους χρήστες (Dutta et al., 2006).

iv) Απώλειες λόγω διακοπής της κυκλοφορίας

Οριακό κόστος (πρώτη παράγωγος του συνολικού κόστους σε σχέση με τη μεταβολή της ποσότητας του προϊόντος)

$$MC = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m [EI_{(i)} \times FC_{(i,j)} \times T_{v(i,j)} td] \right) \quad 6.18$$

Κόστος καθυστέρησης

$$DC = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m [EI_{(i)} \times FC_{(i,j)} \times D_{c(i)} \times T_{v(i,j)} td] \right) \quad 6.19$$

Όπου:

n : αριθμός των πλημμυρισμένων δρόμων,

m : ρυθμός μεταφοράς σε οποιοδήποτε δρόμο (i),

EI_i : μήκος του δρόμου (i) που καλύπτεται λόγω του νερού της πλημμύρας,

FC : κατανάλωση καυσίμων για το ρυθμό μεταφοράς j ,

T_v : συνολικός όγκος της κυκλοφορίας στο δρόμο (i) ανά ώρα,

t : συνολική διάρκεια της πλημμύρας,

d : παράγοντας μεταβλητότητας του όγκου της κυκλοφορίας στις εργάσιμες μέρες και τα Σαββατοκύριακα,

D_c : κόστος καθυστέρησης ανά μονάδα χρόνο για το δρόμο (i).

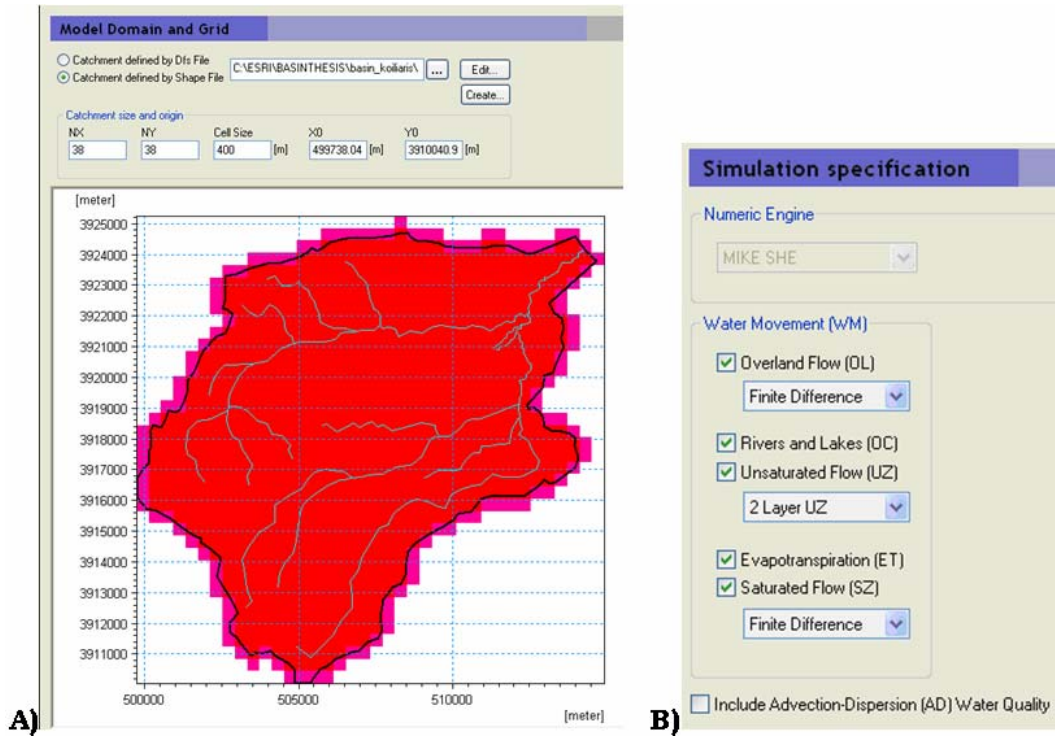
6.3. ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE SHE & MIKE 11 ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, στόχος μας είναι η δημιουργία ενός διδιάστατου πλημμυρικού χάρτη και η αποτίμηση των τυχών ζημιών, που δημιουργούνται στην πλημμυρισμένη περιοχή. Τα παραπάνω θα γίνουν εφικτά με τη συνδυασμένη χρήση των μοντέλων MIKE SHE –MIKE 11 και του συστήματος ανάλυσης κινδύνου πλημμύρας που αναπτύχθηκε παραπάνω.

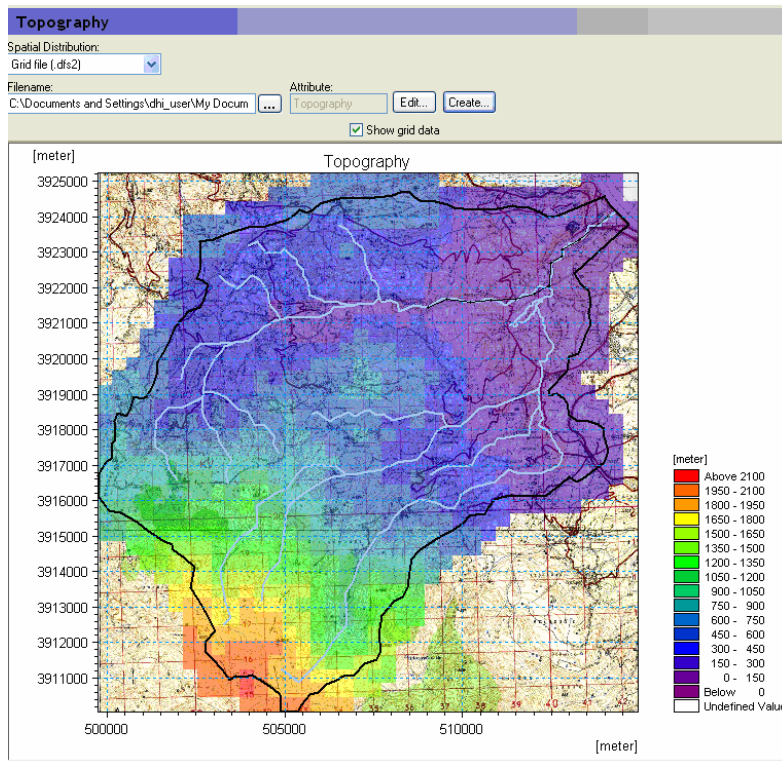
Σε κάθε εφαρμογή μοντελοποίησης υπάρχουν τρία στάδια: (α) η δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου (set up of the model), (β) η εκτέλεση της προσομοίωσης (run the model), και (γ) η αποτίμηση των αποτελεσμάτων (assess of the results). Στην περίπτωση του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE τα παραπάνω τρία στάδια μοντελοποίησης περιέχονται στο πλαίσιο εργασίας MIKE Zero, στο οποίο γίνεται η διαχείριση των αρχείων εισόδου και εξόδου της προσομοίωσης. Τα δεδομένα τα οποία εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE μέσω του MIKE Zero μπορεί να είναι συνδυασμός στατικών και δυναμικών δεδομένων καθώς επίσης χωρικών και μη χωρικών δεδομένων. Τα δεδομένα εισόδου μπορεί να είναι σε μορφή γραμμικών αρχείων - shape file (*.shp), σε μορφή κάρναβου – raster (*.dfs2, *.dfs3) και σε μορφή αρχείων χρονοσειρών (*.dfs0), (MIKE SHE User Manual, 2007).

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα - αρχεία εισόδου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οργανώνονται σε τέσσερις υποκατηγορίες:

1) Βασικά αρχεία – δεδομένα εισόδου όπως είναι: (i) η περιοχή μελέτης (model domain), που καθορίζεται με την οριζόντια και κάθετη διακριτικότητα του μοντέλου (κάρναβου προσομοίωσης), Εικόνα 6.6 A, (ii) η επιλογή και ο συνδυασμός των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου που θέλουμε να προσομοιώσουμε , καθώς και ο τρόπος επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης (επιφανειακή απορροή, ακόρεστη – κορεσμένη ζώνη), Εικόνα 6.6 B, (iii) η περίοδος προσομοίωσης και το χρονικό βήμα (επιφανειακή, ακόρεστη και κορεσμένη ροή) και (iv) δεδομένα που αφορούν την τοπογραφία της περιοχής μελέτης και της αντίστοιχης βροχοπτώσης, Εικόνα 6.7.



Εικόνα 6. 6 Α, Β. Περιοχή μελέτης – διακριτικότητα μοντέλου και επιλογή διεργασιών που προσημειώνονται.



Εικόνα 6. 7. Εισαγωγή τοπογραφικής πληροφορίας στο MIKE SHE.

2) Δεδομένα εισόδου που αφορούν την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, όπως είναι οι χρήσεις γης – τύπος καλλιεργειών (φυτοκάλυψη, βάθος ριζικού συστήματος), η εδαφική υγρασία- φυσικές ιδιότητες εδάφους και η εξατμισοδιαπνοή.

3) Δεδομένα εισόδου που σχετίζονται με την κορεσμένη ζώνη καθώς και με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Η γεωλογική πληροφορία μπορεί να εισαχθεί σε πολλά στρώματα, όπου το καθένα έχει τις δικές του υδραυλικές ιδιότητες, τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο επίπεδο.

4) Δεδομένα εισόδου που αφορούν τη ροή σε ποτάμι μέσω του μοντέλου MIKE 11, τα δεδομένα εισόδου σε αυτήν την υποκατηγορία αφορούν το σχεδιασμό του ποταμίου συστήματος – δίκτυο, την εισαγωγή των διατομών του ποταμού, των οριακών συνθηκών και των υδροδυναμικών παραμέτρων. Αναλυτικά τα δεδομένα εισόδου στο υδραυλικό μοντέλο MIKE 11 θα περιγραφούν παρακάτω.

Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων, το επόμενο στάδιο στη μοντελοποίηση μέσω του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE, αφορά την εκτέλεση της προσομοίωσης, η οποία περιλαμβάνει το αρχικό στάδιο (Pre-Process run), όπου προσαρμόζονται, στο αριθμητικό μοντέλο, όλα τα χωρικά και χρονικά δεδομένα, δημιουργούνται έτσι τα πραγματικά δεδομένα σε δυαδικό σύστημα. Στη συνέχεια τα πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιούνται στο δεύτερο και τελικό στάδιο εκτέλεσης της προσομοίωσης, μέσω του οποίου θα εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα.

Το αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται με τη μορφή διδιάστατων (2-D grid – time series files, *.dfs2) ή τριδιάστατων αρχείων (3-D grid – time series files, *.dfs3). Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα του MIKE SHE παρουσιάζονται στο Result Viewer tool του περιβάλλοντος εργασίας Mike Zero. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του MIKE 11, σε 1 διάσταση παρουσιάζονται στο MIKE VIEW tool, ενώ σε 2 διαστάσεις στο Result Viewer tool του περιβάλλοντος εργασίας Mike Zero, (MIKE 11 User Manual, 2007).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η πολύπλοκη υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (παραποτάμους διαλείπουσας ροής, υψηλές ορεινές αλλά και πεδινές καρστικές περιοχές, πηγές και καρστικά κανάλια), προσομοιώθηκε ικανοποιητικά με το συνδυασμό τεσσάρων μοντέλων (Kourgialas et al., 2010). Το βασικό υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε και στο οποίο εισαγάγαμε σαν δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα των άλλων τριών ήταν το HSPF.

Για το λόγο αυτό, η συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE για την προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη δεν κρίθηκε απαραίτητη, στην παρούσα φάση. Η χρήση όμως του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11, για τη δημιουργία διδιάστατων πλημμυρικών χαρτών και την ακόλουθη χρήση αυτών ως εργαλεία εκτίμησης των οικονομικών επιπτώσεων ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος, είναι ιδιαίτερα σημαντική.

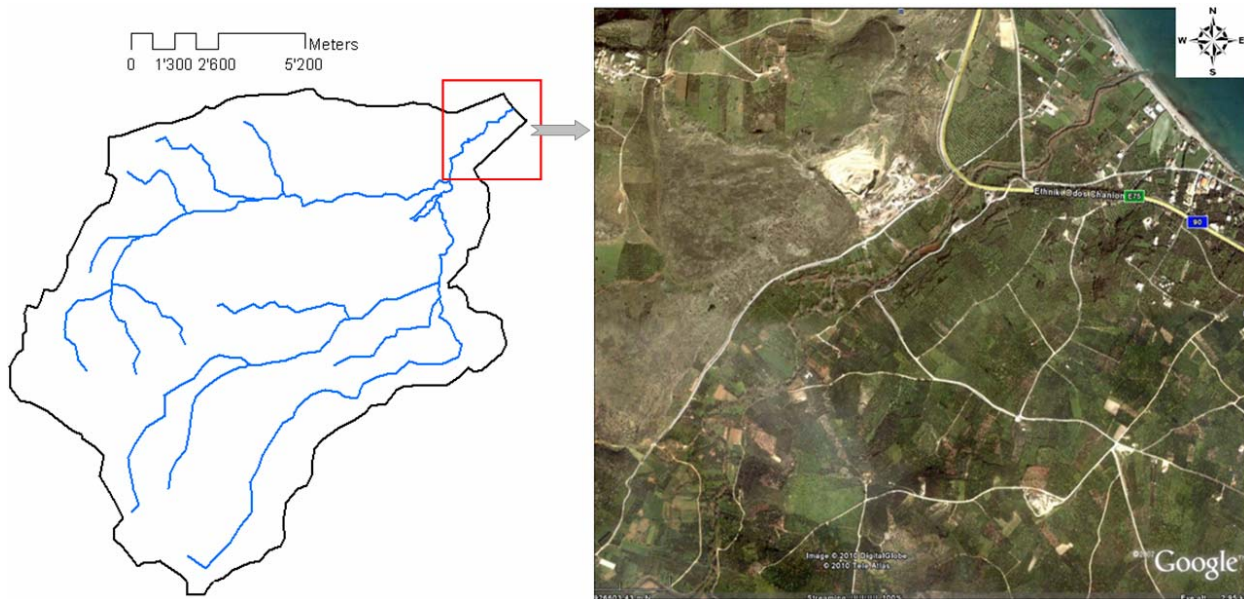
6.4. ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

6.4.1. Προσομοίωση διδιάστατου πλημμυρικού κύματος, σε τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, με τη χρήση του Υδραυλικού μοντέλου MIKE 11

Προκειμένου να προσομοιώσουμε τη χωρική εξάπλωση ενός πλημμυρικού γεγονότος στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη, με τη χρήση του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11, θα πρέπει να ορίσουμε την περιοχική μελέτης και το μελετούμενο πλημμυρικό γεγονός, πιο αναλυτικά:

α) Περιοχή μελέτης

Ως περιοχική μελέτης επιλέχτηκε το τμήμα εκείνο του ποταμού Κοιλιάρη, μήκους περίπου 3 Km, από το σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων της λεκάνης απορροής (υδρομετρικός σταθμός H1), έως και την ακτογραμμή, Εικόνα 6.8. Στην περιοχική αυτή εμφανίζονται κατά καιρούς οι σημαντικότερες ζημιές από πλημμυρικά φαινόμενα, σε γεωργικές καλλιέργειες και κτιριακές εγκαταστάσεις- ξενοδοχεία.



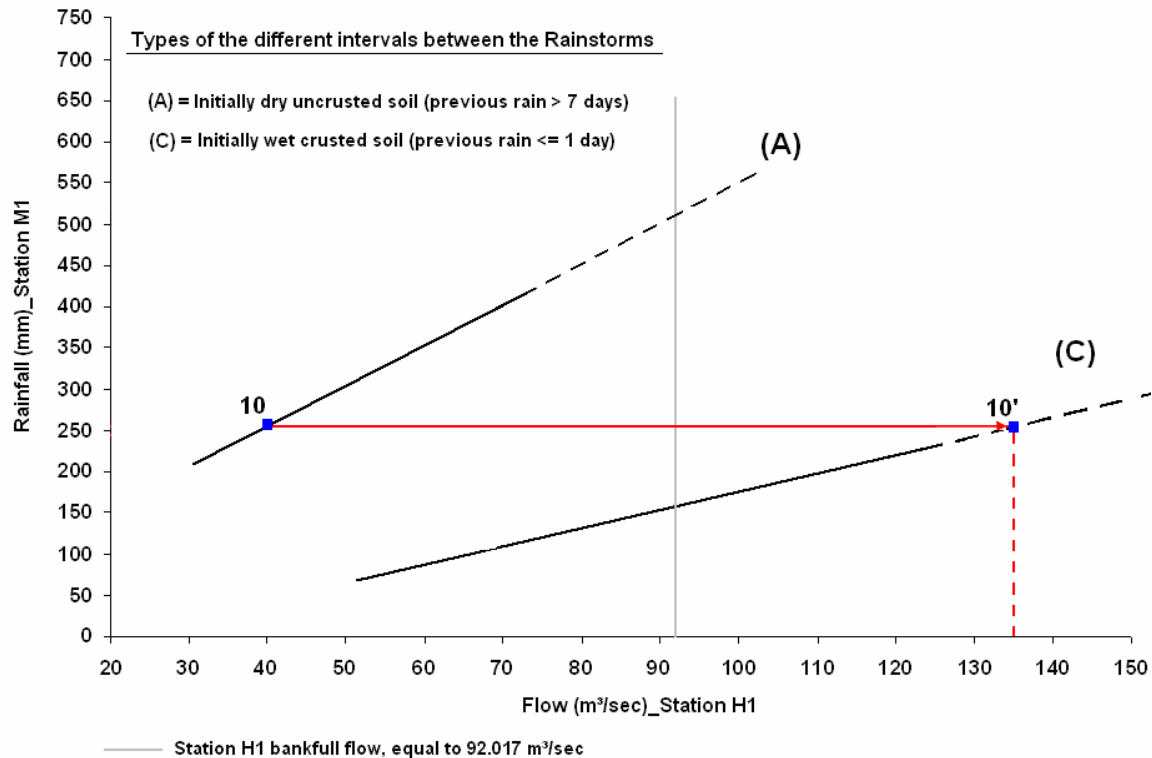
Εικόνα 6. 8. Περιοχή προσομοίωσης του πλημμυρικού κύματος.

β) Πλημμυρικό γεγονός

Όπως έχουμε αναφέρει και στο πρώτο Κεφάλαιο 1, η συστηματική μελέτη της λεκάνης απορροής όσον αφορά την καταγραφή μεγάλων πλημμυρικών φαινομένων,

πραγματοποιείται μετά το 2005, όπου σταδιακά εγκαταστάθηκε ένα πλήρες δίκτυο παρακολούθησης των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων, που επηρεάζουν τη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων. Την ίδια όμως χρονική περίοδο (2005-2010) δεν είχαμε την εμφάνιση πλημμυρικής αιχμής μεγαλύτερης των 92 m³/sec (υδρομετρικός σταθμός H1), ώστε να δημιουργηθεί ένα μεγάλο πλημμυρικό κύμα στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη.

Προκειμένου να προσομοιώσουμε διδιάστατα ένα μεγάλο πλημμυρικό γεγονός, που θα μπορούσε να είχε συμβεί στην περιοχική μελέτης, μετατρέψαμε το πραγματικό πλημμυρικό γεγονός (10), του οποίου η πλήρης υδρολογική ανάλυση έγινε στο Κεφάλαιο 4, σε ένα φανταστικό – θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός (10'). Το θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός (10') θα έχει τα ίδια βροχομετρικά και εποχιακά χαρακτηριστικά με αυτό του (10), με μόνη διαφορά τις αρχικές εδαφικές συνθήκες, οι οποίες μετατράπηκαν από ξηρές (dry uncrusted soil) - πλημμυρικό γεγονός (10), σε υγρές (wet crusted soil) - πλημμυρικό γεγονός (10'), δηλαδή το αμέσως προηγούμενο χρονικό διάστημα (≤ 1 μέρας) από την εμφάνιση του γεγονότος (10') υπήρξε βροχοπτώση, Εικόνα 6.9.

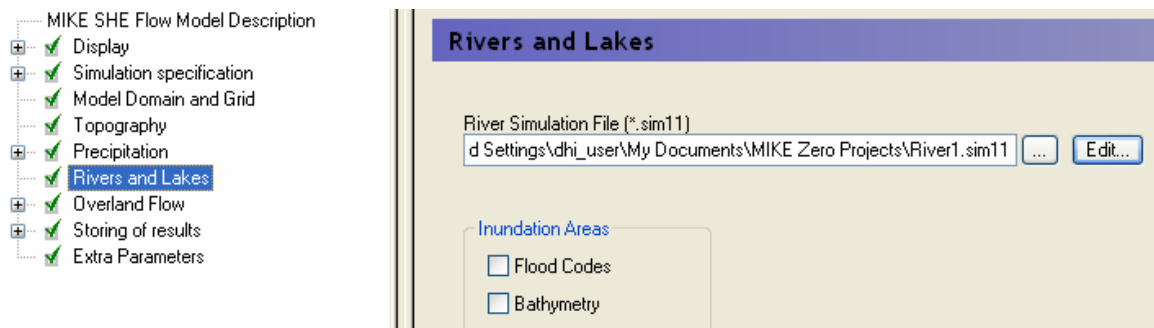


Εικόνα 6. 9. Μελετούμενο θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός (10').

Σύμφωνα με την Εικόνα 6.9, η πλημμυρική αιχμή για το γεγονός (10'), φτάνει τα 135 m³/sec (υδρομετρικός σταθμός Η1), παροχή ικανή να δημιουργήσει μεγάλο πλημμυρικό κύμα στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη και το οποίο με τη σειρά του θα προξενήσει σημαντικές υλικές ζημιές. Η διδιάστατη χωρική προσομοίωση του θεωρητικού πλημμυρικού γεγονότος (10'), θα μελετηθεί παρακάτω με τη χρήση του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11.

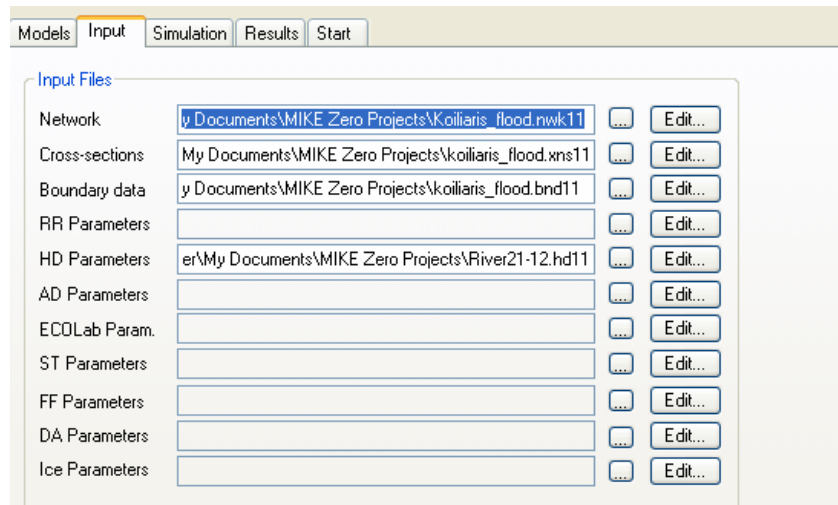
Εφαρμογή του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11

Το πρώτο βήμα για την προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος (10'), μέσου του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11, προϋποθέτει τη δημιουργία ενός αρχείου τύπου *.sim11. Το συγκεκριμένο αρχείο ενώνει τα διαφορετικά μέρη-συνιστώσες του προκαθορισμένου υδροδυναμικού συστήματος πλημμυρικής προσομοίωσης στο περιβάλλον του MIKE 11, (MIKE 11 User Manual, 2007), Εικόνα 6.10.



Εικόνα 6. 10. Πλατφόρμα εισαγωγής του μοντέλου MIKE 11 στο MIKE SHE.

Τα βασικά αρχεία εισόδου για το μοντέλο MIKE 11 τοποθετούνται στη φόρμα προσομοίωσης **“Input”** και σχετίζονται με: α) το σχεδιασμό του ποτάμιου συστήματος – δίκτυο, αρχείο τύπου (*.nw11), β) τη δημιουργία των διατομών κατά μήκος του ποταμού, αρχείο τύπου (*.xns11), γ) τον καθορισμό των οριακών συνθηκών αρχείου τύπου (*.bnd11), δ) και τέλος την εισαγωγή των υδροδυναμικών παραμέτρων, αρχείο τύπου (*.hd11), Εικόνα 6.11.



Εικόνα 6. 11. Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο MIKE 11.

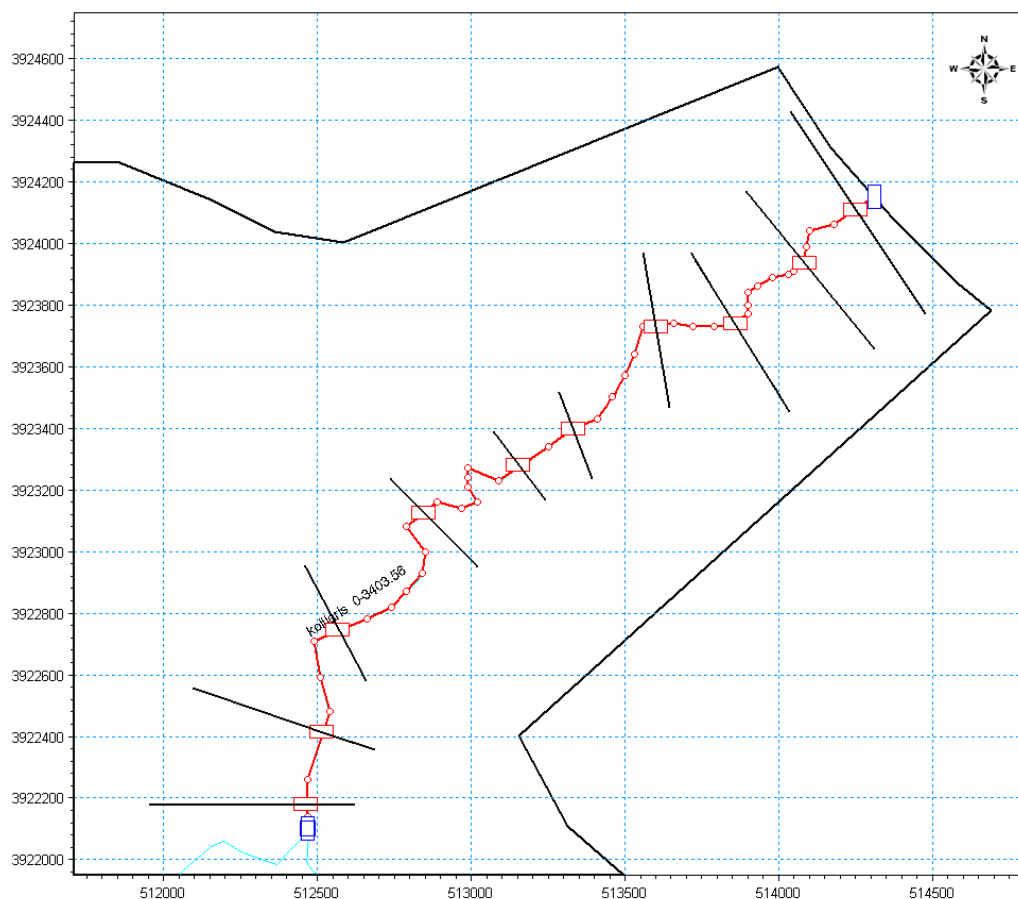
Σχεδιασμός κεντρικής γραμμής ροής και δημιουργία των γεωμετρικών δεδομένων (διατομές)

Η μορφή του πλημμυρικού κύματος, την οποία θέλουμε να προσομοιώσουμε, έχει άμεση σχέση με το πλάτος των διατομών που εμείς ορίζουμε. Σε κάθε περίπτωση, το πλάτος των διατομών που προσδιορίζουμε εξαρτάται από τη μορφολογία του ποταμού-κοιλάδας πλημμυρισμού, για κάθε πεδίο εφαρμογής.

Στην παρούσα εφαρμογή, προκειμένου να δημιουργήσουμε τις διατομές κατά μήκος του μελετούμενου τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη, χρησιμοποιήσαμε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (dem –digital elevation model) της υδρολογικής λεκάνης του Κοιλιάρη, το οποίο δημιουργήθηκε από τις ισοϋψείς της περιοχής μελέτης με τη χρήση του GIS. Στη συνέχεια από το συνολικό τμήμα του ποταμού, ψηφιοποιήθηκε εκείνο το τμήμα που βρίσκεται στην περιοχή που παρατηρούνται τα περισσότερα πλημμυρικά φαινόμενα (κεντρική γραμμή ροής). Μετά τη χάραξη της κεντρικής γραμμής ροής, δημιουργήθηκαν οι γραμμές τομής κάθετες στη γραμμή ροής. Οι γραμμές τομής σε συνδυασμό με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμεύουν στον προσδιορισμό των διατομών κατά μήκος της κεντρικής γραμμής ροής (MIKE 11 User Manual, 2007). Βάση των παραπάνω, δημιουργούνται οι διατομές του καναλιού σε οποιοδήποτε σημείο επιλεγεί, κατά μήκος αυτού. Το πλήθος των διατομών που χρησιμοποιήσαμε στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, για την παρούσα εφαρμογή, ήταν δέκα. Εικόνα 6.12.

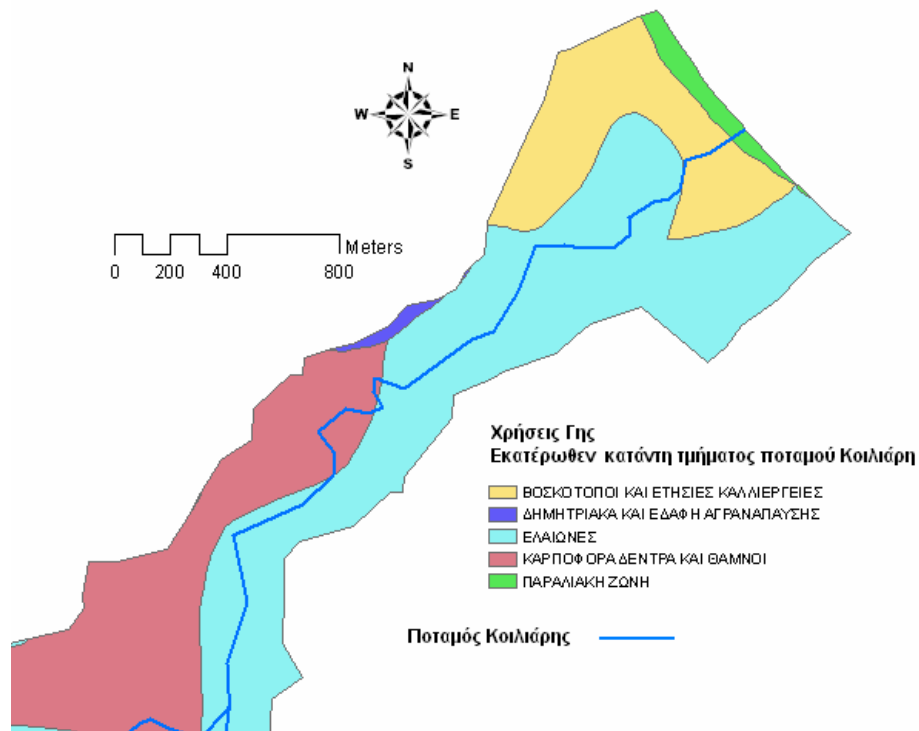
Η κεντρική γραμμή ροής, το μήκος των γραμμών τομείς καθώς και η γεωμετρία αυτών (σχέση απόστασης - υψόμετρου), όπως αυτά προσδιορίζονται στο GIS, μεταφέρονται στο MIKE 11 και απεικονίζονται στα αρχείο (*.nw11) και (*.xns11), αντίστοιχα.

Ένας άλλος παράγοντας που είναι δυνατό να προσδιοριστεί κατά μήκος των διατομών είναι η τιμή του συντελεστή Manning. Είναι γνωστό ότι η τιμή του συντελεστή Manning μεταβάλλεται από θέση σε θέση ανάλογα με το είδος τους εδάφους (αγροτικό περιβάλλον, αστικό περιβάλλον, υγρό περιβάλλον) αλλά και με το χρόνο. Στην περίπτωση μας ο προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας Manning σε κάθε διατομή καθορίστηκε από τις χρήσεις γης, όπως αυτές απεικονίζεται στην Εικόνα 6.13. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η τιμή του συντελεστή Manning, εξαρτάται και από το υλικό της κοίτης. Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή Manning που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα προσομοίωση παρουσιάζονται σε σχετικά εγχειρίδια Υδρολογίας (Τσακίρης, 1995 & Σάκκας, 2004).



Εικόνα 6. 12. Χωρική απεικόνιση της κεντρικής γραμμής ροής και των διατομών στο υδραυλικό μοντέλο MIKE 11.

Επίσης διερευνήθηκε η επίδραση της διήθησης και της εξάτμισης στην εξέλιξη του φαινομένου της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν μια σημαντική συνιστώσα σε λιγότερο δυναμικά και μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας φαινόμενα. Εν προκειμένου, δεδομένων των μεγεθών που υπεισέρχονται, είναι αναμενόμενο οι αντίστοιχες απώλειες να παίζουν ασήμαντο ρόλο στην εξέλιξη της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος.



Εικόνα 6. 13. Χρήσεις γης κατά μήκος των διατομών.

Οριακές συνθήκες

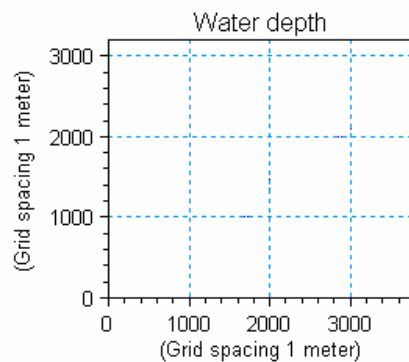
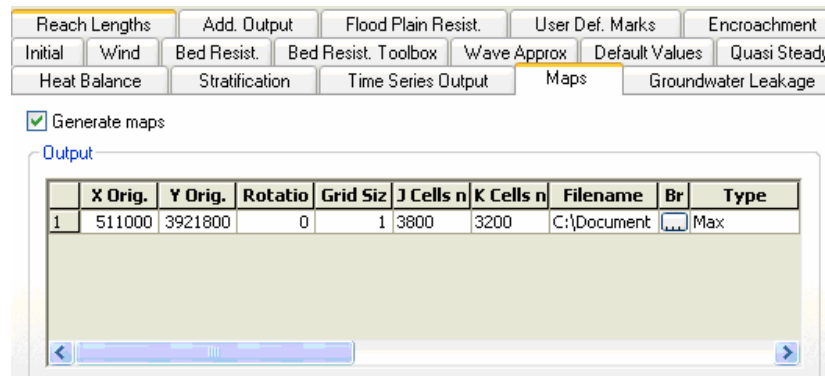
Το επόμενο στάδιο της προσομοίωσης, αφορά στον καθορισμό των οριακών συνθηκών, με μορφή χρονοσειρών. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου, στο ανάντη σημείο του μελετούμενου τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη τοποθετούνται οριακές συνθήκες – τιμές που σχετίζονται με την παροχή σε εκείνο το σημείο. Επίσης ως οριακές συνθήκες εισάγονται και τιμές στάθμης στο κατάντη σημείο του μελετούμενου τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη (MIKE 11 User Manual, 2007).

Υδροδυναμικές παράμετροι

Οι περισσότεροι υδροδυναμικοί παράγοντες που καθορίζονται στο δημιουργούμενο αρχείο τύπου (*.hd11), έχουν είδη προεπιλεγμένες τιμές, όπου στις περισσότερες των περιπτώσεων, αυτές οι τιμές είναι επαρκώς καθορισμένες για να εξασφαλίσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης.

Προκειμένου να απεικονίσουμε με μορφή 2-D χάρτη τη διόδευση ενός πλημμυρικού κύματος, στις υδροδυναμικές παραμέτρους (φόρμα par), θα πρέπει

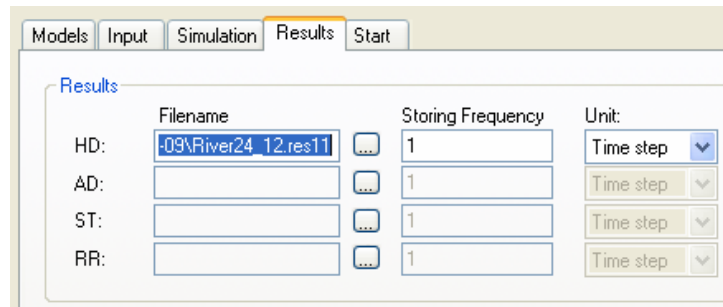
να προσδιοριστούν δεδομένα που αφορούν τις συντεταγμένες, τις διαστάσεις και τον τύπο του 2-D πλημμυρικού χάρτη. Επίσης ορίζουμε: (α) το μήκος κελιού – πλαισίου για τον εξερχόμενο πλημμυρικό χάρτη (χρονική εξέλιξη βάθους ροής νερού) ίσο με 1m, και (β) τον αριθμό των κελιών στη (X) και (Y) διεύθυνση ίσο με 3800 και 3200 αντίστοιχα (Εικόνα 6.14). Όπως εύκολα γίνεται κατανοητό, δημιουργήσαμε ένα αρκετά πυκνό κάνναβο με μικρά χωρικά βήματα, επιτυγχάνοντας έτσι την καλύτερη ανάλυση της διέλευσης του πλημμυρικού κύματος στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη. Επίσης στην ίδια φόρμα (map) ορίζουμε το αρχείο εξόδου για το δημιουργούμενο διδιάστατο πλημμυρικό χάρτη με τη μορφή αρχείου τύπου (*.dfs2) .



Εικόνα 6. 14. Δεδομένα εισόδου για τη δημιουργία του 2-D πλημμυρικού χάρτη.

Στη φόρμα προσομοίωσης **“Simulation”**, εισάγονται η περίοδος προσομοίωσης (10/2/2008, 00:00:00 – 12/2/2008, 00:00:00), το χρονικό βήμα (5 min) και τον τύπο των αρχικών – οριακών συνθηκών (Steady +Parameter). Όπως βλέπουμε το μικρό χρονικό βήμα που θέσαμε αυξάνει τη σταθερότητα της προσομοίωσης αυξάνει όμως παράλληλα και τον υπολογιστικό χρόνο, που απαιτείται για την προσομοίωση.

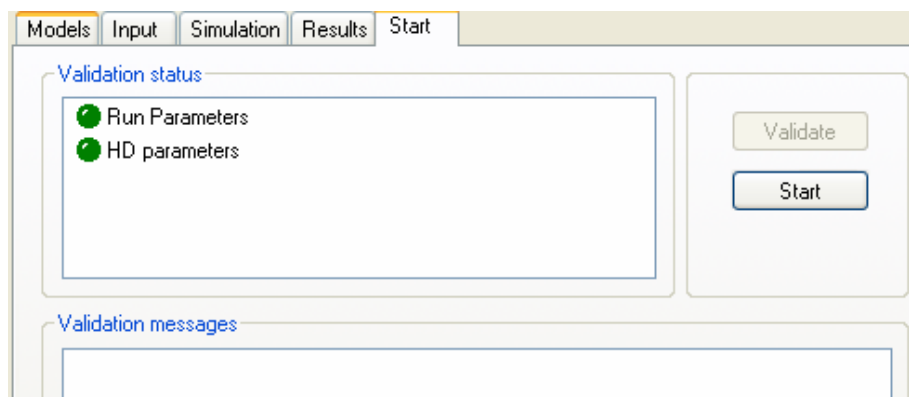
Στη φόρμα προσομοίωσης **“Results”**, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.15, καθορίζουμε το όνομα του αρχείου και τη διεύθυνση αποθήκευσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αρχείο τύπου *.res11.



	Filename	Storing Frequency	Unit:
HD:	-09\River24_12.res11	1	Time step
AD:		1	Time step
ST:		1	Time step
RR:		1	Time step

Εικόνα 6. 15. Αποθήκευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Τέλος στη φόρμα προσομοίωσης **“Start”**, όταν όλες οι απαραίτητες παράμετροι έχουν προσδιοριστεί, γίνεται η εκτέλεση (run) της προσομοίωσης, Εικόνα 6.16.



Validation status

- Run Parameters
- HD parameters

Validation messages

Validate

Start

Εικόνα 6. 16. Τελικό στάδιο για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

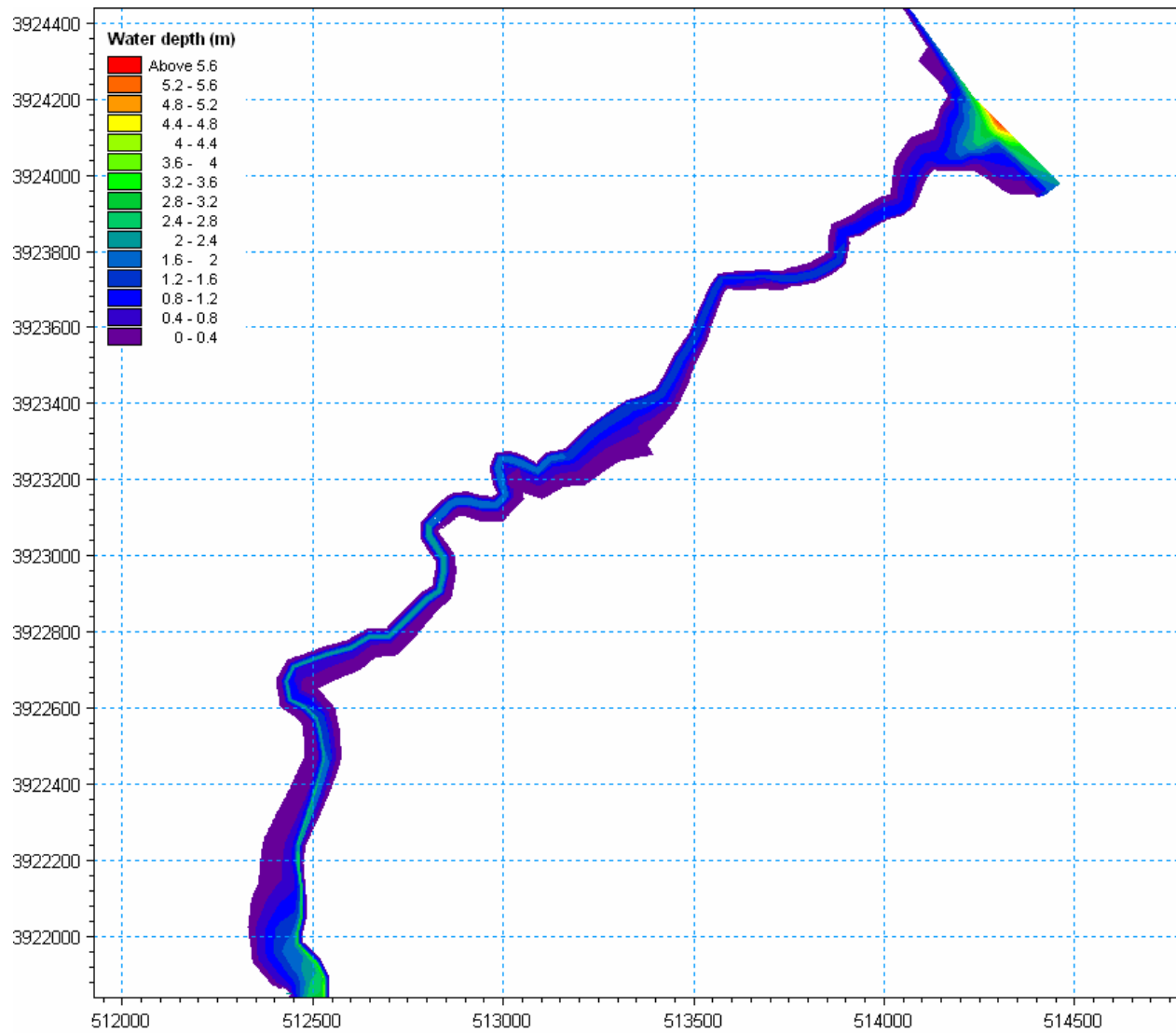
Αποτελέσματα 2-D προσομοίωσης διάδευσης πλημμυρικού κύματος

Όπως προαναφέραμε και στην αρχή του Κεφαλαίου, το MIKE 11 είναι ένα μονοδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο, με δυνατότητα μελέτης της υδραυλικής ενός ποτάμιου συστήματος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11 σε μια διάσταση, παρουσιάζονται στην εφαρμογή MIKE VIEW. Μπορούμε έτσι να μελετήσουμε για οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης και σε οποιοδήποτε σημείο του μελετούμενου τμήματος ποταμού, τη σχέση στάθμης- παροχής.

Πέραν αυτού, το MIKE 11 έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της διόδευσης πλημμυρικού κύματος, χωρίς όμως αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του 1-D μοντέλου και της κοιλάδας πλημμυρισμού (floodplain). Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος με το MIKE 11, παρουσιάζονται με τη μορφή αρχείου κάρναβου (*dfs2), στο Result Viewer του περιβάλλοντος εργασίας MIKE Zero. Η προσομοίωση του πλημμυρικού κύματος μπορεί να παρουσιαστεί είτε με τη μορφή ύψους ροής νερού (Water Elevation), είτε βάθους ροής νερού (Water Depth). Όσον αφορά τη χρονική διάσταση, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εξέλθουν με βάση α) τη χρονική εξέλιξη του πλημμυρικού κύματος (dynamic) και β) την τιμή του μέγιστου (max) ή του ελάχιστου (min) βάθους ροής νερού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στην Εικόνα 6.17, παρουσιάζεται με μορφή αρχείου κάρναβου (*dfs2) οι τιμές του μεγίστου βάθους ροής νερού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, για το κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. Βλέπουμε χαρακτηριστικά ότι η δυναμική προσομοίωση βάθους ροής του πλημμυρικού κύματος κυμαίνεται από 0 – 5.6 m.

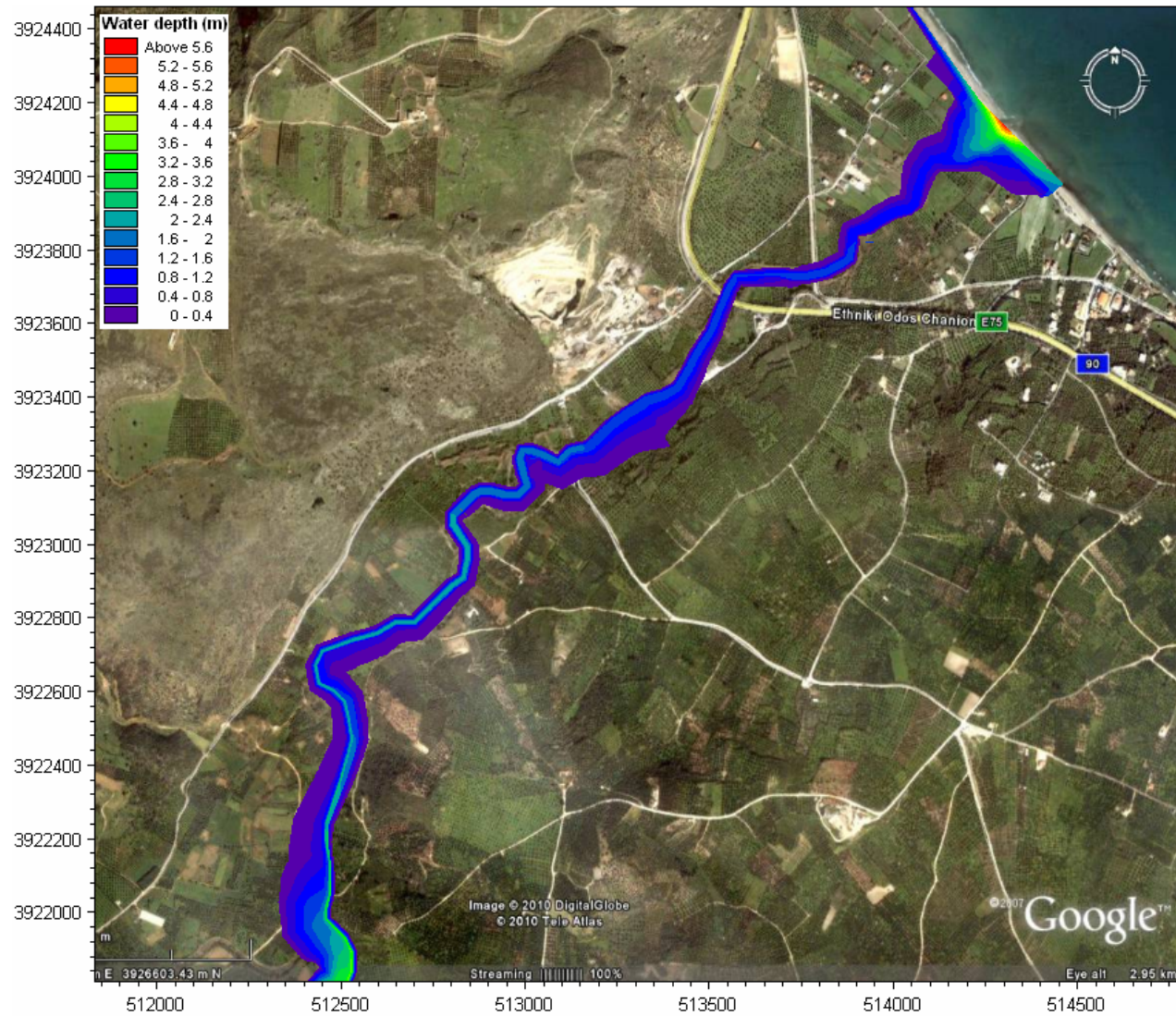
Με την εφαρμογή της τεχνικής Remote sensing και τη χρήση του Google Earth, τοποθετήσαμε ως υπόβαθρο αεροφωτογραφίες της περιοχής μελέτης. Στις Εικόνες 6.18 και 6.19 αντίστοιχα, γίνεται μια συγκρητική απεικόνιση του πλάτους ροής του ποταμού Κοιλιάρη (κατάντη τμήμα) υπό συνθήκες χαμηλής ροής – στάθμης με αυτές του μεγίστου βάθους ροής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Προκειμένου να διαπιστώσουμε ποιες περιοχές θα υποστούν τις συνέπειες του μελετούμενου πλημμυρικού κύματος και σε τι βαθμό – μέγιστο βάθος ροής νερού, η απεικόνιση του πλημμυρικού κύματος μετατρέπεται σε διάφανη μορφή (transparent), Εικόνα 6.20. Βάση της Εικόνας 6.20, διαπιστώνουμε ότι αρκετές καλλιεργήσιμες περιοχές, αλλά και κτιριακές εγκαταστάσεις θα μπορούσαν να υποστούν σημαντικές ζημιές από το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα. Ο βαθμός της ζημιάς που δύναται να υποστούν καλλιέργειες και κτιριακές εγκαταστάσεις εξαρτάται άμεσα από το δυναμικό βάθος του πλημμυρικού κύματος σε κάθε σημείο της μελετούμενης περιοχής. Η εν λόγω πληροφορία για κάθε σημείο της πλημμυρικής περιοχής μπορεί να αντληθεί από το δημιουργούμενο δυναμικό κάρναβο του βάθους πλημμυρικού νερού (3200x3800 κελιά, μήκος κελιού 1m), Εικόνα 6.21.



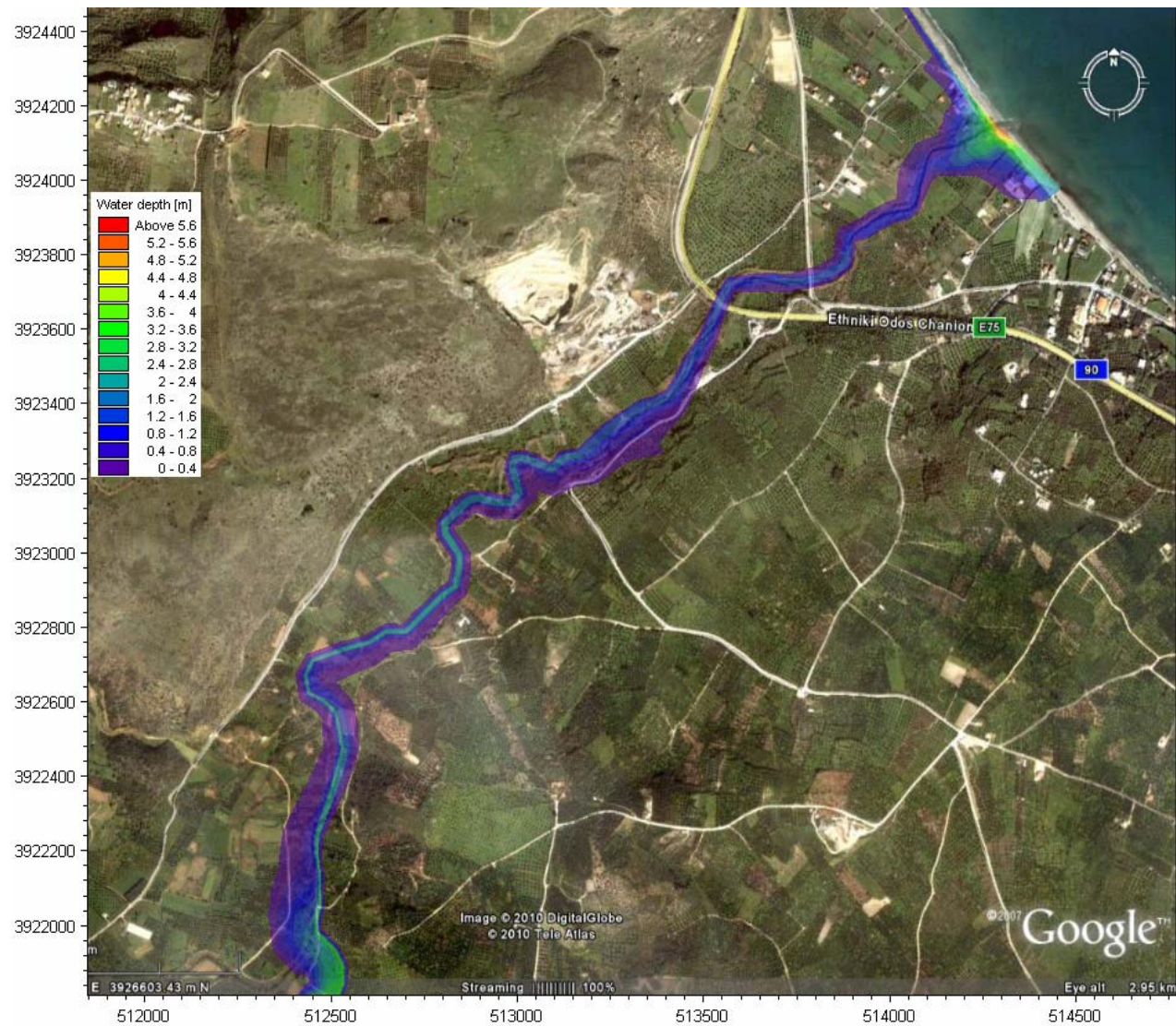
Εικόνα 6. 17. Μέγιστες τιμές βάθους ροής νερού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



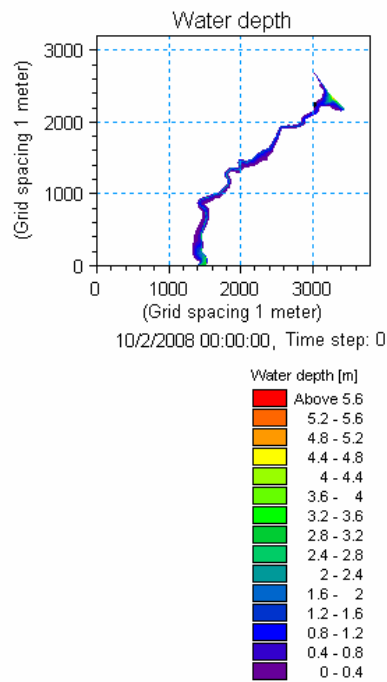
Εικόνα 6. 18. Πλάτος ροής ποταμού Κοιλιάρη (κατάντη τμήμα), πριν την έναρξη του πλημμυρικού κύματος.



Εικόνα 6. 19. Μέγιστο πλάτος πλημμυρικού κύματος και διακύμανση βάθους νερού.



Εικόνα 6. 20. Διαφανή απεικόνιση μέγιστου πλάτους πλημμυρικού κύματος και διακύμανση βάθους νερού.

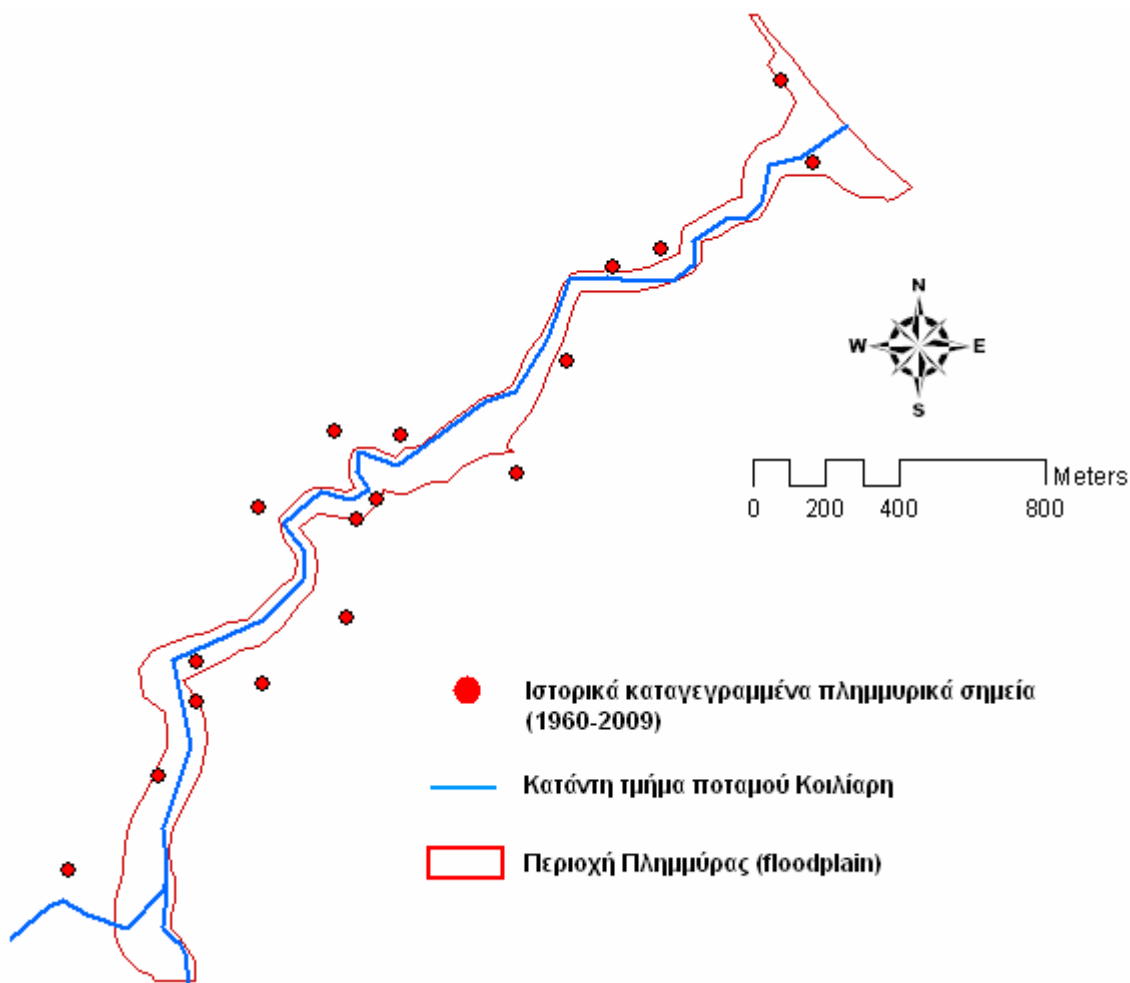


	3030	3031	3032	3033	3034	3035	3036	3037	3038	3039	3040	
2265												
2264												
2263												
2262												
2261												
2260												
2259												
2258												
2257												
2256												
2255												
2254												0.00
2253												0.00
2252											0.004513161	0.0
2251										0.001160981	0.0109798	0.0
2250										0.00762753	0.01745408	0.0
2249									0.004272627	0.01406526	0.02388108	0.0
2248								0.000933175	0.01069213	0.0204738	0.0302786	0.0
2247								0.007334603	0.01708236	0.02685277	0.03664629	0.0
2246							0.003992565	0.01370666	0.02344293	0.03320181	0.04298373	0.0
2245						0.000665923	0.0103466	0.02004897	0.02977347	0.03952052	0.04929056	0.0
2244						0.00700207	0.0166708	0.02636116	0.03607359	0.04580851	0.05556636	0.0
2243					0.003672982	0.0133083	0.02296478	0.03264284	0.0423429	0.05206538	0.06181074	0.0
2242				0.000359232	0.00996138	0.01958423	0.02922817	0.03889363	0.048581	0.05829074	0.06802328	0.0
2241				0.006629941	0.01621939	0.02582947	0.03546058	0.04511311	0.0547875	0.06448417	0.07420357	0.0
2240			0.003313883	0.01287018	0.02244664	0.03204364	0.04166159	0.0513009	0.06096197	0.07064525	0.082311	0.0
2239		1.310882e-0	0.009536491	0.01907957	0.02864273	0.03822635	0.04783082	0.05745658	0.06710401	0.077283	0.09268615	0.0
2238		0.006218222	0.01572816	0.02525772	0.03480726	0.04437717	0.05396786	0.06357973	0.0732132	0.08767042	0.1030825	0.0
2237	0.002915277	0.01239232	0.02188852	0.03140423	0.04093983	0.05049572	0.06007228	0.06966993	0.08264368	0.09807915	0.1135005	0.0
2236	0.009071941	0.01853502	0.02801715	0.0375187	0.04704004	0.05658157	0.06614368	0.07760599	0.09306464	0.1085095	0.1239402	0.0
2235	0.01179025	0.02307151	0.03411366	0.04360072	0.05310747	0.0626343	0.07255743	0.08803909	0.1035073	0.1189617	0.134402	0.0
2234	0.01374794	0.02500292	0.03628416	0.04759194	0.05892657	0.06865349	0.08300255	0.09849388	0.1139718	0.129436	0.1448862	0.0
2233	0.01568907	0.02691769	0.03817238	0.04945343	0.06076115	0.07388576	0.09235875	0.1089707	0.1244585	0.1399328	0.1553932	0.0
2232	0.01761362	0.02881577	0.04004381	0.05129804	0.06257874	0.07768258	0.09618706	0.11466	0.1331011	0.1504523	0.1659231	0.0
2231	0.01952154	0.03069712	0.04189842	0.05312571	0.0643793	0.0814991	0.1000352	0.11854	0.1370132	0.1554543	0.1738631	0.0
2230	0.02141281	0.03256172	0.04373616	0.05493643	0.06673678	0.08533537	0.1039032	0.12244	0.1409454	0.1594189	0.1778603	0.0
2229	0.02328738	0.03440952	0.04555702	0.05673015	0.07056119	0.08919144	0.1077912	0.12636	0.1448977	0.1634038	0.1818779	0.0
2228	0.02514522	0.0362405	0.04736094	0.05850684	0.07440533	0.09306735	0.1116991	0.1303001	0.1488702	0.167409	0.185916	0.0
2227	0.02698629	0.0380546	0.0491479	0.06026646	0.07826922	0.09696312	0.115627	0.1342604	0.152863	0.1714346	0.1899746	0.0
2226	0.02881057	0.03985181	0.05091786	0.06339749	0.08215292	0.1008788	0.1195749	0.1382408	0.1568761	0.1754805	0.1940537	0.0
2225	0.03061801	0.04163209	0.05267078	0.06726912	0.08605645	0.1048145	0.1235429	0.1422413	0.1609095	0.179547	0.1981534	0.0

Εικόνα 6. 21. Δυναμικό βάθος του πλημμυρικού κύματος σε κάθε σημείο της πλημμυρικής περιοχής (κάνναβος).

Σύγκριση πλημμυρικού κύματος (10') με ιστορικά πλημμυρικά σημεία

Στην Εικόνα 6.22, παρατηρούμε τη μέγιστη έκταση του μελετούμενου πλημμυρικού κύματος 10', με βάση τα αποτελέσματα της διδιάστατης προσομοίωσης με το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11. Επίσης στην ίδια εικόνα κατανέμονται χωρικά διάφορα ιστορικά καταγεγραμμένα πλημμυρικά σημεία κατά το χρονικό διάστημα (1960-2009). Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, αρκετά μεγάλα πλημμυρικά κύματα εμφανίστηκαν στη μελετούμενη περιοχή, προξενώντας ανθρώπινες απώλειες αλλά και τεράστιες σε πολλές επιπτώσεις υλικές ζημιές. Όπως βλέπουμε χαρακτηριστικά στην Εικόνα 6.22, αρκετά ιστορικά πλημμυρικά σημεία εσωκλείονται στο παρόν πλημμυρικό κύμα, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σχετική ακρίβεια προσομοίωσης της έκτασης του μελετούμενου πλημμυρικού κύματος 10'.



Εικόνα 6. 22. Πλημμυρικό κύμα (10') - ιστορικά καταγεγραμμένα πλημμυρικά σημεία.

6.4.2. Εκτίμηση ζημιών κατά τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος (10') στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη.

Όπως προαναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να προσδιορίσουμε τις οικονομικές ζημιές από τη διόδευση ενός πλημμυρικού κύματος, είναι απαραίτητο να έχουμε στη διάθεση μας ένα 2-D πλημμυρικό χάρτη (κάνναβο) για την περιοχή ενδιαφέροντος, όπου θα προσδιορίζονται η έκταση, το βάθος και ο χρόνος του πλημμυρικού κύματος.

Στην περίπτωση του πλημμυρικού γεγονότος που μελετάμε οι απαραίτητες πληροφορίες (χρόνος, έκταση και βάθος πλημμύρας) προέρχονται από το διδιάστατο πλημμυρικό χάρτη (κάνναβο) που προέκυψε με την εφαρμογή του μοντέλου MIKE 11 στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, Εικόνα 6.19. Σύμφωνα με το δημιουργούμενο δυναμικό χάρτη του πλημμυρικού κύματος (αρχείο τύπου raster), είναι δυνατό σε κάθε σημείο της πλημμυρικής διαδρομής να προσδιορίσουμε το βάθος και την έκταση της πλημμύρας σε σχέση με το χρόνο. Κατά τη διαδρομή του, το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα δύναται να προξενήσει ζημιές σε καλλιέργειες, κτιριακές εγκαταστάσεις, καθώς επίσης και σε υποδομές - δευτερεύουσες οδικές αρτηρίες (διακοπή κυκλοφορίας), Εικόνες 6.23, 6.24, και 6.25.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα γίνει μια απλή οικονομική αποτίμηση των γεωργικών και κτιριακών ζημιών που δύναται να προκαλέσει το συγκεκριμένο πλημμυρικό κύμα στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη. Προκειμένου να αποτιμήσουμε τις οικονομικές ζημιές από το πλημμυρικό κύμα 10', σε αγροτικές καλλιέργειες και σε κτιριακές εγκαταστάσεις, θα χρησιμοποιήσουμε τις Εξισώσεις 6.7 και 6.15 αντίστοιχα.

Απαραίτητα στοιχεία εισόδου στις παραπάνω εξισώσεις είναι το εμβαδό της γεωργικής γης – κτιρίου που θα υποστεί ζημιά, τα γενικά οικονομικά χαρακτηριστικά της κάθε καλλιέργειας – κτιρίου καθώς επίσης και οι καμπύλες μέγιστου βάθους πλημμύρας και ζημιών. Λόγω έλλειψης ιστορικών στοιχείων, για τον προσδιορισμό των καμπυλών βάθους πλημμύρας και γεωργικών – κτιριακών ζημιών, στην περιοχή μελέτης, θα χρησιμοποιήσουμε τις τυπικές καμπύλες

βάθους πλημμύρας - ζημιών για καλλιέργειες και κτιριακές εγκαταστάσεις, όπως αυτές παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.4 και 6.5 αντίστοιχα.

Εκτίμηση γεωργικών ζημιών κατά τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος (10')

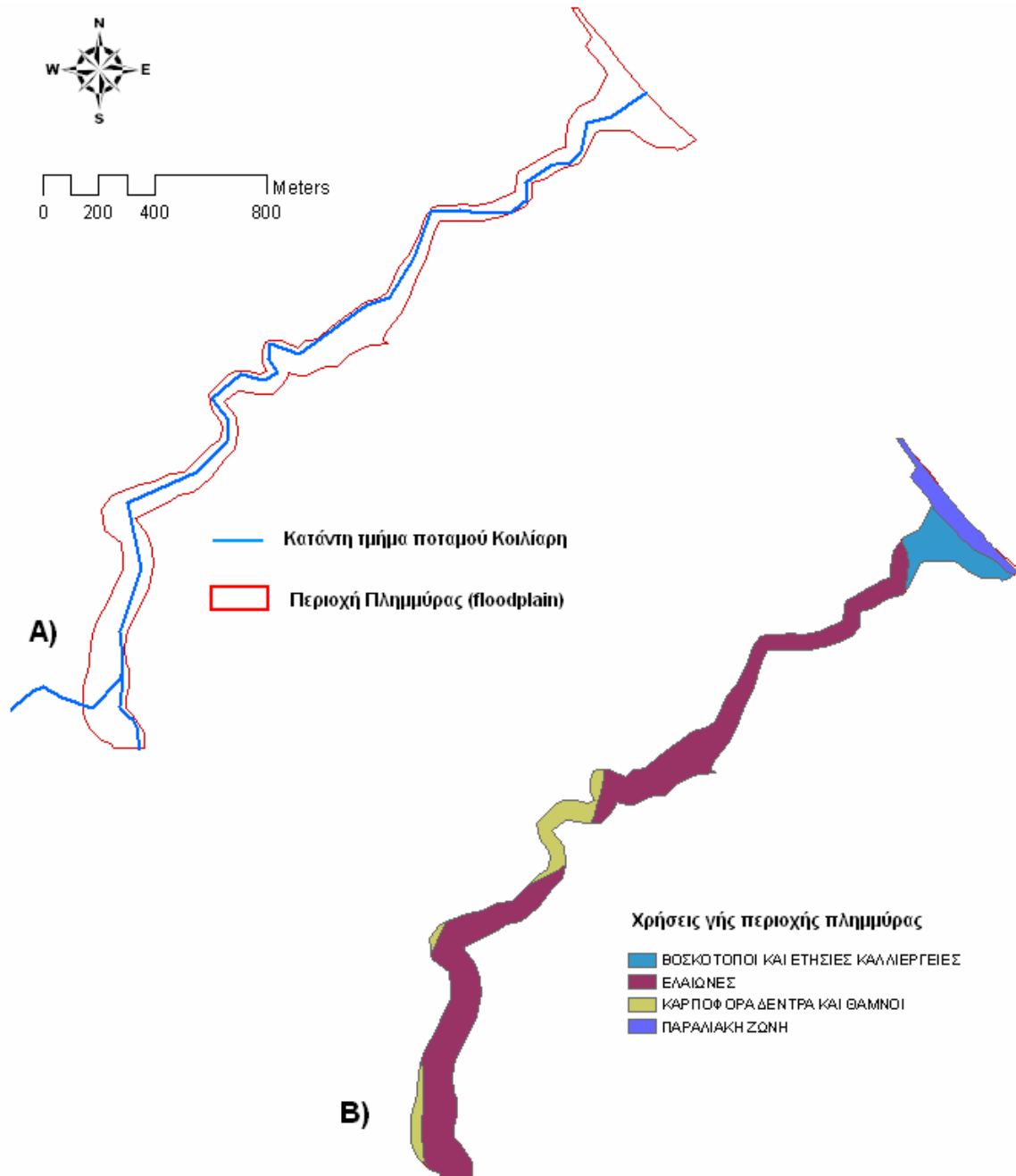
Στην πλημμυρική περιοχή (floodplain) (Εικόνα 6.23 A, B), με τη χρήση αεροφωτογραφιών και του προγράμματος Corine 2000 προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες χωρικές εκτάσεις – χρήσεις γης που θα υποστούν ζημιές από το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη. Οι εκτάσεις αυτές αποτελούνται από ελαιώνες σε έκταση 202.154 στρεμμάτων, πορτοκαλεώνες 29.874 στρεμμάτων, βοσκοτόπια έκτασης 37.091 στρεμμάτων και μέρος της παραλιακής ζώνης με εμβαδό 27.241 στρεμμάτων. Από τις παραπάνω χρήσεις γης, αυτές που παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό ενδιαφέρον ως προς τις γεωργικές ζημιές είναι αυτές των ελαιώνων και των πορτοκαλεώνων αντίστοιχα. Βάση αυτής της παραδοχής, η εκτιμώμενη οικονομική ζημιά των γεωργικών εκτάσεων που πλήττονται από το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα θα επικεντρωθεί στους ελαιώνες και τους πορτοκαλεώνες της περιοχής μελέτης.

Προκειμένου να εκτιμήσουμε τις γεωργικές ζημιές του συγκεκριμένου πλημμυρικού κύματος, στις εκτάσεις που επηρεάζει, θα εφαρμόσουμε την Εξίσωση 6.15. Απαραίτητα στοιχεία εισόδου στην παραπάνω εξίσωση είναι:

α) τα γενικά χαρακτηριστικά των γεωργικών εκτάσεων και των προϊόντων τους, όπως είναι το εμβαδό της γεωργικής έκτασης, και το κόστος του προϊόντος - δέντρου ανά μονάδα εμβαδού, (Πίνακας 6.1). Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα οικονομικά στοιχεία των παραγόμενων προϊόντων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1, αντιστοιχούν σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις εντατικής μορφής (υψηλής παραγωγικότητας), για τα έτη 2008-09. Βάση παρατηρήσεων στο πεδίο, οι ελαιώνες και οι πορτοκαλεώνες της περιοχής μελέτης ανήκουν σε καλλιέργειες εντατικής μορφής.

β) το δυναμικό βάθος νερού του πλημμυρικού κύματος, που επηρεάζει κάθε καλλιέργεια (2-D ψηφιακός χάρτης τύπου raster) , Εικόνα 6.20.

γ) το ποσοστό ζημιάς, που δύναται να προκαλέσει το συγκεκριμένο πλημμυρικό κύμα στις εν λόγω γεωργικές καλλιέργειες, Εικόνα 6.5.



Εικόνα 6. 23 Α, Β. Πλημμυρική περιοχή και χρήσεις γης που επηρεάζονται.

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να επισημάνουμε την ιδιαιτερότητα των δενδρωδών καλλιεργειών όσον αφορά την εκτίμηση του παράγοντα CUW (εκτίμηση κόστους ανά μονάδα βάρους της καλλιέργειας), στην Εξίσωση 6.15. Σύμφωνα με τις πρακτικές των οικονομικών αποζημιώσεων του ΕΛΓΑ (Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων), όταν το βάθος του πλημμυρικού κύματος $< 1\text{m}$ τότε ο παράγοντας CUW, στις δενδρώδεις καλλιέργειες, θεωρούμε ότι σχετίζεται με τον προσδιορισμό του κόστους όσον αφορά το παραγόμενο προϊόν. Όταν όμως, το πλημμυρικό κύμα σε μια δενδρώδη καλλιέργεια είναι $> 1\text{ m}$, τότε ο προσδιορισμός του παράγοντα CUW αφορά το κόστος του δένδρου ως μονάδα, οπότε η αντίστοιχη γεωργική ζημιά θα είναι πολλαπλάσια σε σχέση με αυτήν που εμφανίζεται όταν το πλημμυρικό κύμα είναι $< 1\text{m}$.

Οι γεωργικές εκτάσεις-καλλιέργειες που θα υποστούν οικονομική ζημιά από τη διόδευση του συγκεκριμένου πλημμυρικού κύματος καθώς και τα κύρια οικονομικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων καλλιεργειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Βάση των παραπάνω και εφαρμόζοντας την Εξίσωση 6.15, προκύπτουν οι συνολικές γεωργικές ζημιές που θα δημιουργούσε το συγκεκριμένο πλημμυρικό κύμα, Πίνακας 6.1.

Εκτίμηση αστικών - κτιριακών ζημιών κατά τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος (10')

Το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα δύναται να προκαλέσει οικονομικές ζημιές σε αρκετές κτιριακές μονάδες, κυρίως κοντά στην ακτογραμμή. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 6.24, παρουσιάζονται τρία κτιριακά συγκροτήματα αποτελούμενα από έξι συνολικά κτίρια, τα οποία επηρεάζονται από το πλημμυρικό κύμα. Αρκετά από αυτά τα κτίρια βρίσκονται στην παραλιακή ζώνη της περιοχής μελέτης και πρόκειται για ξενοδοχειακές μονάδες. Προκειμένου να εκτιμήσουμε τις οικονομικές επιπτώσεις του συγκεκριμένου πλημμυρικού κύματος για τις αντίστοιχες κτιριακές μονάδες, θα εφαρμόσουμε την Εξίσωση 6.7. Απαραίτητα στοιχεία εισόδου στην παραπάνω εξίσωση είναι:

α) τα γενικά χαρακτηριστικά των κτιριακών μονάδων, όπως είναι το εμβαδό και η αντικειμενική τους αξία ανά τετραγωνικό μέτρο (m^2), Πίνακας 6.2,

β) το μέγιστο βάθος πλημμυρικού κύματος, το οποίο επηρεάζει κάθε κτιριακή μονάδα. Η συγκεκριμένη παράμετρος προσδιορίζεται από το ψηφιακό χάρτη (τύπου raster) του μέγιστου βάθους ροής νερού, για την περιοχή μελέτης, Εικόνα 6.20, και

γ) το ποσοστό ζημιάς, σε σχέση με το μέγιστο βάθος του πλημμυρικού κύματος, που δύναται να προκαλέσει το συγκεκριμένο πλημμυρικό φαινόμενο στις εν λόγω κτιριακές μονάδες, Εικόνα 6.4.



Εικόνα 6. 24. Κτιριακά συγκροτήματα (έξι συνολικά κτίρια), που επηρεάζονται από το πλημμυρικό κύμα (10').



Εικόνα 6. 25. Οδικές αρτηρίες οι οποίες που επηρεάζονται επηρεαστούν από το πλημμυρικό κύμα (10').

Πίνακας 6. 1. Οικονομικά χαρακτηριστικά των γεωργικών καλλιεργειών - συνολικές γεωργικές ζημιές στην πλημμυρική περιοχή.

Χρήσεις γης	Εμβαδό (στρέμματα)	Αριθμός δέντρων ανά στρέμμα	Μέσο βάρος προϊόντος ανά στρέμμα (Kg)	Κόστος δέντρου (€)	Κόστος προϊόντος ανά κιλό (€)	Ζημιά στην καλλιέργεια ανά μονάδα εμβαδού	Κόστος ανά καλλιέργεια (€)	Συνολική γεωργική ζημιά από την πλημμύρα (€)
Ελαιώνες	202.154	20	80 (ελαιολάδο)	800	2 / κιλό ελαιολάδου	0.1-0.45	≈ 6,468	≈ 10,053
Καρποφόρα δέντρα (Πορτοκαλιών)	29.874	40	3.000 (πορτοκαλιών)	200	0.20 / κιλό πορτοκαλιών	0.1-0.45	≈ 3,584	

Πίνακας 6. 2. Οικονομικά χαρακτηριστικά κτιριακών εγκαταστάσεων - συνολικές κτιριακές ζημιές στην πλημμυρική περιοχή.

Κτιριακές μονάδες	Εμβαδό (m ²)	Αντικειμενική αξία ανά m ² (€)	Ποσοστό ζημιάς από την πλημμύρα	Κόστος ανά κτιριακή μονάδα (€)	Συνολική ζημιά κτιριακών μονάδων από την πλημμύρα (€)
1	100	700	0.1	≈ 7,000	≈ 178,875
2	510	700	0.05	≈ 17,850	
3	425	700	0.15	≈ 44,625	
4	200	700	0.25	≈ 35,000	
5	320	700	0.3	≈ 67,200	
6	300	600	0.04	≈ 7,200	

Βάση των παραπάνω και εφαρμόζοντας την Εξίσωση 6.7, προσδιορίζουμε τις μεμονωμένες ζημιές που θα υποστούν οι κτιριακές μονάδες στην περιοχή μελέτης. Το συνολικό κόστος όλων των κτιριακών εγκαταστάσεων που βρίσκονται στην περιοχή του επηρεάζει το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα ανέρχεται στο ποσό των 178,875 (€), Πίνακας 6.2. Συνολικά το μελετούμενο πλημμυρικό κύμα δύναται να προκαλέσει οικονομικές ζημιές σε γεωργικές εκτάσεις και κτιριακές μονάδες που ανέρχονται περίπου στο ποσό των 188,928 (€), Πίνακες 6.1 και 6.2.

6.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου, ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: α) Ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο με φυσική σημασία για πλημμυρικά φαινόμενα, το οποίο είναι πλεγματικό και προσομοιώνει τις πλημμυρικές παραμέτρους για τις δεδομένους υδρολογικές συνθήκες στο χώρο και στο χρόνο, και β) Ένα μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών.

Όσον αφορά την πρώτη συνιστώσα, το υδρολογικό – υδραυλικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε ήταν το MIKE SHE – MIKE 11, το οποίο μας έδωσε τη δυνατότητα της διδιάστατης προσομοίωσης του πλημμυρικού κύματος σε πραγματικές συνθήκες. Το μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών βασίστηκε στην έννοια της εκτίμησης του οικονομικού κόστους ανά μονάδα αντικειμένου ή υποδομής. Η παραπάνω εκτίμηση έγινε εφικτή με τη χρήση μαθηματικών συναρτήσεων που συσχετίζουν τα χαρακτηριστικά – παράμετροι της πλημμύρας (π.χ. βάθος νερού) με το ποσοστό ζημιάς και τη μοναδιαία αξία του αντικειμένου – υποδομή. Οι δυο παραπάνω συνιστώσες του ολοκληρωμένου συστήματος ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου αλληλεπιδρούν δυναμικά. Έτσι οι παράμετροι – χαρακτηριστικά των πλημμυρικών φαινομένων που προσημειώνονται με το υδρολογικό – υδραυλικό μοντέλο MIKE SHE – MIKE 11, στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, εισάγονται στο μοντέλο πλημμυρικών απωλειών για να υπολογιστεί τελικά η ζημιά που προκαλείται από τις πλημμύρες.

Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων, εφαρμόστηκε για ένα συγκεκριμένο θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός στην κατάντη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Έτσι προσδιορίστηκαν η χωρική έκταση και το δυναμικό βάθος του πλημμυρικού κύματος, ενώ ακολούθως εκτιμήθηκαν οι οικονομικές (γεωργικές & κτιριακές) ζημιές που θα μπορούσε να προκαλέσει το συγκεκριμένο πλημμυρικό κύμα στην κατάντη περιοχή της λεκάνης απορροής.

Η παραπάνω μεθοδολογία (προτεινόμενο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κίνδυνου) μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής και να αποτελέσει ένα απλό, αλλά χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση των επακόλουθων οικονομικών ζημιών ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος. Βάση αυτής της μεθοδολογία – πλατφόρμας, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε διαχειριστικά σενάρια, με σκοπό την καλύτερη δυνατή ανάλυση του κινδύνου από ένα επερχόμενο πλημμυρικό γεγονός. Επίσης τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω των διαφόρων σεναρίων θα μας βοηθήσουν στην επιλογή των κατάλληλων παρεμβάσεων (κατασκευαστικών ή μη), με τελικό στόχο την αντιμετώπιση των πλημμυρών και τη μείωση των ζημιών που μπορούν αυτές να επιφέρουν.

Θα πρέπει όμως σε αυτό το σημείο, να επισημάνουμε ότι σε καμία περίπτωση η παραπάνω μεθοδολογία, αποτίμησης πλημμυρικών ζημιών, δεν μπορεί να αντικαταστήσει την επί τόπου πραγματογνωσία των ειδικών επιστημόνων (γεωπόνων και μηχανικών) όσον αφορά τον ακριβή υπολογισμό οικονομικών ζημιών σε καλλιέργειες και κτιριακές εγκαταστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής διατριβής είναι η ολοκληρωμένη και βιώσιμη στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της νέας Ευρωπαϊκής Οδηγίας σχετικά την αντιμετώπιση των πλημμυρών (2007/60/EC). Σύμφωνα με την παραπάνω Οδηγία, η 100% αντιπλημμυρική προστασία δεν είναι εφικτή. Εφικτή είναι μόνο η αξιολόγηση και η διαχείριση της επικινδυνότητας των πλημμυρικών φαινομένων. Με βάση αυτή τη διαπίστωση αναλύουμε ένα πλάνο διαχειριστικών μεθόδων αντιπλημμυρικής προστασίας. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένα πλάνο διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής και στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής διατριβής εφαρμόζεται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, Ν. Χανίων (Κρήτη). Το βιώσιμο αυτό πλάνο πλημμυρικής διαχείρισης απαρτίζεται από δύο αλληλένδετες συνιστώσες: Α) Τη σωστή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων και Β) Τη χωρική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η σωστή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων, με τη σειρά της περιλαμβάνει τις ακόλουθες δράσεις: i) Προ-πλημμυρικά Μέτρα (the pre-flood measures), ii) Σύστημα Πρόβλεψης-Προειδοποίησης Πλημμυρικού Κινδύνου (the flood forecasting warning system), και iii) Μετά-πλημμυρικά Μέτρα (the after flood measures).

Η προληπτική διαχείριση του κινδύνου από τις πλημμύρες περιλαμβάνει: i) Τεχνικά μέτρα, για τον έλεγχο και τη διαχείριση των πλημμυρών (μικρά φράγματα και έργα διατήρησης και σταθεροποίηση της όχθης των καναλιών), ii) Ρυθμιστικά μέτρα, μέσω της ανάπτυξης κανονισμών για τον προγραμματισμό των χρήσεων γης και της χωροταξίας οικισμών που λαμβάνουν υπόψη τους κινδύνους από τις πλημμύρες, και iii) Οικονομικά μέτρα, για την ανάπτυξη κινήτρων με σκοπό την προώθηση των ρυθμιστικών μέτρων και την ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων επικοινωνίας και συνεχούς ενημέρωσης. Σημαντικό είναι ο σχεδιασμός των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας να αρχίζει από τα ανάντη και να επεκτείνεται μέχρι και την κατάντη περιοχή. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι τα τεχνικά μέτρα που γίνονται χωρίς να προηγηθεί η κατάλληλη ερευνητική – μελετητική προεργασία (πάντα από τις υψηλές προς τις χαμηλές περιοχές) έχουν συνήθως καταστροφικές συνέπειες ή, στην καλύτερη περίπτωση, αποτελούν σπατάλη χρόνου και πόρων. Αντιστοίχως, θεσμικά μέτρα που εξαγγέλλονται χωρίς να αποσαφηνίζονται πλήρως στο κοινό με

πειστικό και εύληπτο τρόπο η τεκμηρίωση, η φιλοσοφία, τα αναμενόμενα αποτελέσματα, οι στόχοι και οι περιοχές εφαρμογής τους, δεν γίνονται κοινωνικά αποδεκτά και επιφέρουν μεγάλες αντιδράσεις, ή θεσμοθετούνται μεν αλλά δεν ενεργοποιούνται ποτέ.

Πρέπει επίσης να αναφέρουμε τον ιδιαίτερο ρόλο που πρέπει να διαδραματίσουν οι Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) στην προληπτική και μετά – πλημμυρική διαχείριση του κινδύνου από τις πλημμύρες. Το μικρό μέγεθος των ΟΤΑ επιτρέπει ευελιξία, προϋπόθεση που θεωρείται αναγκαία και ικανή συνθήκη για μία αποτελεσματική αντιμετώπιση, ενώ παράλληλα περιορίζει τους γραφειοκρατικούς μηχανισμούς, τα όργανα και τις διαδρομές που μία ανάλογη πολιτική θα είχε να διασχίσει κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της, από το κεντρικό κράτος. Επίσης δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι οι ΟΤΑ, ως η πλησιέστερη εξουσία προς τον πολίτη, έχει τόσα χρόνια αναπτύξει με τους δημότες αμφίδρομες σχέσεις- γνώσεις και μπορεί με τον καλύτερο τρόπο να εκφράσει τις ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες του κάθε τόπου.

Μια από τις πιο θεμελιώδεις προσεγγίσεις στη διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων είναι η εκτίμηση της χωρικής επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων με τη χρήση GIS. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη όπου καθόριστηκαν οι περιοχές και οι αντίστοιχοι οικισμοί που δύναται να υποστούν καταστροφές από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό φαινόμενο. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας εκτίμησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας επαληθεύτηκαν με ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα, στη μελετούμενη λεκάνη απορροής. Έτσι γενικότερα, η παρούσα μεθοδολογία θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο πρότερης γνώσης των περιοχών εκείνων που εμφανίζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα (επιρρεπείς) σε πλημμυρικά φαινόμενα. Το γεγονός αυτό που θα μπορούσε να βοηθήσει στην καλύτερη οργάνωση ενός διαχειριστικού σχεδίου αντιπλημμυρικής προστασίας.

Επιπλέον, ο συνδυασμός της παραπάνω μεθοδολογίας με ένα αποτελεσματικό σύστημα πρόβλεψης και προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου (Forecasting-Warning System) με βάση τη μέθοδο Day's, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή των πλημμυρικών καταστροφών και την

εξασφάλιση του δημόσιου αισθήματος ασφάλειας. Βασική παράμετρος στη δημιουργία ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου είναι ο προσδιορισμός των θέσεων όπου θα τοποθετηθούν αντίστοιχα οι μετεωρολογικοί και υδρομετρικοί σταθμοί. Η μετάδοση των μετρήσεων θα πρέπει να γίνεται μέσω τηλεμετρικού δικτύου, ώστε σε πραγματικό χρόνο να γνωρίζουμε τις παραμέτρους – συνθήκες που επικρατούν στη λεκάνη απορροής. Θα πρέπει επίσης να υπάρξει η πρόβλεψη ώστε το όλο σύστημα να μπορεί να λειτουργήσει και ως ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης (Warning System), για την άμεση ανταπόκριση του κρατικού μηχανισμού στην περίπτωση πλημμυρικών γεγονότων. Σύμφωνα με τα παραπάνω στη μελετούμενη περιοχή (λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη) τοποθετήθηκαν τρεις τηλεμετρικοί μετεωρολογικοί (M1, M2, M3) και τρεις τηλεμετρικοί υδρομετρικοί σταθμοί (H1, H2, H3), οι οποίοι σε πραγματικό χρόνο μας δίνουν πληροφορίες για τις υδρομετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος προειδοποίησης για πλημμύρες εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης, την επεξεργασία της πρόβλεψης σε προειδοποίηση, για τις περιοχές που θα επηρεαστούν, καθώς επίσης και από την ερμηνεία της προειδοποίησης από τους αρμόδιους φορείς που τη λαμβάνουν. Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια – εγκυρότητα των προβλέψεων μας, όσον αφορά τα πλημμυρικά φαινόμενα σε επίπεδο λεκάνης απορροής, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα τη δημιουργία πλημμυρών, όπως είναι: α) η χωρική συνεισφορά της βροχόπτωσης, β) η διαμόρφωση της απορροής, γ) η πιθανή πορεία του πλημμυρικού κύματος και δ) η διαδικασία τήξης του χιονιού στους ορεινούς όγκους. Είναι λοιπόν προφανής η σημασία της γνώσης σε πραγματικό χρόνο των υδρο-μετεωρολογικών συνθηκών, που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Δεν θα πρέπει να αγνοούμε επίσης, ότι η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος πρόβλεψης έχει άμεση σχέση με τη βαθιά γνώση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης απορροής και τη δυνατότητα της ακριβούς προσομοίωσης των ιδιαίτερων υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν μέσα σε αυτή. Βάση αυτού, η πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων απαιτεί τη μελέτη της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής

μέσω της αλληλεπίδρασης βροχής, εδαφικής υγρασίας και διάδοσης ροής είτε αυτή είναι επιφανειακή είτε υπόγεια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στην παρούσα Διδακτορική διατριβή προτείνεται η δημιουργία ενός ενιαίου πλαισίου μοντελοποίησης των υδρολογικών διαδικασιών σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, όπως είναι και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η επιφανειακή όσο και η υπόγεια ροή σε ένα σύνθετο υδρολογικά περιβάλλον, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μοντέλων. Ειδικότερα, προκειμένου να προσομοιωθεί με ακρίβεια η υδρολογική συμπεριφορά τέτοιων πολύπλοκων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής το μοντέλο HSPF συνδυάστηκε με ένα κώδικα προγραμματισμού (matlab) ο οποίος δημιουργήθηκε προκειμένου να ενσωματώσει το δύο τμημάτων καρστικό μοντέλου του Maillet και τη χωρική (GIS) κατανομή του ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο. Επίσης, δημιουργήθηκε και ενσωματώθηκε στο ενοποιημένο πακέτο μοντελοποίησης ένα εμπειρικό μοντέλο υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών. Τα τελικά αποτελέσματα της μοντελοποίησης καταδεικνύουν μια πολύ ικανοποιητική προσομοίωση του ολοκληρωμένου πακέτου μοντελοποίησης με τα δεδομένα πεδίου.

Το παραπάνω ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης σε αντίθεση με άλλα ολοκληρωμένα υδρολογικά μοντέλα λαμβάνει υπόψη του όλες τις συνιστώσες που επηρεάζουν τη διαδικασία της τήξης του χιονιού. Ειδικότερα πέραν από όλες εκείνες τις παραμέτρους που επιδρούν στο ενεργειακό ισοζύγιο τήξης του χιονιού λαμβάνει υπόψη και την τοπογραφία των ορεινών όγκων. Αναλυτικότερα, με τη χρήση του GIS ενσωματώνονται οι τοπογραφικοί παράμετροι οι οποίοι παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της τήξης του χιονιού. Η κύρια συνεισφορά του προτεινόμενου πακέτου υδρολογικής μοντελοποίησης σύνθετων γεωμορφολογικά λεκανών απορροής έγκειται στο συνδυασμό του υδρολογικού μοντέλου HSPF με το καρστικό μοντέλο Maillet, την ανάπτυξη ενός μοντέλου υδρολογικών απωλειών κατά μήκος καρστικών καναλιών- υδατορευμάτων και τη δημιουργία χωρικού μοντέλου ρυθμού τήξης χιονιού με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο. Το συγκεκριμένο πακέτο μοντελοποίησης μπορεί να συνεισφέρει

αποτελεσματικά στον τομέα της ορεινής υδρολογίας προκειμένου να μελετηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια πολύπλοκες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε σύνθετα γεωμορφολογικά συστήματα. Ταυτόχρονα το παρόν πλαίσιο μοντελοποίησης μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο στην έγκαιρη πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων και στη γενικότερη ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων.

Σε συνθέτες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, που χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό μέγεθος και καρστικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, εμφανίζονται συχνά καρστικές και μη καρστικές στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές. Στην παρούσα Διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν εννιά (9) καρστικά και μη καρστικά στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα, με βάση τα καταγραφόμενα υδρομετρικά δεδομένα από τους τηλεμετρικού υδρομετρικούς σταθμούς (H1, H2, H3) και μετεωρολογικά δεδομένα από το τηλεμετρικό μετεωρολογικό σταθμό M1, (βρίσκεται στον πάνω ρου του ποταμού Κοιλιάρη και ουσιαστικά γεινιάζει με τις πηγές τροφοδοσίας του). Τα υδρογραφήματα σε όλες τις περιπτώσεις ήταν πολύ απότομα με απότομους ανιόντες κλάδους και σύντομους χρόνους επιβράνδυσης. Σύμφωνα με τα υδρογραφήματα, μόνο ένα μικρό τμήμα της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, ειδικότερα στην καρστική περιοχή (υδρομετρικός σταθμός H2). Αυτές οι υψηλές τιμές απωλειών μεταφοράς κατά μήκος του καρστικού καναλιού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποφυγή μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων στα κατάντη της λεκάνης απορροής (υδρομετρικός σταθμός H1). Εάν απουσίαζε η καρστική περιοχή, το πλημμυρικό κύμα θα αυξάνονταν πολύ κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του στα κατάντη και πολύ πιθανόν να προκαλούσε συχνές καταστροφικές πλημμύρες στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη. Ο καθορισμός των κύριων υδρομετεωρολογικών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη διαχείριση των στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών.

Προκειμένου να αποφύγουμε υψηλές τιμές στιγμιαίων πλημμυρικών αιχμών στα κατάντη του ποταμού Κοιλιάρη, αναπτύχθηκε ένα ενοποιημένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών. Όμως το αναπτυσσόμενο μοντέλο πρόβλεψης θα ήταν χρήσιμο μόνο εάν ο χρόνος συγκέντρωσης ενός επερχόμενου στιγμιαίου πλημμυρικού γεγονότος, στον υδρομετρικό σταθμό H1 (κατάντη περιοχή), είναι επαρκής. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αφορά το χρόνο από

την έναρξη του γεγονότος βροχής (μετεωρολογικός σταθμός M1) μέχρι την εμφάνιση του πλημμυρικού γεγονότος στον υδρομετρικό σταθμό H1. Στην περίπτωση της λεκάνης του Κοιλιάρη σε όλες τις περιπτώσεις των μελετούμενων πλημμυρικών αιχμών, ο χρόνος συγκέντρωσης ήταν μεγαλύτερος από 19 ώρες. Ο παραπάνω χρόνος είναι επαρκής για τη γρήγορη ενημέρωση των αρμόδιων φορέων και τη λήψη άμεσων και βασικών μέτρων προστασίας των πολιτών και των περιουσιών τους.

Η ανάπτυξη του εν λόγω μοντέλου πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών λαμβάνει υπόψη του σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους όπως είναι α) η ποσότητα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης (μετεωρολογικός σταθμός M1), β) η διάρκεια του γεγονότος βροχής, γ) η εποχή που το μελετούμενο γεγονός βροχής λαμβάνει χώρα, και δ) το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ του μελετούμενου γεγονότος βροχόπτωσης και του αμέσως προηγούμενου. Το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών επαληθεύτηκε από 12 καταγραφόμενα στιγμιαία πλημμυρικά γεγονότα (υδρομετρικός σταθμός H1). Η γνώση σε πραγματικό χρόνο όλων των παραπάνω παραμέτρων και ο μετέπειτα συνδυασμός τους, κάνει το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης πλημμυρικών αιχμών ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο και την πρόβλεψη μεγάλων και επικίνδυνων πλημμυρικών γεγονότων σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής, όπως αυτής του ποταμού Κοιλιάρη.

Επίσης στην παρούσα Διδακτορική διατριβή, σύμφωνα και με τη φιλοσοφία της οδηγίας 2007/60/EC, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων (Integrated Flood Risk-impact Analysis System - IFRAS) σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: α) Ένα κατανομημένο υδρολογικό μοντέλο με φυσική σημασία για πλημμυρικά φαινόμενα, το οποίο είναι πλεγματικό και προσομοιώνει τις πλημμυρικές παραμέτρους στο χώρο και στο χρόνο, και β) Ένα μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών.

Όσον αφορά την πρώτη συνιστώσα, το υδρολογικό – υδραυλικό μοντέλο το οποίο προτείνεται και το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν το μοντέλο MIKE SHE –

MIKE 11, το οποίο μας έδωσε τη δυνατότητα της διδιάστατης προσομοίωσης του πλημμυρικού κύματος σε πραγματικές συνθήκες. Το μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικών απωλειών βασίζεται στην έννοια της εκτίμησης του οικονομικού κόστους ανά μονάδα αντικειμένου ή υποδομής. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικές συναρτήσεις που συσχετίζουν τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας (π.χ. βάθος νερού) με το ποσοστό ζημιάς και τη μοναδιαία αξία του αντικειμένου – υποδομή. Οι δυο παραπάνω συνιστώσες του IFRAS έχουν τη δυνατότητα της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Έτσι οι παράμετροι – χαρακτηριστικά των πλημμυρικών φαινομένων που προσομοιώνονται με το υδρολογικό – υδραυλικό μοντέλο MIKE SHE – MIKE 11, στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, εισάγονται στο μοντέλο πλημμυρικών απωλειών για να υπολογιστεί τελικά η ζημιά που προκαλείται από τις πλημμύρες.

Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου – επιπτώσεων, εφαρμόστηκε για ένα συγκεκριμένο θεωρητικό πλημμυρικό γεγονός στην κατάντη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Έτσι προσδιορίστηκαν αρχικά, η χωρική έκταση και το δυναμικό βάθος του πλημμυρικού κύματος, ενώ ακολούθως εκτιμήθηκαν οι οικονομικές (γεωργικές & αστικές) ζημιές που θα μπορούσε να προκαλέσει το συγκεκριμένο πλημμυρικό κύμα στην κατάντη περιοχή της λεκάνης απορροής.

Η παραπάνω μεθοδολογία (προτεινόμενο σύστημα ανάλυσης πλημμυρικού κινδύνου) μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής και αποτελεί ένα απλό, αλλά χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση των επακόλουθων οικονομικών ζημιών ενός επερχόμενου πλημμυρικού κύματος. Βάση αυτής της μεθοδολογίας – πλατφόρμας, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε διαχειριστικά σενάρια, με σκοπό την καλύτερη δυνατή ανάλυση του κινδύνου από ένα επερχόμενο πλημμυρικό γεγονός. Επίσης τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω των διαφόρων σεναρίων θα μας βοηθήσουν στην επιλογή των κατάλληλων παρεμβάσεων (κατασκευαστικών ή μη).

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω προτεινόμενων προσεγγίσεων, κάνουν εφικτή τη βιώσιμη - ολοκληρωμένη διαχείριση, πρόβλεψη και αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων, σε σύνθετες γεωμορφολογικά λεκάνες απορροής. Υλοποιείται έτσι η βασική φιλοσοφία της παρούσας Διδακτορικής διατριβής,

συμβάλλοντας επιπλέον στον επιστημονικό τομέα των ακραίων υδρολογικών φαινομένων και των επιπτώσεων που δημιουργούν αυτά στο περιβάλλον (hydrological extremes and their impacts).

**ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΔΡΙΑ
ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. and Nikolaidis, N.P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology* 381, 308-321.
- Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2010. Flood management and a GIS modeling method to assess flood hazardous areas - A case study. *Hydrological Sciences Journal*, under review.
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. and Nikolaidis, N.P., 2010. Development of a thresholds methodology for real-time flash flood prediction in complex geomorphological river basins. *Journal of Hydrology*, under review.
- Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2010. A dynamical and distributed flood risk - impact analysis modelling system at river basin level - A case study. (under preparation).
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P., Nikolaidis, N.P., 2008. Simulation of the flow in the Koiliaris River Basin (Greece) using a combination of GIS, the HSPF model and a Karstic – Snow melt model. 4th Biennial International Congress of iEMSs, Barcelona, Spain, vol. 1: 512-520.
- Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2009. The generation of karst flash floods and the analysis of their main hydrologic parameters; Case study of the Koiliaris River Basin in Crete, Greece. *Proceedings of the 7th International Conference of the European Water Resources Association, Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009, 403-410, ISBN 978-9963-671-94-6.*
- Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2010. A real time flood forecasting system in the Koiliaris River basin in Crete, Greece. *International Conference of the protection & restoration of the environment X, Corfu (Kerkyra) Greece, 5-9 July, in press.*

Κουργιαλάς, Ν.Ν., Καρατζάς, Γ.Π. και Νικολαΐδης, Ν., 2007. Εκτίμηση Ρυθμού Τήξεως Χιονιού στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη (Ν. Χανίων) και της Εκφόρτισης του Παραγόμενου Ύδατος, με χρήση GIS και Καρστικού Μοντέλου. 6ο Συνέδριο Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), σελ. 45-54. Χανιά 14-16 Ιουνίου.

Κουργιαλάς, Ν.Ν., και Καρατζάς, Γ.Π., 2009. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Χωρική Εκτίμηση της Τρωτότητας Πλημμυρικών Φαινομένων με Χρήση GIS. 7ο Συνέδριο Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) και 11ο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), σελ. 213-220. Βόλος 27-30 Μαΐου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνή Βιβλιογραφία

Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16 (3): 268-281.

Al-Abed, N.A., Whiteley, H.R., 2002. Calibration of the Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF) model using automatic calibration and geographical information systems. *Hydrological Processes*, 16, 3169-3188.

Albek, M., Ögütveren, U., Albek, E., 2004. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *J Hydrol* 285:260–271.

Anderson, E.A., 1968. Development and testing of snowpack energy balance equations. *Water Resources Resources*, 4:19–37.

Anderson, E.A., 1973. National Weather Service River Forecast System-snow accumulation and ablation model. NOAA Technical Memorandum NWS-HYDRO-17, United States Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Washington, DC, USA.

Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992. *Applied Groundwater Modeling*. Academic Press, New York.

Archer, D., 1992. Walls of water. *Circ. British Hydrol. Soc.*, 44, 1-3

Arnold, J.G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, J. R. Williams., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34 1: 73-89

Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 148-160.

Baker, D.G., Ruschy, D.L., and Wall, D.B., 1990. The albedo decay of prairie snows. *American Meteorological Society*, 29: 179–187.

- Barbetta, S., Melone, F., Moramarco, T., 2006. Common methodologies for storm prediction and flood forecasting. Tech. Report FLOODMED Project, (Action 3.1) Interreg IIB cadses. Research Institute for Geo-Hydrological Protection (IRPI-CNR), Italy.
- Best Practices on Flood Prevention, Protection and Mitigation, 2003. Water directors of the European Union meeting.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L.Jr., Donigian, A.S.Jr., Johanson, R.C., 1993. Hydrological Simulation Program—FORTRAN. User's Manual for Release 10. EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.S., Kittle, J.L., Jobes, T.H., and Donigian, A.S., 2001. Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's Manual –Version 12. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, U.S.A.
- Bonacci, O., Ljubenkovic, I. and Roje-Bonacci, T., 2006. Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. J1 - NHESS, 6(2): 195-203.
- Bouwen, B. and Taillieu, T., 2004. Multi-party collaboration as social learning for interdependence: developing relational knowing for sustainable natural resource management. Journal of Community and Applied Social Psychology, 14(3): 137-153.
- Boyle, D. P., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., Smith, M., 2001. Towards improved streamflow forecasts: the value of semi-distributed modeling. Water Resour. Res., 37(11): 2749–2759.
- Bras, L.R., 1989. Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science. Massachusetts Institute of Technology.
- Burrough, P.A., 1986. Principles of Geographical Information System for Land Resources Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey No.12. Oxford University Press.

- Camarasa Belmonte, A.M., Segura Beltran, F., 2001. Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *CATENA*, 45(3): 229-249.
- Camarasa, M.A., and Tilford, A. K., 2002. Rainfall – runoff modelling of ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Hydrological processes*, 16, 3329-3344.
- Carmi, G. and Berliner P., 2008. The effect of soil crust on the generation of runoff on small plots in an arid environment. *Catena*, 74 (2008): 37-42.
- Carpenter, T.M., Sperflage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T. and 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.
- Carsell, K.M., Nathan, D.P., Ford, T.D., 2004. Quantifying the Benefit of a Flood Warning System. *Natural Hazards Review*, 5(3): 131-140.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw International Editions.
- CNS, Scientific and Engineering Services, 1991. Benefit-cost analysis of Hydrometric Data – river flow gauging, for the Department of the Environment, Marlow: Foundation for Water Research.
- Cohen, H. and Laronne, J. B., 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel. *Hydrol. Processes*, 19, 1687 – 1702.
- Coulibaly, P., and Baldwin, C.K., 2005. Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *J. Hydrology*, 307: 164-174.
- Day, H. J., 1970. Flood warning benefit evaluation-Susquehanna River Basin (urban residences). ESSA Technical Memorandum WBTM Hydro-10, National Weather Service, Silver Spring, Md.

De Vera, M.P., 1984. Rainfall-runoff relationship of some catchments with karstic geomorphology under arid and semi- arid conditions. *J. Hydrol.* 68, 85-93.

Dingman, S. L., 1994. *Physical hydrology*, Prentice-Hall, New Jersey.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of European Communities*, 22.12.2000 L 327/1. Brussels.

Directive 2007/60/EC on the assessment and management of floods risks. 6.11.2007: L 288: 27 – 34.

Dutta D., Herath S., and Musiake K., 2006. An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a control system in a river basin. *Hydrological Processes* 20, 1365-1384.

E.E.A. (European Environmental Agency), 2007. *Climate change and water adaptation issues*. EEA. Office for Official Publications of the European Communities. Technical report No.2.

Eadie, W.T., Drijard, D., James, F.E., Roos, M., and Sadoulet, B., 1971. *Statistical Methods in Experimental Physics*. Amsterdam: North-Holland. pp. 269–271.

Eagleson, P.S., 1970. *Dynamic Hydrology*, New York: McGraw-Hill.

EM-DAT, The OFDA/CRED international disaster database, <http://www.cred.be/emdat>.

EPA Basins Technical Note 6, 2000. *Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF*, July 2000.

ESPON, The European Observation Network. <http://www.espon.eu/>.

- ESRI, 2006. ArcView 9.2 User Manuals, Environmental System Research Institute, 380 New York Street, Redlands, CA, 92373 USA.
- European Environment Agency, 2007. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe, Environmental issue report No 35, Denmark.
- Fohrer, N., Berkenhagen, J., Hecker, M.L., Rudolph, A., 1999. Changing soil and surface conditions during rainfall Single rainstorm/subsequent rainstorms. CATENA, 37(3-4): 355-375.
- Ford D.T., 2001. Flood-warning decision-support system for Sacramento, California. Journal of Water Resources Planning and Management, 127(4), 254-260.
- Francés, F., Cayuela A. and Marco J., 2001. Regional Flood Risk Mapping and its use in Land use Planning: the Region of Valencia case study. In Integrated Water Resources Management. IAHS Red Books Publ. no. 272, pp 311-318.
- Franchini, M., and Lamberti, P., 1994. A flood routing Muskingum type simulation and forecasting model based on level data alone. Water Resour. Res., 30(7): 2183–2196.
- Ganju, A., Satyawali, P.K., Singh, A., Sethi, D.N., 1999. Snowcover simulation model - a review. Defence Science Journal, 49(5): 419–436.
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tzihrintzis, V.A., Pisinaras, V., 2006. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. Environmental Geology, 49(5): 653-673.
- Georgakakos, K.P., 1986. On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts. Bulletin American Meteorological Society. Vol. 67, No.10.
- Georgakakos, K.P., Unnikrishna, P.V., Bravo, H.R., Cramer, J.A., 1991. A national system for determining threshold runoff values for flash-flood

- prediction. Issue Paper, Department of Civil and Environmental Engineering and Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa.
- Goodchild, M. F., 1985. Geographic Information Systems in Undergraduate Geography: A Contemporary Dilemma, *The Operational Geographer* 8: 34-38.
- Green C.H., Parker D.J., Thompson P.M., Penning-Rowsell E.C., 1983. Indirect losses from urban flooding: an analytical framework. Flood Hazard Research Center, Middlesex Polytechnic, UK.
- Green, C.H., Parker, D.J., Tunstall, S.M., 2000. Assessment of Flood Control and Management Options, Thematic Review IV.4 prepared as an input to the World Commission on Dams, Cape Town, www.dams.org.
- Green, J.I. and Nelson, E.J., 2002. Calculation of time of concentration for hydrologic design and analysis using geographic information system vector objects. *Journal of Hydroinformatics*; 4(2): 75-81.
- Grigg, N.S. and Helweg, O.J., 1975. State of the art of estimating flood damage in urban areas. *Water Resources Bulletin*, 11 (2), 379-390.
- Hantush, M.M., 2005. Modeling Stream-Aquifer Interactions with linear Response Functions. *Journal of Hydrology*, 311, 59-79.
- Hooke, J.M. and Mant, J.M., 2000. Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in SE Spain. *Geomorphology*, 34(3-4): 163-180.
- Hoyois, P. and Guha-Sapir, D., 2003. Three decades of floods in Europe: a preliminary analysis of EMDAT data, WHO collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Catholique University of Louvain.
- <http://earthobservatory.nasa.gov/>.
- <http://natural-hazards.jrc.it>.
- <http://www.dhissoftware.com/mikeshe>.
- <http://www.emdat.be/>.

<http://www.koiliaris.tuc.gr/>.

Jaquet, O., Siegel, P., Klubertanz, G., Benabderrhamane, H., 2004. Stochastic discrete model of karstic networks. *Advances in Water Resources*, 27, 751-760.

Jarrett, R.D., 1984. Hydraulics of high gradient streams. *J. Hydraulic Engng* 110 11, pp. 1519–1539.

Johnston C., 2005. *Geographic Information Systems in Ecology*. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στην Οικολογία. Μετάφραση – Επιμέλεια: Βογιατζάκης Ι.Ν. και Μαλούνης Α. Εκδόσεις «Ίων» Στέλλα Παρίκου & ΣΙΑ Ο.Ε.

Keppel, R.V. and Renard, K.G., 1962. Transmission losses in ephemeral streams. *J. Hydraul. Div., Proc. ASCE* 8 (HY3), 59-68.

Kim, S.M., Benham, B.L., Brannan, K.M., Zeckoski, R.W., and Doherty, J., 2007. Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water Resources Research*, Vol 43, W01402.

Kirchner, W.J., 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analysis, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42, W03S04, doi: 10.1029/2005WR004362.

Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P., Nikolaidis, N.P., 2008. Simulation of the flow in the Koiliaris River Basin (Greece) using a combination of GIS, the HSPF model and a Karstic – Snow melt model. 4th Biennial International Congress of iEMSs, Barcelona, Spain, vol. 1: 512-520.

Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2009. The generation of karst flash floods and the analysis of their main hydrologic parameters; Case study of the Koiliaris River Basin in Crete, Greece. *Proceedings of the 7th International Conference of the European Water Resources Association*, Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009, 403-410, ISBN 978-9963-671-94-6.

- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. and Nikolaidis, N.P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology*, 381: 308-321.
- Krzysztofowicz, R., 2001. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, 249(1-4): 2-9.
- Kwak, Y., Kondoh, A., 2008. A Study on the Extraction of Multi-Factor Influencing Floods from RS Image and GIS Data; A Case Study in Nackdong Basin, S.Korea. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing, pp. 421-426.
- Lamberti, P., and Pilati, S., 1996. Flood propagation models for real time forecasting. *Journal of Hydrology*, 175: 239-266.
- Lane LJ, Shirley ED, Singh VP., 1988. Modelling erosion on hillslopes. In *Modelling Geomorphological Systems*, Anderson MG (ed.). Wiley: Chichester; 287-308.
- Lane LJ, Nichols HM, Paige GB., 1995. Modelling erosion on hillslopes: concepts, theory and data. In *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'9)*, November 27-30, 1995. University of Newcastle, Newcastle, NSW, Australia, Binning P, Bridgman H, Williams B (eds). Uniprint: Perth, Australia; 1-7.
- Laramie, R.L., Schaake, J.C., 1972. *Simulation of the Continuous Snowmelt Process*. Cambridge, Mass.: MIT Department of Civil Engineering (Technical report no.143).
- Li, Shusun., Zhou, X., Morris, K., 1999. Measurement of Snow and Sea Ice Surface Temperature and Emissivity in the Ross Sea. *IEEE Journal*, 0-7803-5207-6/99.
- Lin, X., 1999. Flash floods in arid and semi-arid zones. *IHP-V Technical Documents in Hydrology*, no. 23.

- Maillet, E., 1905. Essais d'hydraulique sonterraine et fluviaie. Herman, Paris.
- Manda A.K. and Gross M.R., (2006.) Identifying and characterizing solution conduits in karst aquifers through geospatial (GIS) analysis of porosity from borehole imagery: An example from the Biscayne aquifer, South Florida (USA). *Advances in Water Resources*, 29, 383-396.
- Manfreda, S., Sole, A., Fiorentino, M., 2008. Can the basin morphology alone provide an insight into floodplain delineation? *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 118, 47-56, www.witpress.com.
- Marechal, J.C., Ladouche, B. and Dorfliger, N., 2008. Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nimes. *Engineering Geology* 99(3-4): 138-146.
- Mazurkiewicz, A. B., Callery, D. G., McDonnell, J. J., 2008. Assessing the controls of the snow energy balance and water available for runoff in a rain-an-snow environment. *Journal of Hydrology*, Vol. 354: 1-14.
- McEwen, L.J., 1994. Channel planform adjustment and stream power variations on the middle River Coe, Western Grampian Highlands, Scotland. *Catena* 21, 357-374.
- Michaud, J. D. and Sorooshian, S., 1994. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsize semiarid watershed. *Water Resour. Res.*, 30(3): 593-605.
- MIKE 11 User Manual, User Guide (DHI Software 2007).
- MIKE SHE User Manual, Volume 1&2 User Guide (DHI Software 2007).
- Mishra, S.K., Tyagi, J.V., Singh, V.P., Singh, R., 2006. SCS-CN based modeling of sediment yield. *J. Hydrol.* 324: 301-322.
- Moramarco, T., Barbetta, S., Melone, F., & Singh, V.P., 2006. A real-time stage Muskingum forecasting model for a site without rating curve. *Hydrol. Sci. J.*, 51(1): 66-82.

- Morgan, R.P.C., 2005. Soil erosion and conservation. Blackwell Publishing Ltd, Oxford UK.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual model. 1: Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- Natural Hazards Research and Applications Information Center, 1992. Floodplain management in the United States: an assessment report. University of Colorado at Boulder.
- Nikolaidis, P.N., Nikolaidis, V.S., Schnoor, J.L, 1991. Assessment of Episodic Freshwater Acidification in the Sierra Nevada, California. *Aquatic Sciences*, 53(4): 330-345.
- Norbiato, D., Borga, M., Esposti, S.D., Gaume, Eric., Anquetin, S., 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362: 274-290.
- O'Connell, P. E. and Clarke, R. T., 1981. Adaptive hydrological forecasting – a review. *Hydrol. Sci. Bull.*, 26(2): 179–205.
- Ohara, N., Kawas, M.L., 2005. Field observations and numerical model experiments for the snowmelt process at a field site. *Advances in Water Resources*, 29:154-160.
- Osborn, H.B. and Lane, L.J., 1969. Precipitation–runoff relation for very small semiarid rangeland watersheds. *Water Resour. Res.* (52), 419–425.
- Pahl-Wahl, Claudia., 2006. The importance of social learning in restoring the multifunctionality of rivers and floodplains. *Ecology and Society*11(1):10. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art10/>.
- Parker D.J., 1992. The assessment of the economic and social impacts of natural hazards. In International Conference on Preparedness and Mitigation for Natural Disasters '92, Reykjavik, Iceland, 28–29 May.

- Parker, D., Tapsell, S., McCarthy, S., 2007. Enhancing the human benefits of flood warnings. *Natural Hazard*, 43(3): 397-414.
- Penning-Rowsell, EC., Floyd, P., Ramsbottom, D., Surendran, S., 2005b. Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. *Nat Hazards* 36: 43–64.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G. and Assani, A.A., 2005. Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 69(1-4): 92-101.
- Plate, E., 2002. Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology* 267(1-2), 2-11.
- Plate, E., 2003. Regional Consultation Europe. Report for EWC II. 4 August 2003.
- Portland State Aerospace Society, 2004. A Quick Derivation relating altitude to air pressure. Version 1.03.
- Rimmer, A. and Salinger, Y., 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology*, 331(3-4): 524-542.
- Schäuble, H., Marinoni, O., Hinderer, M., 2008. A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences*, 34(6): 635-646.
- Segura, F.S., 1990. Las ramblas valencianas, PhD Thesis. Universitat de Valencia, 229 pp.
- Sensoy, A., Sorman, A.A., Tekeli, A.E., Sorman, A.U., Garen, D.C., 2006. Point-scale energy and mass balance snowpack simulations in the upper Karasu basin, Turkey. *Hydrological Processes*, 20: 899–922.
- Shaban, A., Khawlie, M., Bou, Kheir. R., Abdallah, C., 2001. Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon-eastern Mediterranean. *Bull Eng Geol Env*, 60:93-101.

- Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, Ch., 2006. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeology Journal*, 14:433 -443.
- Sheeder, S.A, Carlson, T.N. and Ross, J.D., 2002. Dual Urban and Rural Hydrograph Signals in Three Small Watersheds. *Journal of the American Water Resources (JAWRA)* 38:1027-1040.
- Slack, R. B. and Welch, R., 1980. Soil Conservation Service runoff curve number estimates from Landsat data. *Water Resources Bulletin*, 16 (5): 887-893.
- Smith D.I., 1994. Flood damage estimation - a review of urban stage–damage curves and loss functions. *Water SA* 20: 231–238.
- Smith, K. and Ward, R., 1998. *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley and Sons.
- Smith, R.M., 1986. Comparing traditional methods for selecting class Intervals on choropleth maps. *The Professional Geographer* 38(1): 62-67.
- Soil Conservation Service (now NRCS), 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55, U. S. Department of Agriculture; Washington, D. C.
- Sophocleous, M., 2002. Interaction between Groundwater and Surface Water: The State of the Science. *Hydrogeology Journal* 10, 52-67.
- Stamati, F., Nikolaidis, N., Bozinakis, K., Papamastorakis, D., Kritsotakis, M., 2006. Stochastic Modeling of the Karstic System of western Apokoronas in Crete. In VIII International Conference Protection and restoration of the environment VIII, Chania Greece, 184-192.
- Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117–1142.

- Su, Z., 2000. Remote sensing of landuse and vegetation for mesoscale hydrological studies. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 213-233.
- Svensmark, H., & Nigel C., 2008. *The Chilling Stars: A New Theory of Climate Change*. *Energy & Environment*, Vol. 19 (No.5).
- Tarboton, D.G., 1996. Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology*, 187(1-2): 105-117.
- Tzoraki, O., and Nikolaidis, N.P., 2007. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. *Journal of Hydrology*, vol 346, pp.112-121.
- U. S. Army Corps of Engineers, Snow Hydrology, 1956. Washington DC, Department of Commerce, Office of Technical Services, PB 151660.
- U.S. Soil Conservation Service, 1964. *Hydrology*. Section 4, SCS National.
- UNEP Publication, 2004. *APELL and Floods, A community-based approach for disaster reduction*, APELL Brochure.
- United Nations and Economic Commission for Europe (UN/ECE), 2000. *Guidelines on Sustainable flood prevention*.
- Uys, M.C., and Keeffe, J.H.O., 1997. Simple Words and Fuzzy Zones: Early Directions for Temporary River Research in South Africa. *Environmental Management*, 21, 4, 517-531.
- Viessman, W., Lewis, G.L., Knapp, J.W., 1989. *Introduction to hydrology*. Harper and Row, New York, p. 780.
- Viswanathan, C., Teegavarapu, R.S., Ormsbee, L., 2005. *Surface Water Assessment and Hydrologic Modeling under Karst Aquifer Conditions*. American Geophysical Union Conference, Nov-Dec, 2005, AGU Conference, San Francisco, USA.

Water Directors, 2003. Core group on flood protection of the water directors (Europe): Best practices on flood prevention, protection and mitigation, European initiative on flood prevention.

(http://www.floods.org/PDF/Intl_BestPractices_EU_2004.pdf).

White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 65(2-3): 85-105.

WHO (World Health Organization), 2002. Floods: Climate change and adaptation strategies for human health. Report on a WHO meeting. London. WHO, Regional Office for Europe. United Kingdom. 30 June – 2 July 2002. EUR/02/5036813.

Wilson C.J., Carey J.W, Beeson P. C., Gard M. O., Lane L. J., 2001. A GIS-based hillslope erosion and sediment delivery model and its application in the Cerro Grande burn area. *Hydrological Processes*, 15(15): 2995-3010.

Wilson, J., 2003. Thunderstorm nowcasting: past, present and future. 31st Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., J13-J19.

Winkler, R. D., 2001. The Effects of Forest Structure on Snow Accumulation and Melt in South-Central British Columbia, Degree of Doctor of Philosophy the University of British Columbia.

Winter, T.C., 1999. Relation of Streams, Lakes and Wetlands to Groundwater Flow Systems. *Hydrogeology Journal*, 7: 28-45.

Wright, J.M. and Monday, J.L., 1996. Addressing your community's flood problems: A guide for elected officials. Madison, WI 53711: ASFPM Executive Office.

(http://www.floods.org/PDF/Addressing_Communitys_Flood_Problems.pdf).

www.EnviFriendly.tuc.gr.

www.geo.auth.gr.

- Yalcin, G. and Akyurek, Z., 2004. Analysing flood vulnerable areas with multicriteria evaluation. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Paper. XXth ISPRS Congress, 12-23, Istanbul, Turkey.
- Yang, Z.-L. and Dickinson, R.E., 1997. Validation of the Snow Submodel of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme with Russian Snow Cover and Meteorological Observational Data, *Journal of Climate*, 10: 353-373.
- Yevjevich, V., 1994. Classification and description of flood mitigation. In Rossi et al. (eds.) *Coping with floods*, Kluwer Academic Publishers, 573-584.
- Zaradny, H., 1993. *Groundwater flow in Saturated and Unsaturated soil*. Balkema, Rotterdam.
- Zoppou Christopher., 1999. Review of Strom Water Models. Integrated Water Management Group Christian Laboratory, CSIRO Land and Water, Canberra Australia, Technical Report 52/99.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βοζινάκης, Κ., και Κουγιάννη, Σ., 2004. Υδατικοί πόροι Νομού Χανίων και διαχείρισή τους.
- Γ.Υ.Σ. - <http://www.gys.gr>.
- Ε.Ο.Π. (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος), 2005. Μεταβολή του κλίματος και υπερχειλίση ποταμών στην Ευρώπη. EEA Briefing No.01.
- Καλογεράκη, Β., 2009. Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στην λεκάνη απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρτέρης, Α.Μ., 1995. Δασική Αεροφωτογραφία. Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο, Α.Π.Θ, σελ 263-267.

- Καρτέρης, Α.Μ., 2002-2003. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών Περιβάλλοντος. Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο, Α.Π.Θ, σελ 13-14.
- Κουργιαλάς, Ν.Ν., Καρατζάς, Γ.Π. και Νικολαΐδης, Ν., 2007. Εκτίμηση Ρυθμού Τήξεως Χιονιού στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη (Ν. Χανίων) και της Εκφόρτισης του Παραγόμενου Ύδατος, με χρήση GIS και Καρστικού Μοντέλου. 6ο Συνέδριο Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), σελ. 45-54. Χανιά 14-16 Ιουνίου.
- Κουργιαλάς, Ν.Ν., και Καρατζάς, Γ.Π., 2009. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Χωρική Εκτίμηση της Τρωτότητας Πλημμυρικών Φαινομένων με Χρήση GIS. 7ο Συνέδριο Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) και 11ο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), σελ. 213-220. Βόλος 27-30 Μαΐου.
- Κωτούλας, Δ., 2001. Ορεινή Υδρονομική. Τα ρέοντα Ύδατα. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αριστοτελείου Πανεπιστημίου. Θεσ/νίκη.
- Λυκοκανέλλος, Γ., 2003. Ανάλυση πλημμυρών και μέθοδοι αντιπλημμυρικής προστασίας, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Μιμίκου, Μ., 1994. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, έκδοση 2, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ., 2005. Υδατικοί Πόροι και Διαχείριση τους στην Ελλάδα σε τρέχουσες και κλιματικά αλλαγμένες συνθήκες, 5η Διεθνής Έκθεση και Συνέδριο για την τεχνολογία Περιβάλλοντος, Heleco 2005, Αθήνα.
- Παλιατζίκη, Α., 2006. Ανάλυση περιβαλλοντικών πιέσεων και επιπτώσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Παπαπέτρου-Ζαράνη, Α., 1995. Γεωμορφολογία, Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα.

- Σακκάς, Ι., 1992. Εκτίμηση πλημμυρικών απορροών και διόδευση πλημμυρών, Πρακτικά Συμποσίου, Λειψυδρία και πλημμύρες, Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Θεσσαλονίκη.
- Σακκάς Ι., 2004. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος Ι, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Αΐβαζή, Θεσσαλονίκη.
- Στάθης, Δ., 2004. Ακραία γεγονότα βροχής και πλημυρογένεση στην Ελλάδα. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων.
- Στεφανίδης, Π., 1995. Διερεύνηση αιτιών και μηχανισμών λειτουργίας πλημμυρικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο. Πρακτικά διεθνούς συμποσίου με θέμα « Προστασία και Περιβαλλοντική Διαχείριση των Ρευμάτων» ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, σελ. 139-140.
- Τζωράκη Ο., 2007. Μοντελοποίηση υδρολογικών και γεωχημικών διεργασιών σε ποτάμιο σύστημα διαλείπουσας ροής. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Τσακίρης Γ., 1995. Υδατικοί Πόροι, Τεχνική Υδρολογία Ι. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Τσιτσιλώνης, Σ., 2008. Μεταπλημμυρική έρευνα και μελέτη αστραπιαίων πλημμυρών: προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος 17-10-2006 στην Αλμυρίδα. Μεταπτυχιακή διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Τσουκλαράκη, Α., 2000-2001. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών- Διδακτικές Σημειώσεις. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Φλόκας Α., 1994. Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Χατζηθεοχάρους, Κ., 2005. Υδρογεωχημική μελέτη του ποταμού Κοιλιάρη. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Α

ΚΩΔΙΚΑΣ

ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΗΓΩΝ

&

**ΡΥΘΜΟΥ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ
ΙΣΟΖΥΓΙΟ**


```

global karst_spring_flow tt f kf2 tt2 rainfall_snow rainfall_wet
snow_melt

fileName=uigetfile('*.txt');

% tt= dates , t= temperature, p= rainfall, Rn= Net Radiation Exchange,
RH= moisture, ub=wind velocity, TLR= Temperature lapse rate,
[tt,t,p,Rn,RH,ub,TLR]=textread(fileName,'%s %f %f %f %f %f %f');

L=length(tt);

% Initial Snow depth, D0
D0=numeric(get(handles.edit139,'String'));
% Initial water equivalent of the snow pack, WE0
WE0=numeric(get(handles.edit140,'String'));
% Karst Mean Elevation, KME
KME=numeric(get(handles.edit138,'String'));
% Time step, Dt
dt=numeric(get(handles.edit129,'String'));
% Surface Area of the Karst, aAkarst
eAkarst=numeric(get(handles.edit128,'String'));
% Initial Karstic Flow, Qko
Qko=numeric(get(handles.edit130,'String'));
% Fraction of Inflow to Upper Reservoir, a1
a1=numeric(get(handles.edit131,'String'));
% Upper Reservoir Recession Constant, ku
ku=numeric(get(handles.edit132,'String'));
% Lower Reservoir Recession Constant, kl
kl=numeric(get(handles.edit133,'String'));
% Fraction of Upper Reservoir Flow to Lower, a2
a2=numeric(get(handles.edit134,'String'));
% Rainfall lapse rate
RLR=numeric(get(handles.edit136,'String'));
% Simdays=numeric(get(handles.p22,'String'));

% Snow melt energy budget
snm=0;

```

```

for i=1:L
    % arxiki timi
    % Temperature T (Karst) - Tk
    Tk(i)=-TLR(i)*KME+t(i);
    % Rainfall P - rp
    rp(i)=RLR*p(i);
    % calculation Pn
    if Tk(i)>0
        Pn(i)=0.05+(Tk(i)/100)^2;
    else
        Pn(i)=0.05
    end
    % calculation Dnew
    Dnew(i)=rp(i)/Pn(i);
    % The water equivalent of the snow pack, WE
    % The change in depth, Dd
    % new depth of snow pack, D
    if i==1
        WE(i)=WE0+rp(i);
        if WE(1)>0
            Dd(i)=(rp(i)*D0/WE(i))*(D0/10)^0.35;
        else
            Dd(i)=0;
        end

        D(i)=D0-Dd(i)+Dnew(i);
    else
        WE(i)=WE(i-1)+rp(i);
        if WE(i)>0
            Dd(i)=(rp(i)*D(i-1)/WE(i))*(D(i-1)/10)^0.35;
        else
            Dd(i)=0;
        end
        D(i)=D(i-1)-Dd(i)+Dnew(i);
    end
    % calculation of the new snow pack density, Pdensity(i)
    if D(i)>0

```

```

Pdensity(i)=WE(i)/D(i);
else
Pdensity(i)=0;
end
% calculation advected heat in precipitation, Qv
if Tk(i)>2.2
    Qv(i)=1*rp(i)*1*Tk(i);
else
    Qv(i)=0.5*rp(i)*1*Tk(i);
end

% calculation latent heat of evaporation, Le
Le(i)=597.3-0.57*Tk(i);

% calculation saturation vapor pressure at snow surface, es
es(i)=(0.61078*exp((17.27*Tk(i))/(Tk(i)+237.3)))*10;

% calculation vapor pressure at karst elevation, ea
ea(i)=RH(i)*es(i);

% calculation evaporation, E
E(i)=0.00651*(KME*(KME+3))(-1/6)*(es(i)-ea(i))*ub(i);
if D(i)>0
    E(i)=0.00651*(KME*(KME+3))(-1/6)*(es(i)-ea(i))*ub(i);
else
    E(i)=0
end

% calculation heat storage in evaporation, Qe
Qe(i)=1*Le(i)*E(i);

% calculation atmospheric pressure at the karst elevation, P
P=(100*((44331.514-KME)/11880.516)(1/0.1902632))/100;

% calculation sensible-heat transfer, Qh
Qh(i)=((0.61*10-3)*P*(Tk(i)-(-1.4185+0.9844*Tk(i)))*Qe(i))/(ea(i)-
es(i));

```

```

% calculation heat flux from soil, Qg
Qg=0.0000127;

% calculation Thermal quality, Therq
if Tk(i)>5
    Therq=0.95;
elseif Tk(i)>2.2
    Therq=0.97;
elseif Tk(i)>1
    Therq=0.98;
elseif Tk(i)>0
    Therq=0.99;
else
    Therq=1;
end

% calculation water content, W
W=100*(1-Therq);

% calculation energy released by the freezing of liquid water in
% snowpack, Qf

Qf(i)=(Pdensity(i)*(D(i)/254)*80*W)/(i);

if rp(i)>0&Tk(i)<=2.2
    snm=i;
end
time(i)=i-snm;

if 1<=i<=59|274<=i<=424|637<=i<=786
    A(i)=0.85*(0.94)^time(i)^0.58;
elseif 60<=i<=151|425<=i<=515
    A(i)=0.85*(0.94)^time(i)^0.46;
elseif 152<=i<=273|516<=i<=636
    A(i)=0;

```

```

else
    A(i)=0.85*(0.94)^time(i)^0.46;
end
Rreal(i)=Rn(i)*(1-A(i));

% calculation cold condent, Qcc
Qcc(i)=(-1)*Pdensity(i)*0.5*(-2)*D(i)/254;
if Qcc(i)>0
    % calculation Change in heat storage in snowpack, Qo
    Qo(i)=Rreal(i)+Qv(i)-Qe(i)-Qh(i)-Qg+Qf(i);
else
    Qo(i)=0;
end

% calculation total melt water, snow_melt_start
snow_melt_start(i)=(Qo(i)/80*Therq)/100;
if Qo(i)-Qcc(i)>0
    snow_melt_start(i)=(Qo(i)/80*Therq)/100;
else
    snow_melt_start(i)=0;
end

% calculation total melt water, snow_melt
snow_melt(i)=snow_melt_start(i);
if snow_melt_start(i)>0
    snow_melt(i)=snow_melt_start(i);
else
    snow_melt(i)=0;
end

% calculation Rainfall wet, rainfall_wet
if Tk(i)>2.2
    rainfall_wet(i)=rp(i)/100;
else
    rainfall_wet(i)=0;
end
if KME<900

```

```

        snow_melt(i)=0;
    end
    % Karst Input Qin (m3/day)
    karst_input(i)=(rainfall_wet(i)+snow_melt(i))*eAkarst;
    % Upper Reservoir Flow, Qu (m3/day)
    if i==1
        upper_reservoir_flow(i)=(Qko*(a1)*(1-a2))*exp(-
ku*dt)+a1*karst_input(i)*(1-exp(-ku*dt));
    else
        upper_reservoir_flow(i)=(upper_reservoir_flow(i-1))*exp(-
ku*dt)+a1*karst_input(i)*(1-exp(-ku*dt));
    end

    % Lower Reservoir Flow, Ql (m3/day)
    if i==1
        lower_reservoir_flow(i)=((Qko*(1-a1)+Qko*a1*a2)*exp(-
kl*dt)+(karst_input(i)*(1-a1)+a2*upper_reservoir_flow(i))*(1-exp(-
kl*dt)));
    else
        lower_reservoir_flow(i)=lower_reservoir_flow(i-1)*exp(-
kl*dt)+(karst_input(i)*(1-a1)+a2*upper_reservoir_flow(i))*(1-exp(-
kl*dt));
    end

    % Karst Spring Flow (m3/day)
    karst_spring_flow(i)=lower_reservoir_flow(i)+(1-
a2)*upper_reservoir_flow(i);
    karst_spring_flow_sec(i)=karst_spring_flow(i)/86400;
end
dlmwrite('aaa.xls',[karst_spring_flow_sec'],'\t')
dlmwrite('aa.xls',[snow_melt'],'\t')

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας 1. Τιμές του συντελεστή CN σε σχέση με τις διάφορες μορφές αστικής και αγροτικής γης, USDA (1986).

Runoff Curve Numbers for Urban Areas					
Cover Description		Curve Numbers for Hydrologic Soil Groups			
<i>Cover Type and Hydrologic Condition</i>	<i>Average % Impervious Area</i>	A	B	C	D
<i>Fully Developed Urban Areas (Vegetation Established)</i>					
Open Space (lawns, parks, golf courses, etc)					
Poor Condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair Condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good Condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious Areas					
Paved Parking Lots, Roofs, Driveways, etc.		98	98	98	98
Streets and Roads					
Paved: Curbed and Storm Sewers		98	98	98	98
Paved: Open Ditches		83	89	92	93
Gravel		76	85	89	91
Dirt		72	82	87	89
Western Desert Urban Areas					
Natural Desert Landscaping (pervious area only)		63	77	85	88
Artificial Desert Landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Runoff Curve Numbers for Other Agricultural Lands					
Cover Description		Curve Numbers for Hydrologic Soil Groups			
<i>Cover Type</i>	<i>Hydrologic Condition</i>	A	B	C	D
Pasture, Grassland, or Range - Continuous Forage for Grazing	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow - Continuous Grass, Protected from Grazing and Generally Mowed for Hay	--	30	58	71	78
Brush - Brush, Weed, Grass Mixture with Brush the Major Element	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods - Grass Combination (Orchard or Tree Farm)	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads - Buildings, Lanes, Driveways, and Surrounding Lots	--	59	74	82	86

Πίνακας 2. Τιμές του συντελεστή CN σε σχέση με τις διάφορες μορφές εντατικά καλλιεργήσιμης αγροτικής γης, USDA (1986).

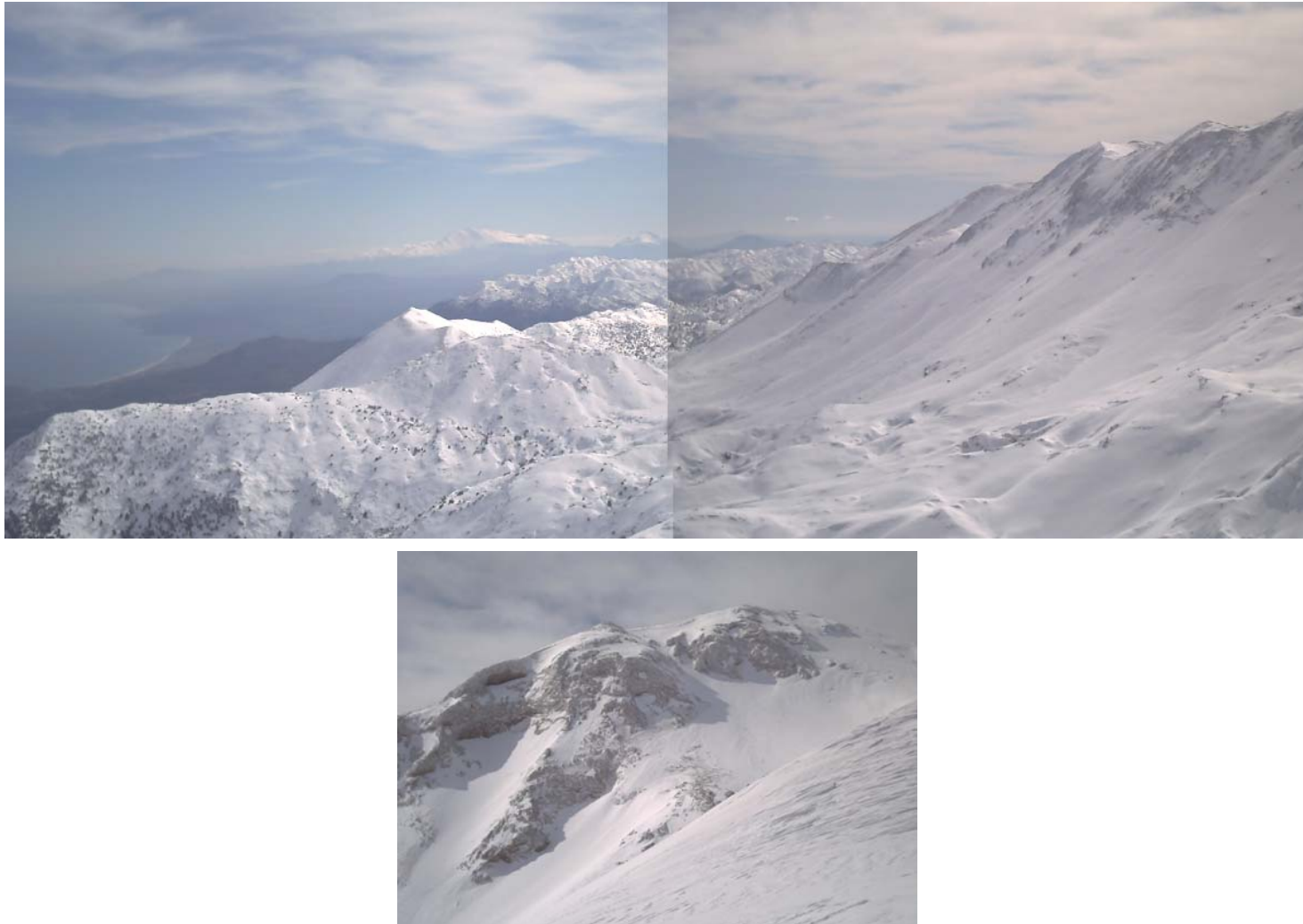
Runoff Curve Numbers for Cultivated Agricultural Lands						
Cover Description			Soil Groups			
Cover Type	Treatment	Hydrologic Condition	A	B	C	D
Fallow	Bare Soil	--	77	86	91	94
	Crop Residue Cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row Crops	Straight Row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & Terraced (C & T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	C & T + CR	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small Grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C & T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	C & T + CR	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
Close Seeded or Broadcast Legumes Or Rotation Meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C & T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80
Runoff Curve Numbers for Cultivated Agricultural Lands						
Cover Description			Soil Groups			
Cover Type		Hydrologic Condition	A	B	C	D
Herbaceous - Mixture of Grass, Weeds, and Low-Growing Brush, With Brush the Minor Element		Poor	--	80	87	93
		Fair	--	71	81	89
		Good	--	62	74	85
Oak-Aspen - Mountain Brush Mixture of Oak Brush, Aspen, Mountain Mahogany, Bitter Brush, Maple, and Other Brush		Poor	--	66	74	79
		Fair	--	48	57	63
		Good	--	30	41	48
Pinyon-Juniper - Pinyon, Juniper, or Both; Grass Understory		Poor	--	75	85	89
		Fair	--	58	73	80
		Good	--	41	61	71
Sagebrush With Grass Understory		Poor	--	67	80	85
		Fair	--	51	63	70
		Good	--	35	47	55
Desert Shrub - Major Plants Include Saltbrush, Greasewood, Creosotebush, Blackbrush, Bursage, Palo Verde, Mesquite, and Cactus		Poor	63	77	85	88
		Fair	55	72	81	86
		Good	49	68	79	84



Εικόνα 1. Μέτρηση της ταχύτητας των υδάτων στον παραπόταμο Κεραμιώτη.



Εικόνα 2. Πλατφόρμα Συλλογής Δεδομένων, [Έλεγχος λειτουργίας - Συντήρηση].



Εικόνα 3. Χιονοκάλυψη στο εκτεταμένο καρστικό σύστημα του ορεινού όγκου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη Υδροκρίτης (Υψόμετρο > 2000 m).