



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ

Εφαρμογή στον ποταμό Πηνειό

Πέτσιου Αμαλία

Επιβλέπων Καθηγητής: Κουτσογιάννης Δημήτρης

Αθήνα, Μάρτιος 2017



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ
ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ
Εφαρμογή στον ποταμό Πηνειό**

Πέτσιου Αμαλία

Επιβλέπων Καθηγητής: Κουτσογιάννης Δημήτρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Ευχαριστίες

Καταρχήν, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, Κοσμήτορα και Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την δυνατότητα που μου προσέφερε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να εκπονήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για τη συνολική του προσφορά στην ακαδημαϊκή μου πορεία στα πλαίσια των προπτυχιακών μαθημάτων του που παρακολούθησα.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη, ο οποίος με παρότρυνε στο συγκεκριμένο θέμα, με καθοδηγήσε και με προσωπικό ενδιαφέρον συνεισέφερε στην επίλυση προγραμματιστικών ζητημάτων που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και μου πρότεινε τη συμμετοχή στη δημοσίευση ενός σχετικού άρθρου που θα παρουσιαστεί στις 5-9 Ιουλίου στο συνέδριο 10th WORLD CONGRESS on Water Resources and Environment “Panta Rhei” που θα διεξαχθεί στην Αθήνα. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω και τους δύο για την αξέχαστη εμπειρία που αποκόμισα τη περσινή χρονιά στο συνέδριο EGU2016 στη Βιέννη, αφού μας ανέθεσαν να παρουσιάσουμε μια ενδιαφέρουσα εργασία.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το Διδάκτορα Ανδρέα Ευστρατιάδη για τις ενδιαφέρουσες ιδέες που υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία, τις πολύτιμες υποδείξεις και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας, τον αναπληρωτή καθηγητή Νικόλαο Μαμάση για την παροχή των δεδομένων που απαιτήθηκαν αλλά και για την υποστήριξη του. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Παναγιώτη Παπανικολάου για τις καίριες επισημάνσεις του ιδιαίτερα στην υδραυλική προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία.

Παράλληλα, ευχαριστώ πολύ την υποψήφια διδάκτορα Ελισσάβητ Φελώνη για τη βοήθεια της στη δημιουργία των απαιτούμενων χαρτών με το λογισμικό ArcGIS.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου, τους γονείς μου Ανδρέα και Μαριέττα, τον αδερφό μου, καθώς και τους φίλους μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο.

Πέτσιου Αμαλία

Μάρτιος 2017

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	VIII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	IX
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1. Βασικές Έννοιες - Κοινοτική Οδηγία 2007/60 για τις Πλημμύρες.....	5
1.2. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	6
1.3. Πλημμύρες	8
1.3.1. Πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα	9
1.4. Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	11
1.5. Διάρθρωση εργασίας	11
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	13
2.1. Ο Πηνειός ποταμός.....	13
2.2. Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας.....	16
2.2.1. Γεωγραφικά στοιχεία	16
2.2.2. Φυσικά χαρακτηριστικά.....	17
2.2.3. Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά	17
2.2.4. Φυσικό περιβάλλον περιοχής.....	18
2.2.5. Γεωλογία της περιοχής.....	20

2.2.6.	Υδρομετρικά στοιχεία.....	21
2.3.	Οι Λεκάνες απορροής.....	23
2.3.1.	Δυτική λεκάνη Θεσσαλίας.....	24
2.3.2.	Περιοχή Μελέτης.....	29
3.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	32
3.1.	Βασικές πηγές αβεβαιότητας στη χαρτογράφηση των πλημμυρών.....	32
3.1.1.	Εισαγωγή.....	32
3.1.2.	Τοπογραφικά δεδομένα εισόδου	33
3.1.3.	Υδρολογικά μοντέλα	34
3.1.4.	Υδραυλικά μοντέλα πλημμυρών	36
3.1.5.	Παράμετροι του ποταμού.....	36
3.1.6.	Επικύρωση δεδομένων.....	37
3.2.	Μια προτεινόμενη πρακτική: Λεκάνη απορροής Πηνειού	38
3.3.	Βιβλιογραφικά στοιχεία κατανομών των παραμέτρων.....	40
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ LISFLOOD-FP	46
4.1.	Περιγραφή Υδραυλικών Μοντέλων	46
4.1.1.	Αιτιολόγηση επιλογής Υδραυλικού Μοντέλου LISFLOOD-FP.....	47
4.2.	Θεωρητικό πλαίσιο	48
4.2.1.	Ροή με ελεύθερη επιφάνεια	48
4.2.2.	Διόδευση Πλημμυρών	51
4.3.	Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο LISFLOOD-FP	53
4.4.	Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP	57
5.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ	59
5.1.	Υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης.....	59
5.1.1.	Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης	59

5.1.2.	Συνθήκες Ροής.....	63
5.1.3.	Παράμετροι του ποταμού.....	63
5.2.	Προτεινόμενη Εφαρμογή Ανάλυσης Αβεβαιότητας	64
5.2.1.	Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP	64
5.2.2.	Προτεινόμενη μεθοδολογία - εφαρμογή.....	65
5.2.3.	Έλεγχος Υδραυλικών χαρακτηριστικών μοντέλου	68
6.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	72
6.1.	Εισαγωγή.....	72
6.2.	Παράμετροι που επηρεάζουν τις επιπτώσεις	74
6.3.	Κατηγορίες Οικονομικών Ζημιών.....	76
6.4.	Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60.....	77
6.5.	Εκτίμηση της αξίας αστικών ακινήτων	79
6.5.1.	Μέθοδοι εκτίμησης της αξίας των ακινήτων	80
6.5.2.	Παράδειγμα Εκτίμηση Διακυβέματος Αστικών Ακινήτων	83
6.6.	Εκτίμηση αξιών βιομηχανικών, αγροτικών, δασικών εκτάσεων και κινητών αξιών. 85	
6.6.1.	Παράδειγμα Εκτίμησης Διακυβέματος κινητών αξιών, υποδομών, βιομηχανικών εγκαταστάσεων, αγροτικών και δασικών εκτάσεων.....	89
6.7.	Εφαρμογή απλοποιημένης εκτίμησης ζημιών (post- event damage)	90
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	98

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μέση ετήσια βροχόπτωση (σε mm) για την περίοδο 1960 – 1990 ανά υδατικό διαμέρισμα, Πηγή: (http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr ETYMΠ).....	11
Σχήμα 2.1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - επεξεργασμένα στοιχεία):.....	15
Σχήμα 2.2: Νομοί που απαρτίζουν το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας.	16
Σχήμα 2.3: Χρήσεις γης του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: Corine Land Cover 2000).....	19
Σχήμα 2.4: Περιοχές Natura του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: www.geodata.gov.gr).....	20
Σχήμα 2.5: Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0005.htm - επεξεργασμένα στοιχεία).....	21
Σχήμα 2.6: Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr).....	24
Σχήμα 2.7: Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας (Πηγή: Αθ. Οικονόμου, 2013).	25
Σχήμα 2.8: Περιοχή μελέτης (www.anavasi.gr).....	30
Σχήμα 2.9: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012).....	31
Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια (Παπανικολάου, 2012).	49
Σχήμα 4.2: Εισροή και εκροή σε όγκο ελέγχου (Πρίνος, 2009).	49
Σχήμα 4.3: Μεταβολή πλημμυρικού κύματος.....	52

Σχήμα 4.4: Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP (πηγή: http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood).....	53
Σχήμα 4.5: Φατνία πλημμυρικού πεδίου, ροή μεταξύ αυτών (Πηγή: http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood).....	55
Σχήμα 5.1: Τυπολόγιο της λογαριθμοκανονικής κατανομής τριών παραμέτρων.	42
Σχήμα 5.2: Τυπολόγιο της LogPearson κατανομής.....	43
Σχήμα 5.3: : Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης. Δορυφόρος Landsat 7 (bands RGB 321). Σημειώνεται η ροή του π. Πηνειού (Πηγή: landsatlook.usgs.gov).....	61
Σχήμα 5.4: Ζώνες corine 2000 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: www.geodata.gov.gr).....	62
Σχήμα 5.5: Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP	65
Σχήμα 5.6: Πιθανοτικός Χάρτης κατάκλυσης πλημμύρας για βάθος 0,1m (Υπόβαθρο: Google Earth).	67
Σχήμα 5.7: Πιθανοτικός Χάρτης κατάκλυσης πλημμύρας για βάθος 0,3m (Υπόβαθρο: Google Earth).	67
Σχήμα 6.1: Χρονοσειρές του μεγέθους δύο φυσικών φαινομένων (α) συνεχούς μεταβλητής, (β) διακριτής μεταβλητής.....	73
Σχήμα 6.2: Καμπύλη στάθμης – χρόνου σε ένα στοιχείο	75
Σχήμα 6.3: Κατηγορίες ζημιών από πλημμύρες.....	77
Σχήμα 6.4: Πιθανοτικός χάρτης κατάκλυσης για βάθη ροής 1m.....	91
Σχήμα 6.5: Ο συντελεστής βάθους σε συνάρτηση με το μέσο βάθος κατάκλυσης	91
Σχήμα 6.6: Οικισμός Κεραμιδίου (πηγή:Google Earth)	93
Σχήμα 6.7: Περιοχές κατάκλυσης Α1 έκτασης 1,800στρ. και Α2 έκτασης 2,352στρ.....	94

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Απεικόνιση χρονοσειράς ιστορικών δεδομένων παροχής στο σταθμό Αλή Εφέντη(1973-1979).....	44
Διάγραμμα 3.2: Κλιμακόγραμμα ιστορικής χρονοσειράς. Η κλίση της ευθείας δίνει το συντελεστή Hurst (Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015).	44
Διάγραμμα 3.3: Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας ιστορικής χρονοσειράς - Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας.....	45
Διάγραμμα 3.4: Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας ιστορικής χρονοσειράς - Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας LogPearson κατανομής.....	45
Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση ιστορικής χρονοσειράς στη θέση Αμυγδαλιά με τη χρονοσειρά εξόδου που προκύπτει από την προσομοίωση. Παρουσιάζεται και η ιστορική χρονοσειρά εισόδου στα ανάντη.	68
Διάγραμμα 5.2: Πλημμυρική διόδευση πρώτου πλημμυρικού επεισοδίου. Παρατηρείται η διατήρηση του όγκου εισόδου-εξόδου. $Q_{max_in}/Q_{max_out} = 1,1$, $t_{AB} = 1 \text{ h}$	71

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ο πληθυσμός και η επιφάνεια των νομών εντός του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr).....	18
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).....	26
Πίνακας 2.3: Περιφερειακές ενότητες Δυτικής Θεσσαλίας (Πηγή: www.ypes.gr / ΕΛΣΤΑΤ).....	26
Πίνακας 5.1: Συντελεστής τραχύτητας συναρτήσει της χρήσης γης (Πηγή: Οικονόμου, 2013)	62
Πίνακας 6.1: Υπολογισμός των άμεσων ζημιών κατά μήκος του ποταμού.....	92
Πίνακας 6.2: Αναλυτικός πίνακας οικονομικών ζημιών και αθροιστικά οι συνολικές.....	95

Περίληψη

Η πρόβλεψη των πλημμυρών και η εκτίμηση των επιπτώσεών τους αποτελεί ένα επιστημονικό θέμα ύψιστης σημασίας, που εκτείνεται πάνω στις μετεωρολογικές, υδρολογικές, υδραυλικές, περιβαλλοντικές επιστήμες και των συναφών τους τεχνολογιών. Η οδηγία της Ε.Ε. 2007/60 σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας απαιτεί τη θέσπιση χαρτών επικινδυνότητας και κινδύνων πλημμύρας από τα Κράτη μέλη της που προσδιορίζουν τις πιθανές δυσμενείς συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. Αυτά θα πρέπει να συνοδεύονται από μέτρα για τη διαχείριση των πλημμυρών και την άμβλυνση της συχνότητας των πιθανών καταστροφών από αυτές.

Ωστόσο, η δυναμική των πλημμυρών επηρεάζεται από διάφορους αστάθμητους παράγοντες όπως η κλιματική μεταβλητότητα, οι υδρομορφολογικές συνθήκες, η εκάστοτε χρήση γης της περιοχής μελέτης καθώς και οι δημογραφικές της αλλαγές. Περιλαμβάνει, δηλαδή, μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας ειδικά όταν αυτή προέρχεται από υποθέσεις μοντελοποίησης και απλουστεύσεις. Συνήθως, η μοντελοποίηση των πλημμυρών περιλαμβάνει δύο μέρη, την υδρολογική προσομοίωση, η οποία ποσοτικοποιεί το μέγεθος, τη διάρκεια και την πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας και την υδραυλική προσομοίωση, χρησιμοποιώντας τη διόδευση των κυμάτων πλημμύρας στο κανάλι του ποταμού και τη χαρτογράφηση των περιοχών που πλημμυρίζουν. Η αβεβαιότητα είναι παρούσα σε πολλές πτυχές της παραπάνω προσέγγισης, συμπεριλαμβάνοντας τη δομή του μοντέλου, τις παραμέτρους, τις συνοριακές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου. Μερικές από αυτές τις αβεβαιότητες σε μεγάλες ακόμη και σε μικρές λεκάνες συνήθως αγνοούνται. Στις περισσότερες εφαρμογές τα μοντέλα των πλημμυρών θεωρούνται ως πλήρως ντετερμινιστικά εργαλεία στα οποία η μοναδική έκφραση της αβεβαιότητας είναι η περίοδος επαναφοράς. Συνεπώς, οι χάρτες επικινδυνότητας που εξάγονται από τα υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης περιέχουν πολλές αβεβαιότητες στη δομή, στα δεδομένα και στις παραμέτρους.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, επικεντρωνόμαστε στην αβεβαιότητα που προέρχεται από τις παραμέτρους του ποταμού, δηλαδή από τη γεωμετρία του καναλιού και το συντελεστή τραχύτητας Manning, που στις περισσότερες προσομοιώσεις λαμβάνονται

ως σταθεροί ή με ομοιόμορφη κατανομή πιθανότητας, κάτι που φαίνεται να μην ισχύει στην πραγματικότητα. Βασιζόμενοι σε μια Monte Carlo προσέγγιση, πραγματοποιούμε μια εκτεταμένη ανάλυση αβεβαιότητας με ταυτόχρονη μεταβολή του βάθους του καναλιού, του πλάτους καθώς και του συντελεστή τραχύτητας. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε ότι η αβεβαιότητα που προέρχεται από πηγές που σχετίζονται με το ποτάμι, τον κύριο αγωγό της ορμής, είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά σε περιπτώσεις περιορισμένων μετρήσεων ή ανεπαρκών πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία του ποταμού και το υλικό της επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι από την ανάλυση αβεβαιότητας σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές, προέκυψε ότι η παροχή φαίνεται να παρουσιάζει μακροπρόθεσμη εμμονή.

Με αυτό το τρόπο στοχεύουμε στην ανάπτυξη ενός γενικευμένου στοχαστικού πλαισίου για την εκτίμηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις παραμέτρους του ποταμού, καθώς μια τέτοια ολοκληρωμένη προσέγγιση θα εξασφαλίσει πιο συνεπείς εκτιμήσεις του συνολικού κινδύνου πλημμύρας και του σχετικού εύρους διακύμανσης των χαρτών πλημμύρας, ειδικά για τις περιπτώσεις που υπάρχουν ελλείψεις μετρήσεων ή μετρήσεις με μεγάλη αβεβαιότητα (τοπογραφικές) αλλά και θα επιτρέψει τη καλύτερη εκτίμηση των οικονομικών ζημιών που προέρχονται από αυτές.

Abstract

Flood forecasting and impact assessment is a multidisciplinary topic of high importance, spanning over meteorological, hydrological, hydraulic and environmental sciences and associated technologies. The EU Directive 2007/60 on the assessment and management of flood risk requires establishing flood hazard and flood risk maps showing the potential adverse consequences to human health, the environment, cultural heritage and economic activities. These should be accompanied by measures to manage floods and mitigate the frequency of potential flood damages. These should be accompanied by measures for flood management and mitigation of the frequency of the potential losses.

However, floodplains dynamics is affected by various uncertainties such as climate variability, the hydro-morphological conditions, the land use and the demographic changes. It includes, namely, large uncertainty, derived from modelling assumptions and simplifications. Usually, flood modelling comprises two components, the hydrological simulation, which quantifies the size, duration and probability of the flood event and the hydraulic simulation using the dissemination of flood wave in the river channel and mapping of inundated areas. Inherent uncertainties are present in multiple aspects of the above approaches, involving the model structure, model parameters, boundary conditions and input data. However, most of such uncertainties, which may be surprisingly large, even in small basins, are usually neglected. In fact, in most applications, particularly of the everyday engineering practice, flood models are considered as fully deterministic tools, in which the unique expression of uncertainty is the return period of rainfall. Consequently, the hazard maps exported by hydraulic simulation models contain many uncertainties in the structure, data and parameters.

In this thesis, we focus on the uncertainty derived from the river parameters, i.e. the channel's geometry and the roughness coefficient that in most simulations are considered as constants or as uniformly distributed. The latter assumptions often do not correspond to reality.

Therefore, by using a Monte Carlo approach, we perform an extensive analysis by simultaneous changing the river's depth, width and roughness coefficient. Through literature's review carried out, we can conclude that the uncertainty derived from sources

associated with the river is quite large, especially in cases of limited measurements or insufficient information on the geometry of the river and the surface material. It is worth noting that the uncertainty analysis according to the references showed that the discharge (inflow) appears to have a long-term memory.

In this way we aim at developing a generalized stochastic framework for estimating uncertainty arised by hydraulic simulation models. Such an integrated approach would ensure more consistent estimations of the total flood risk and the associated range of variability of flood inundation maps, especially for areas that they lack of data or they contain data with large uncertainty (topographical measurements) but will also enable a more accurate estimation of the potential financial losses related to such floods.

1. Εισαγωγή

1.1. Βασικές Έννοιες - Κοινοτική Οδηγία 2007/60 για τις Πλημμύρες

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου του 2007, την Οδηγία 2007/60/EK για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου του 2007. Σκοπός αυτής, είναι η θέσπιση ενός πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των δυσμενών συνεπειών της στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική ανάπτυξη (άρθρο 1, 2007/60/EK).

Η Οδηγία 2007/60/EK περιλαμβάνει τρία βήματα εφαρμογής. Αρχικά, ορίζει την εφαρμογή της προκαταρκτικής αξιολόγησης των κινδύνων πλημμύρας. Εν συνέχεια, ακολουθεί η κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard) και χαρτών κινδύνου πλημμύρας (flood risk) και τέλος εκπονούνται τα σχέδια διαχείρισης για κάθε λεκάνη απορροής.

Έτσι, σύμφωνα με το άρθρο 6 της Οδηγίας 2007/60/EK, τα κράτη μέλη καταρτίζουν, σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, στην πλέον κατάλληλη κλίμακα για τις περιοχές, στις οποίες τα κράτη μέλη συμπεραίνουν ότι υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή ότι είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα.

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια:

- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων,
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναφοράς ≥ 100 χρόνια),
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- i. η έκταση της πλημμύρας,
- ii. το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση,
- iii. ανάλογα με την περίπτωση, η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων.

Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των προαναφερθέντων σεναρίων και εκφράζονται ως εξής:

- i. ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν,
- ii. τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί,
- iii. εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες ενδέχεται να πληγούν,
- iv. άλλες πληροφορίες που το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Η επιτυχής εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60 δεν περιορίζεται μόνο στην πραγματοποίηση των τριών σταδίων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και στην ταυτόχρονη τήρηση απαιτήσεων, που έχουν θεσπιστεί με άλλα κοινοτικά νομοθετικά κείμενα. Η οδηγία για την διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας παραπέμπει στην Οδηγία 2000/60, ώστε να ληφθούν κατάλληλα μέτρα με σκοπό το συντονισμό των δύο οδηγιών. Ακόμη, η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΚ επιβάλλει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού με στόχο την επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης και φιλοδοξεί στην άμβλυνση των επιπτώσεων των πλημμυρών.

Ο συντονισμός των δύο οδηγιών αποτελεί την ολοκληρωμένη διαχείριση της λεκάνης απορροής ποταμών. Συνεπώς στους χάρτες κινδύνου πλημμύρας, όχι μόνο θα περιγράφονται οι δυνητικές αρνητικές συνέπειες των πλημμυρών, αλλά και θα καταγράφονται και οι προστατευόμενες περιοχές (NATURA 2000) που αναφέρονται στην οδηγία πλαίσιο και ενδέχεται να πληγούν. Τέλος τα στάδια που περιγράφει η Οδηγία 2007/60, θα πρέπει να επαναλαμβάνονται κάθε έξι έτη όπως ορίζουν τα βήματα της Οδηγίας 2000/60 με αρχή το 2009 (Τσακίρης, 2009).

1.2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υδραυλική προσομοίωση ενός τμήματος του ποταμού Πηνειού, βασιζόμενοι σε μια Monte Carlo προσέγγιση, ουτως ώστε να

πραγματοποιήσουμε μια εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του ποταμού που εμπεριέχουν τις μεγαλύτερες αβεβαιότητες. Στόχος αποτελεί η εκπόνηση πιθανοτικών χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης όπου αποτυπώνονται οι πλημμυρικές ζώνες που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες πιθανότητες όπως προέκυψαν από το υδραυλικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την προσομοίωση είναι ένα τμήμα του ποταμού Πηνειού, μήκους περίπου 40χλμ, με ανάντη όριο το σταθμό Αλή Εφέντη και κατάντη το σταθμό Αμυδαλιά.

Αποτελεί γενική αλήθεια ότι οι πλημμύρες αποτελούν ένα ακραίο φυσικό φαινόμενο που η δυναμική τους δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Αναλυτικότερα, η δυναμική των πλημμυρών επηρεάζεται από διάφορους αστάθμητους παράγοντες όπως οι κλιματικές διακυμάνσεις, οι υδρομορφολογικές συνθήκες, η εκάστοτε χρήση γης της περιοχής μελέτης αλλά και οι δημογραφικές της αλλαγές. Περιλαμβάνει, δηλαδή, μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας ειδικά όταν αυτή προέρχεται από υποθέσεις μοντελοποίησης και απλουστεύσεις. Συνήθως, η μοντελοποίηση των πλημμυρών περιλαμβάνει δύο μέρη, την υδρολογική προσομοίωση, η οποία ποσοτικοποιεί το μέγεθος, τη διάρκεια και την πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας και την υδραυλική προσομοίωση, χρησιμοποιώντας τη διάδοση των κυμάτων πλημμύρας στο κανάλι του ποταμού και τη χαρτογράφηση των περιοχών που πλημμυρίζουν. Η αβεβαιότητα είναι παρούσα σε πολλές πτυχές της παραπάνω προσέγγισης, συμπεριλαμβάνοντας τη δομή του μοντέλου, τις παραμέτρους, τις συνοριακές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου. Μερικές από αυτές τις αβεβαιότητες που μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες, ακόμη και σε μικρές λεκάνες, συνήθως αγνοούνται (Lazaridou et al., 2004). Στις περισσότερες εφαρμογές τα μοντέλα των πλημμυρών θεωρούνται ως πλήρως ντετερμινιστικά εργαλεία στα οποία η μοναδική έκφραση της αβεβαιότητας είναι η περίοδος επαναφοράς (Efstratiadis et al., 2014). Συνεπώς, οι χάρτες επικινδυνότητας που εξάγονται από τα υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης εμπεριέχουν πολλές αβεβαιότητες στη δομή, στα δεδομένα και στις παραμέτρους. Γι' αυτό το λόγο, παρουσιάζεται μια προτεινόμενη μεθοδολογία για βελτίωση της Οδηγίας της ΕΕ για περιπτώσεις απουσίας ή έλλειψη μετρήσεων κυρίως για τη περιοχή του δικτύου του ποταμού (γεωμετρία ποταμού, υλικό του ποταμού, πριν και μετά από τα πλημμυρικά συμβάντα). Αυτή η μεθοδολογία περιλαμβάνει δύο πιθανούς τρόπους υλοποίησης:

- A. Την τοπογραφική και γεωλογική ανάλυση της περιοχής, το οποίο αποτελεί κοστοβόρο και χρονοβόρο εκχέρισμα

B. Την ανάλυση της αβεβαιότητας των παραμέτρων που επηρεάζουν την πλημμυρική διόδευση.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετήθηκε ο δεύτερος τρόπος υλοποίησης, δηλαδή η ανάλυση ευασθησίας των παραμέτρων του ποταμού και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρείται απαραίτητο να επισημανθεί η αναγκαιότητα για βελτίωση της εφαρμογή της Οδηγίας Πλημμυρών, ούτως ώστε να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα που προκύπτει από τις σημαντικές παραμέτρους του ποταμού και βάσει αυτής να πραγματοποιηθεί μια ορθότερη οικονομική ανάλυση των ζημιών που προκύπτουν από τις πλημμύρες.

1.3. Πλημμύρες

Η Υδρολογία Πλημμυρών αναφέρεται στο κλάδο της Τεχνικής Υδρολογίας που μελετά τις διεργασίες εκείνες από την έναρξη μιας καταιγίδας έως το τέλος της απορροής που οφείλεται στο συγκεκριμένο ακραίο επεισόδιο βροχής. Στη διαδικασία αυτή δίνεται έμφαση στην επιφανειακή απορροή η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση της διερχόμενης παροχής του ποταμού. Ως Πλημμύρα αναφέρεται «η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό» (άρθρο 2, κεφ. 1 της Οδηγίας 2007/60/EK) , περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, χείμαρρους, εφήμερα υδατορεύματα ή από τη θάλασσα (σε παράκτιες περιοχές) και αναπτύσσεται βάσει της χωροχρονικής εξέλιξης της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (μορφολογικά, εδαφολογικά, χρήσεις γηςφυτοκάλυψη) καθώς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποστράγγισης (υδρογραφικό δίκτυο ή ανθρωπογενές περιβάλλον).

Οι πλημμύρες δύνανται να προκληθούν λόγω των εξής αιτιών: (Λέκκας, 2009):

- Ραγδαίες και παρατεταμένες βροχές (φθινοπωρινές πλημμύρες)
- Ταχεία τήξη χιονιών και παγετώνων (πλημμύρες της άνοιξης)
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, λόγω παλιρροιακών φαινομένων
- Εφόρμηση της θάλασσας στη ξηρά, λόγω τσουνάμι
- Απότομη διάρρηξη φράγματος τεχνητής λίμνης

Το μέγεθος μιας πλημμύρας συνδέεται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος

συρροής) και των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες). Οι πλημμύρες αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή, μετά τις δασικές πυρκαγιές. Κυρίως, εκδηλώνονται είτε ως βραδείας εξέλιξης (ετήσιες) πλημμύρες, οι οποίες δεν προκαλούν μεγάλες καταστροφές, είτε ως ξαφνικά γεγονότα (flash floods), που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις περιοχές που πλήττουν. (Λέκκας, 2009)

Η ανάλυση των πλημμυρών περιλαμβάνει δύο κύρια πεδία, την υδρολογική και την υδραυλική ανάλυση. Με την υδρολογική ανάλυση μελετάται το επεισόδιο της βροχής και γίνεται η εκτίμηση των παροχών απορροής σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Με αυτά τα δεδομένα η υδραυλική ανάλυση περιγράφει την εξέλιξη της ροής στο υφιστάμενο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης καθώς και την πιθανή κατάκλυση στα πλημμυρικά πεδία εκατέρωθεν των καναλιών.

Το υδρολογικό και πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη είναι ποικίλο λόγω της μεταβλητότητας του ανάγλυφου και του κλίματος μεταξύ των περιοχών. Ωστόσο, η συχνότητα και η ένταση των πλημμυρικών γεγονότων έχει προκαλέσει ανησυχία, λόγω των αυξημένων απωλειών σε ανθρώπινες ζωές αλλά και των εκτεταμένων οικονομικών ζημιών, καθώς πλήττονται κατοικημένες περιοχές και καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Επιπλέον, οι πλημμύρες μπορεί να έχουν και σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν κατακλύζονται εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ή όταν πλήττονται εργοστάσια με μεγάλες ποσότητες τοξικών χημικών προϊόντων. Τέλος, υπάρχει πιθανότητα να θίξουν προστατευόμενες περιοχές και οικότοπους, γεγονός με περιβαλλοντικές προεκτάσεις (E.O.K.E., 2005).

1.3.1. Πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

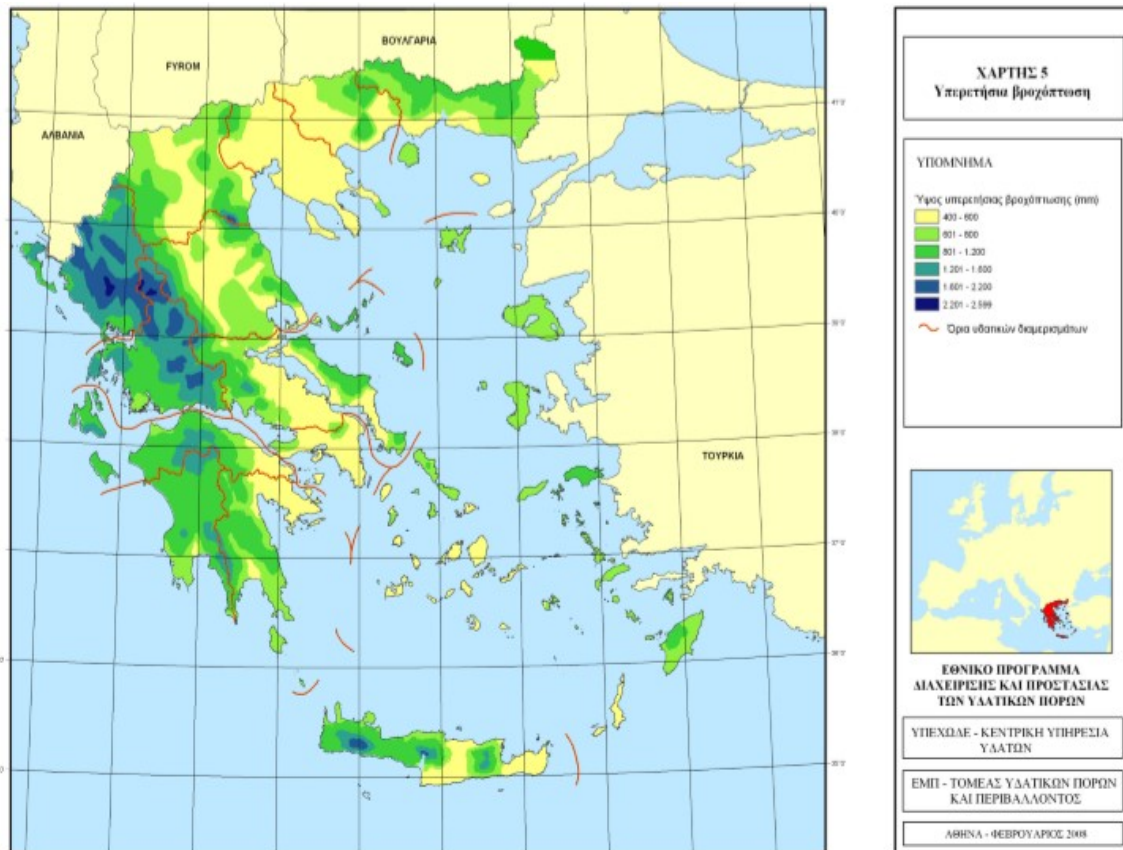
Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και μεγάλη ακτογραμμή. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μεταβλητότητα τόσο των τοπογραφικών και εδαφολογικών χαρακτηριστικών, όσο και των υδρολογικών και κλιματικών.

Λόγω του πολύπλοκου ανάγλυφου και των διαφόρων μεγεθών και χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής, η χώρα έχει χωριστεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει σχετική κλιματική και υδρολογική ομοιογένεια. Η οροσειρά της Πίνδου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα βροχοπτώσεων στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, η δυτική Ελλάδα παρουσιάζει σαφώς αυξημένες βροχοπτώσεις σε σύγκριση με την ανατολική. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στη δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800mm, ενώ στην ανατολική το αντίστοιχο μέγεθος είναι περίπου 400mm.

Ωστόσο, η εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων δεν σχετίζεται άμεσα με τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης, αλλά με την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων, καθώς και με το ανάγλυφο της λεκάνης. Γι' αυτόν τον λόγο, παρότι οι βροχοπτώσεις στη δυτική χώρα είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερες απ' ό τι στην ανατολική, οι πλημμυρικές απορροές στην ανατολική είναι πολύ συχνότερες (Γκιόκας, 2009).

Όπως και στην υπόλοιπη Μεσόγειο ο πιο συνηθισμένος τύπος πλημμυρών στην Ελλάδα είναι οι αστραπιαίες πλημμύρες (flashfloods) και ευνοούνται από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους της περιοχής. Κύρια αιτία πρόκλησης των πλημμυρών αυτών είναι η αυξημένη ένταση της βροχόπτωσης. Οι ζημιές που καταγράφονται από μια βροχόπτωση η οποία θα προκαλέσει πλημμύρα, εξαρτάται κυρίως από την παρουσία ή μη κατασκευαστικών αντιπλημμυρικών έργων, από την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος της λεκάνης απορροής (μείωση χρόνου συρροής), από την ανθρώπινη δραστηριότητα ειδικά στα πιθανά πλημμυρικά πεδία και από την ετοιμότητα των μηχανισμών πολιτικής προστασίας. Τα τελευταία 40 χρόνια στην Ελλάδα οι πλημμύρες έχουν προκαλέσει πολύ περισσότερα θύματα σε ανθρώπινες ζωές απ' ό τι οι σεισμοί.

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται οι μέσες υπερετήσεις βροχοπτώσεις ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα.



Σχήμα 1.1: Μέση ετήσια βροχόπτωση (σε mm) ανά υδατικό διαμέρισμα,

Πηγή: (<https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/782/>)

1.4. Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας είναι:

- ArcGIS: ομάδα προγραμμάτων διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών της ESRI.
- Matlab, εύχρηστο και αρκετά εύελκτο υπολογιστικό περιβάλλον για υλοποίηση επιστημονικών εφαρμογών σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων
- LISFLOOD – FP, είναι ψευδο-διδιάστατο υδραυλικό μοντέλο και κατασκευάστηκε από τη σχολή Γεωγραφικών Επιστημών του Πανεπιστημίου του Bristol. (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>)
- Microsoft Office 2010 (word, excel, power point).

1.5. Διάρθρωση εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της Οδηγίας 2007/60/EK, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην αναφορά αυτής για τους χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνου πλημμύρας. Αναφέρεται ο σκοπός της παρούσας

εργασίας και τέλος γίνεται αναφορά στα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του σκοπού αυτού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά της περιοχής μελέτης όσον αφορά τη μορφολογία, τη γεωλογία και το υδρογραφικό δίκτυο αυτής με αντίστοιχη παράθεση χαρτών που αναδεικνύουν το ανάγλυφο, τους γεωλογικούς και υδρογεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής καθώς επίσης και τις χρήσεις γης αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για την αβεβαιότητα των πλημμυρών που είναι παρούσα τόσο στην υδρολογική αλλά και στην υδραυλική προσομοίωση. Έμφαση δίνεται στην υδραυλική προσομοίωση, συγκεκριμένα στις παραμέτρους του ποταμού (γεωμετρία καναλιού και συντελεστής τραχύτητας) όπου προσδιορίστηκαν οι κατανομές που ακολουθούν σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα διαφορετικά υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης των πλημμυρών και αναλύεται το θεωρητικό πλαίσιο των υπολογισμών της ροής για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή το LISFLOOD-FP, αλλά και τα δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εφαρμογή της διαδικασίας της υδραυλικής προσομοίωσης του τμήματος του ποταμού μέσω μιας Monte Carlo προσέγγισης για τις παραμέτρους του ποταμού που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Η υδραυλική προσομοίωση περιλαμβάνει το στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων, που αφορούν τη γεωμετρία και γεωλογία της περιοχής και του τμήματος του ποταμού, και την εκτέλεση των υπολογισμών αυτής. Στο τέλος του κεφαλαίου, με βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν εκπονήθηκε ο πιθανοτικός χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενής αναφορά στον οικονομικό υπολογισμό των ζημιών που προέρχονται από τις πλημμύρες και γίνεται μια σύντομη προσεγγιστική οικονομική ανάλυση για την περιοχή μελέτης με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας.

Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει έναν γενικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων, την εξαγωγή των συμπερασμάτων από την ανάλυση ευαισθησίας καθώς επίσης και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

2.1. Ο Πηνειός ποταμός

Ως «Ποταμός» ορίζεται το σύστημα των εσωτερικών υδάτων, των ρεόντων επιφανειακών υδάτων, το οποίο ρέει, κατά το μεγαλύτερο μέρος του, στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά και το οποίο μπορεί, για ένα μέρος της διαδρομής του, να ρέει υπογείως.

Ο Πηνειός είναι ο κύριος και ο πιο αξιόλογος ποταμός της Θεσσαλίας. Πηγάζει από την Πίνδο, περνάει κοντά στη Καλαμπάκα και βγαίνει στη Θεσσαλική πεδιάδα. Ο Πηνειός ποταμός βρίσκεται στο κεντρικό διαμέρισμα της ηπειρωτικής Ελλάδας, στη Θεσσαλία και το συνολικό του μήκος είναι 216 km ενώ η συνολική του επιφάνεια φτάνει τα 9.500 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Σχηματίζεται από τη συμβολή του Μαλακασιώτικου ρέματος, που πηγάζει από το βουνό Λάκμος και του ρέματος Μουργκάνι (Ιων), που πηγάζει από τα Αντιχάσια. Μετά την είσοδο του στη πεδιάδα δέχεται από αριστερά όλα τα νερά των Χασιών, τα οποία φέρνουν σε αυτόν ο Ληθαίος και ο Νεοχωρίτης. Από τα νότια χύνονται σε αυτόν τα ρέματα της Πίνδου και της Όθρου, τα οποία είναι ο Πορταϊκός, ο Πάμισος, ο Καλέντζης, ο Σοφαδίτης και ο Ενιπέας. Τα νερά του Καλέντζη, του Σοφαδίτη και του Ενιπέα μετά από μικρό κοινό ρου χύνονται όλα μαζί στον Πηνειό.

Ο Πηνειός μαζί με τους παραποτάμους του, αποτελεί για τη Θεσσαλία το μοναδικό υδάτινο αποδέκτη. Η Θεσσαλική περιοχή, με έναν πληθυσμό περίπου 500,000 κατοίκων, είναι κυρίως γεωργική, με μικρή βιομηχανική δραστηριότητα. Οι ανάγκες πόσιμου νερού της Λάρισας καλύπτονταν, μέχρι το 1986, αποκλειστικά από τον Πηνειό. Όμως η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση νερού και η αύξηση της καλλιέργειας βαμβακιού στη Θεσσαλική πεδιάδα, η οποία απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού, σε συνδυασμό με τη ρύπανση του ποταμού από φυτοφάρμακα, οδήγησε στην αναζήτηση νέων πηγών νερού. Έτσι από το 1990, οι ανάγκες πόσιμου νερού της Λάρισας καλύπτονται 100% από υπόγεια νερά που προέρχονται από γεωτρήσεις.

Βλέποντας κανείς τον Πηνειό ως σύνολο διαπιστώνει ότι παρουσιάζει μια πολυπλοκότητα, η οποία οφείλεται στις κατά θέσεις διαφορετικές επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος, που κατά βάση είναι αυτές που προσδιορίζουν τόσο το δυναμικό του ποταμού, όσο και την κατάσταση στην οποία την κάθε στιγμή βρίσκεται. Επίσης οι συνθήκες αυτές

προσδιορίζουν και τις δυνατότητες και τους τρόπους που υπάρχουν στην κατεύθυνση μιας ορθολογικής αειφορικής διαχείρισης του ποταμού.

Αναλυτικότερα, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι σημαντικοί παράγοντες στη διαφοροποίηση του ποταμού κατά θέσεις είναι:

- Το μεγάλο μήκος του, παράλληλα με τη συχνή αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του και των μαιανδρικών του σχηματισμών.
- Η εγκάρσια πορεία του στη Θεσσαλία, ως προς ορεινούς όγκους που το περιβάλλουν.
- Οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος το οποίο διασχίζει, όπως είναι τα πρηνή βουνών στην οριοθέτηση στενών κοιλάδων, η πεδινή περιοχή, η οριοθέτηση και μορφή ροής ως προς την κοίτη, οι συμβολές παραποτάμων, οι πλημμυρικές ζώνες, η βλάστηση, οι γεωλογικές, υδρολιθολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, κ.α.
- Οι αλλαγές χρήσεων και κάλυψης γης, με σημαντικές χωρικές μεταβολές μεταξύ κτηνοτροφίας, γεωργίας και βιοτεχνικών – βιομηχανικών μονάδων.
- Τα τεχνικά, κυρίως εγχειοβελτιωτικά έργα και η ανάπτυξη τους ως προς τον ποταμό.
- Η γειτονία με πολλά χωριά και πόλεις.

Παρά τη σύνθετη εικόνα που παρουσιάζει στο χάρτη, το υδρογραφικό δίκτυο της Θεσσαλίας είναι σχετικά απλό, λόγω της μορφολογίας της. Στην πραγματικότητα είναι μια βαθιά λεκάνη, η οποία περιβάλλεται από υψηλούς ορεινούς όγκους, κάτι που σημαίνει ότι τα νερά των βροχών δεν μπορούν να συγκεντρωθούν εύκολα. Η μέση ετήσια απορροή στις εκβολές του Πηνειού είναι $86,1 \text{ m}^3/\text{s}$ σύμφωνα με την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας. Τα στενά των Τεμπών καθώς και τα άλλα δύο στενά κατά μήκος του ποταμού (Καλαμακίου και Ροδιάς) αποτελούν την αιτία για τις περισσότερες πλημμύρες που εμφανίζονται στην πεδιάδα, κυρίως στις περιοχές Ζάρκου και Γόννων. Επιπλέον η παρουσία γεφυρών χαμηλού ύψους, η κατασκευή πρόχειρων φραγμάτων για άντληση νερού από τους αγρότες και το χαμηλό ύψος του αποστραγγιστικού δικτύου ενισχύουν τη τάση για πλημμύρες (Mimikou et al., 1995).

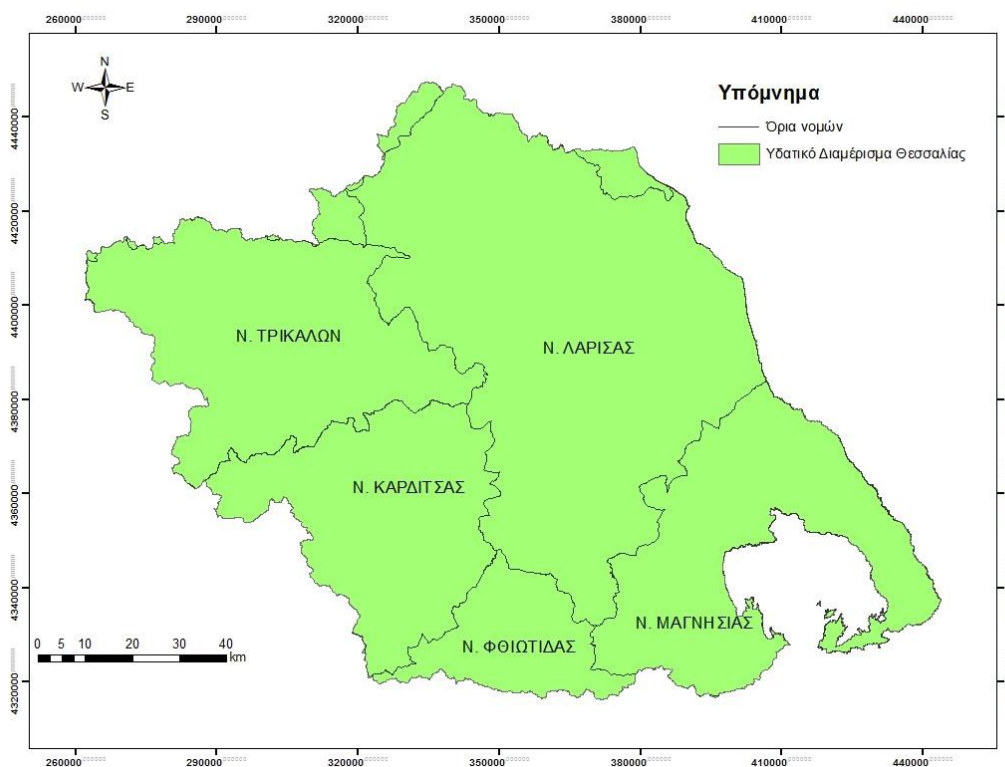


Σχήμα 2.1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - επεξεργασμένα στοιχεία):

2.2. Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας

2.2.1. Γεωγραφικά στοιχεία

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας όπως καθορίστηκε με το Ν.1739/1987 (ΦΕΚ 201/Α/20-11-1987), με έκταση 12.377 km² αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο Υδατικό Διαμέρισμα της χώρας. Τα όριά του ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τα όρια του αντίστοιχου γεωγραφικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, το οποίο καλύπτει το 88% της έκτασης του υδατικού διαμερίσματος. Περιλαμβάνει σχεδόν το σύνολο των Περιφερειακών Ενοτήτων Λάρισας, Μαγνησίας και τα μεγαλύτερα τμήματα των Περιφερειακών Ενοτήτων Καρδίτσας και Τρικάλων. Περιλαμβάνει επίσης τμήματα των Περιφερειών Στερεάς Ελλάδας (τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας), Ηπείρου (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Γρεβενών), Δυτικής Μακεδονίας (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης) και Κεντρικής Μακεδονίας (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Πιερίας). Στον ακόλουθο Χάρτη 2.2, απεικονίζονται τα όρια των υδατικών και γεωγραφικών διαμερισμάτων.



Σχήμα 2.2: Νομοί που απαρτίζουν το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας.

2.2.2. Φυσικά χαρακτηριστικά

Γεωμορφολογία

Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα, με ορεινά τμήματα περιμετρικά και πεδινά στις κεντρικές περιοχές. Υπάρχουν πέντε ορεινοί όγκοι, μεταξύ των οποίων ο Όλυμπος, με υψόμετρο 2.917 m, το ψηλότερο στην Ελλάδα. Το πεδινό τμήμα καλύπτει σχεδόν το 35% της περιοχής μελέτης, ενώ η υπόλοιπη είναι ορεινή – ημιορεινή (26%), με υψόμετρο πάνω από 600 m, και λοφώδες (39%), με υψόμετρο 150-600 m. Η πεδιάδα της Θεσσαλίας είναι η μεγαλύτερη του ελληνικού χώρου. Η ακτογραμμή της περιοχής μελέτης είναι ήπια χωρίς σημαντικό διαμελισμό, με εξαίρεση τον Παγασητικό κόλπο. Ο μεγαλύτερος ποταμός του υδατικού διαμερίσματος, αλλά και ο τρίτος σε μέγεθος στην Ελλάδα, είναι ο Πηνειός (ΥΠΕΚΑ, 2006).

Κλίμα

Το υδατικό διαμέρισμα διαιρείται σε τρεις περιοχές, την ανατολική παράκτια και ορεινή, με μεσογειακό κλίμα, την κεντρική πεδινή, με ηπειρωτικό κλίμα και τη δυτική ορεινή, με ορεινό κλίμα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 ως 17°C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος (ΥΠΕΚΑ, 2006).

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στα πεδινά και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Ενδεικτικές τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης είναι 468 mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1142 mm στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου (Κουτσογιάννης, 1988). Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί οι Ιούλιος και Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά της Θεσσαλίας, και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι περισσότερες χιονοπτώσεις παρατηρούνται τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο (ΥΠΕΚΑ, 2006).

2.2.3. Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά

Η οικονομία της Θεσσαλίας, λόγω της μεγάλης πεδινής επιφάνειας, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη γεωργία. Η ποσοστιαία συμμετοχή του πρωτογενή τομέα στην οικονομία είναι περίπου 24%, σύμφωνα με την Eurostat 2005. Παρατηρείται σημαντική μείωση από το

2001, όπου οι απασχολούμενοι εργαζόμενοι στη γεωργία ήταν 38,7%. Κυριότερα προϊόντα της αγροτικής παραγωγής είναι τα σιτηρά, ο καπνός, το βαμβάκι και πολλά οπωροκηπευτικά (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2007-2013). Επίσης, εξέχουσα θέση στις καλλιέργειες κατέχει η αμπελουργία, με την παραγωγή επιτραπέζιου σταφυλιού, αλλά και σταφυλιού για παραγωγή κρασιού. Παράλληλα, υπάρχει αξιόλογη βιομηχανική ανάπτυξη (21% της οικονομίας) με κυριότερο αντικείμενο την επεξεργασία των αγροτικών, κτηνοτροφικών και δασοκομικών προϊόντων. Ο πληθυσμός της περιοχής μελέτης, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ (2001), ανέρχονται στους 866.614, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Νομός	Πληθυσμός	Επιφάνεια (km ²)
Λάρισας	279.305	5.247
Μαγνησίας	206.995	2.254
Τρικάλων	136.367	2.568
Καρδίτσας	127.851	1.970
Φθιώτιδας	101.656	797
Πιερίας	9.374	114
Γρεβενών	5.066	105
Σύνολο	866.614	13.055

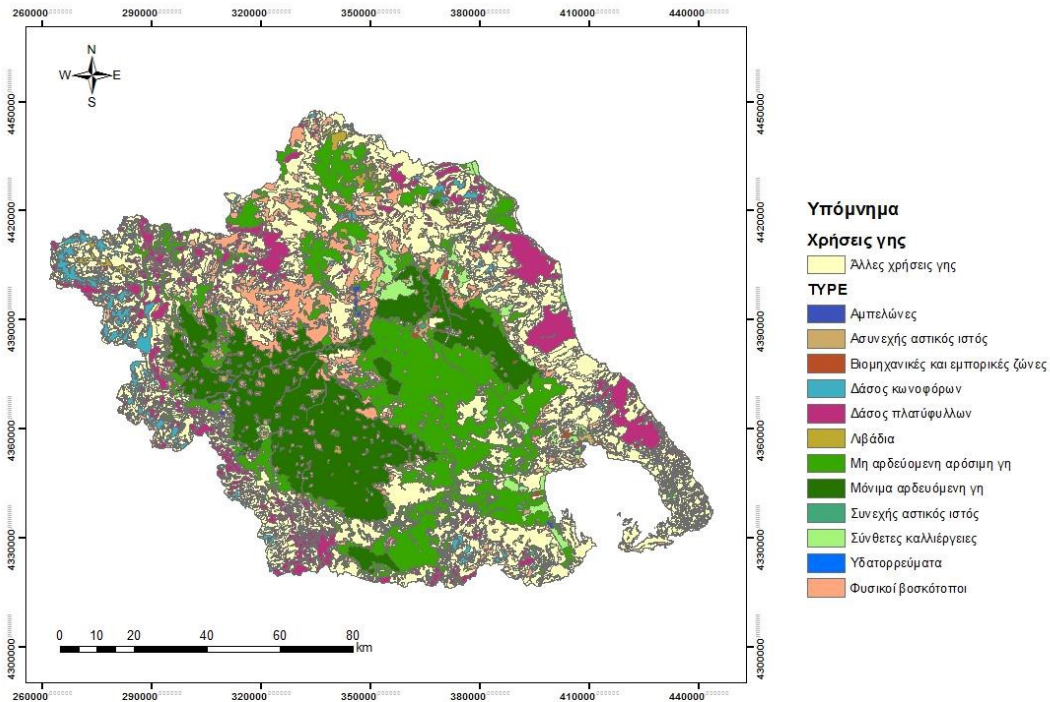
Πίνακας 2.1: Ο πληθυσμός και η επιφάνεια των νομών εντός του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr)

2.2.4. Φυσικό περιβάλλον περιοχής

Το μεγαλύτερο μέρος της Θεσσαλίας καταλαμβάνεται από καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Το έδαφος είναι κατά κύριο λόγο πεδινό, ενώ οι λοφώδεις και ημιορεινές εκτάσεις είναι ως επί το πλείστον βραχώδεις με μικρή φυσική βλάστηση αποτελούμενη από θαμνώδη και αείφυλλα - πλατύφυλλα. Επίσης, ένα μικρό ποσοστό των εκτάσεων της περιοχής, που δεν καλλιεργούνται, ανήκει στα λιβάδια.

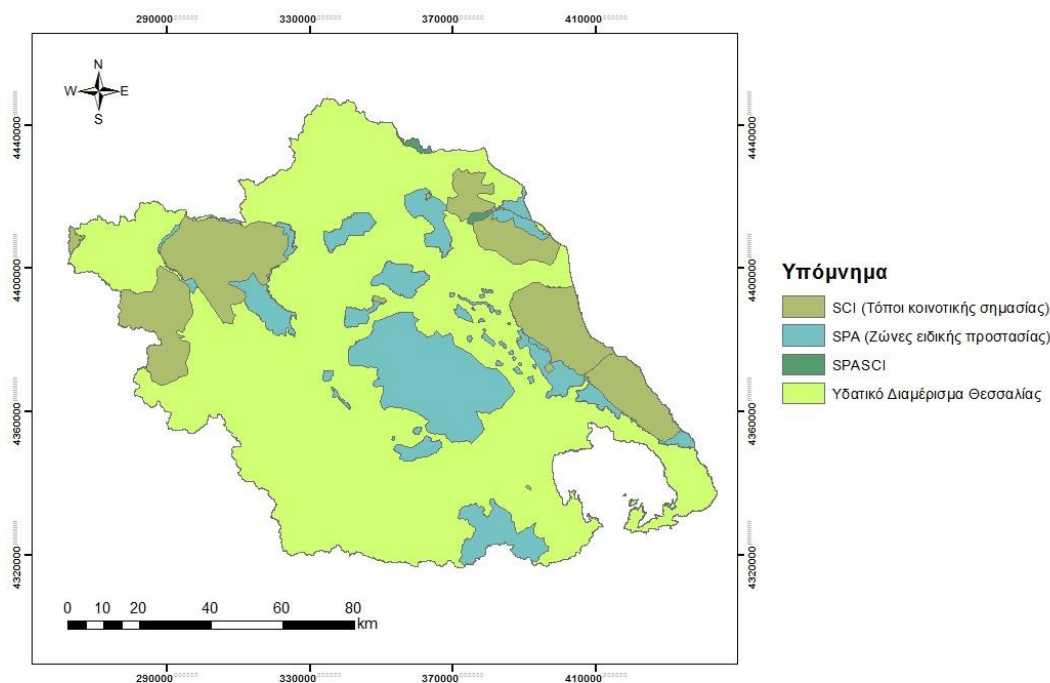
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 οι αγροτικές περιοχές κυριαρχούν με ποσοστό 44.8% και την επόμενη μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνουν οι ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση και ο συνδυασμός της θαμνώδους ή/και ποώδους βλάστησης με 36% της συνολικής έκτασης. Οι περιοχές, που καλύπτονται από δάση (16.7%), βρίσκονται στο

ορεινό Πήλιο, σε περιοχές κοντά στα Τρίκαλα, όπως είναι η Ελάτη, η Πύλη Τρικάλων, το δασικό σύμπλεγμα της Όσσας και ο Κέδρος στο νομό Καρδίτσας. Οι τεχνητές επιφάνειες, όπως οι αστικές περιοχές, οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες και τα ορυχεία καταλαμβάνουν 2%, ενώ η επιφάνεια των υγρών ζωνών σε συνδυασμό με τις υδάτινες επιφάνειες καταλαμβάνουν λιγότερο και από το 0.5% της περιοχής. (www.agro-tour.net)



Σχήμα 2.3: Χρήσεις γης του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: Corine Land Cover 2000)

Τέλος, το Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Περιοχών, δίκτυο NATURA 2000, έχει εντάξει στη λίστα των φυσικών τύπων οικοτόπων και οικοτόπων ειδών, αρκετές περιοχές οι οποίες εντοπίζονται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Οι περιοχές αυτές, σημαντικές σε ευρωπαϊκό επίπεδο, αποτελούν «Ζώνες Ειδικής Προστασίας» (Special Protection Areas - SPA) ή/και «Τόποι Κοινοτικής Σημασίας» (SCI) και απεικονίζονται στην εικόνα 2.4,



Σχήμα 2.4: Περιοχές Natura του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: www.geodata.gov.gr)

2.2.5. Γεωλογία της περιοχής

Το Θεσσαλικό πεδίο αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα, διαμορφώνοντας μια γεωμορφολογική εικόνα με τα πεδινά τμήματα στην κεντρική περιοχή η οποία περιβάλλεται από τα ορεινά τμήματα και συγκεκριμένα τις οροσειρές Ολύμπου – Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου – Όσας στα ανατολικά. Το μέσο υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος είναι 427.5 m. Με τα Χαλκηδόνια όρη, η πεδιάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται στην Ανατολική και τη Δυτική, οι οποίες θεωρούνται ανεξάρτητες από υδρογεωλογική άποψη.

Από τις συνολικά 13 ζώνες που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο, στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας αναπτύσσονται τρεις γεωτεκτονικές ζώνες με βορειοδυτική – νοτιοανατολική κατεύθυνση. Διακρίνονται μεταξύ τους με βάση το παλαιοπεριβάλλον απόθεσης που αντιπροσωπεύουν και τη γεωτεκτονική ιστορία τους. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα καταγράφονται οι παρακάτω ζώνες (Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης και προστασίας των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ 2008):

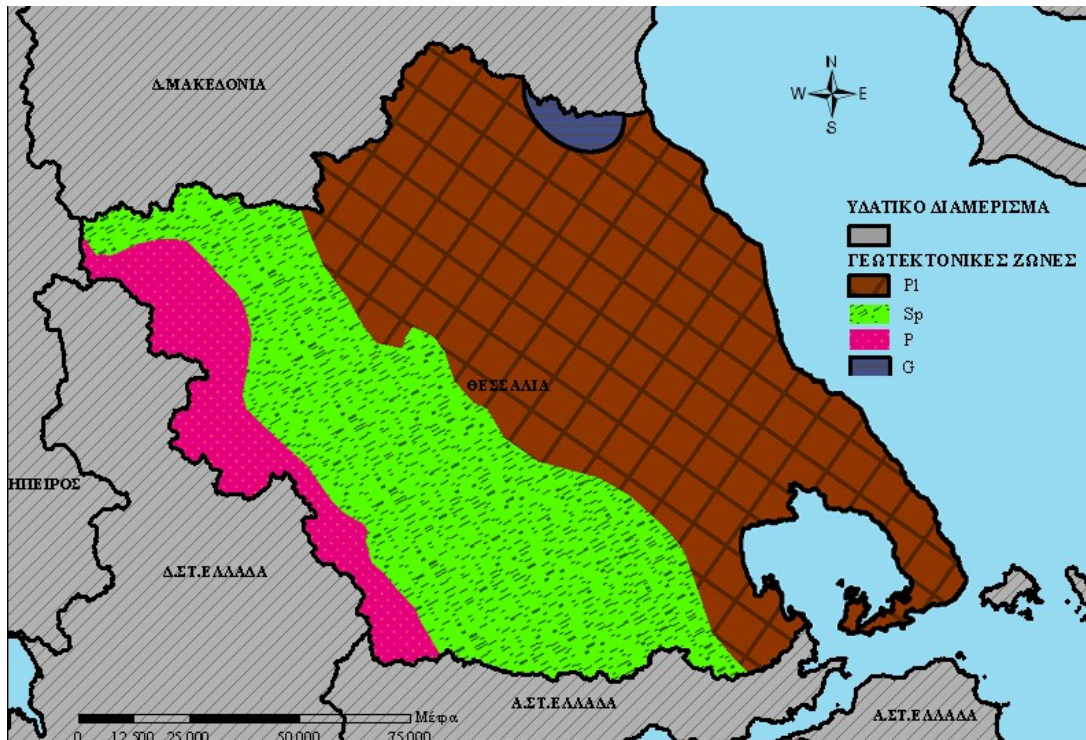
(α) η Πελαγονική ζώνη (PI) με παλαιά μεταμορφωμένα σχιστογενευσιακά και ανθρακικά πετρώματα,

(β) η Υποπελαγονική ζώνη (Sp) με κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα τις μεγάλες οφιολιθικές μάζες και τη συνοδεύουσα σχιστοκερατολιθική διάπλαση, και

(γ) η Ζώνη Ολωνού – Πίνδου (P) με μεσοζωϊκούς ασβεστολιθικούς ορίζοντες και πυριτόλιθους.

(δ) η Ενότητα Όσσας (G), στο βουνό Όλυμπο, ένα τεκτονικό παράθυρο από φυλλίτες, μάρμαρα και δολομίτες.

Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας καταγράφονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς. Η κοιλάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, τη Δυτική και την Ανατολική. Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται με μια λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων που θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα. Στην περίμετρο των δύο υδροφορέων, αναπτύσσονται καρστικές ενότητες με πολύ σημαντική υδροφορία.



Σχήμα 2.5: Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0005.htm - επεξεργασμένα στοιχεία)

2.2.6. Υδρομετρικά στοιχεία

Βασική πληροφορία για την αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων είναι οι μετρήσεις παροχής των υδατορευμάτων. Έτσι, η υδρομετρία έχει ως κύριο στόχο την παραγωγή χρονοσειρών παροχής, σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Για τη συλλογή των

υδρομετρικών δεδομένων των λεκανών απορροής, τοποθετούνται υδρομετρικοί σταθμοί στην έξοδο κάθε μίας από αυτές. (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001)

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού υπάρχει ένα πυκνό δίκτυο υδρομετρικών σταθμών για τη μέτρηση παροχών των κύριων υδατορευμάτων και πηγών. Ορισμένοι από τους σταθμούς ανήκουν στο ΥΠΓΕ, στη ΔΕΗ και στο ΥΠΕΧΩΔΕ (Πίνακα 2.3). Πολλοί από αυτούς εγκαταστάθηκαν για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, όπως τη μέτρηση της πηγαίας απορροής, και έτσι τα δεδομένα τους καλύπτουν πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Δυστυχώς, τα τελευταία χρόνια πολλοί από τους σταθμούς που λειτουργούσαν σε ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, δεν έχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία και παρουσιάζουν κακή ποιότητα της λειτουργίας τους. Κύριος λόγος αυτής της κατάστασης είναι η κατασκευή πρόχειρων φραγμάτων πολύ κοντά στους υδρομετρικούς σταθμούς, ώστε να είναι δυνατή η άντληση νερού. Έτσι, οι απολήψεις νερού από τον Πηνειό για άρδευση κατά τη θερινή περίοδο τα τελευταία χρόνια, δεν επιτρέπουν αξιοπιστία στα δεδομένα στάθμης και παροχής από το 1994 και μετά, που ήταν μια περίοδος με έντονη ξηρασία.

2.3. Οι Λεκάνες απορροής

Σύμφωνα με την από 16-7-2010 πρώτη απόφαση (ΦΕΚ 1383/Β/2-9-2010) της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, η οποία συστάθηκε ως αρμόδιο διυπουργικό όργανο για τη χάραξη της πολιτικής για την προστασία και διαχείριση των Υδάτων στα πλαίσια του Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ 280/Α/9.12.2003) με τον οποίο ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (60/2000/ΕΚ), καθορίστηκαν οι 45 Λεκάνες Απορροής Ποταμών, οι οποίες υπάγονται στα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας. Σύμφωνα με αυτήν το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας αποτελείται από δύο Λεκάνες απορροής, τη Λεκάνη απορροής Πηνειού και τη Λεκάνη απορροής Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου. Η Λεκάνη απορροής του Πηνειού αποτελεί την κύρια υδρολογική λεκάνη του υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας με έκταση της τάξης των 9.500 km² και διατρέχεται από τον ποταμό Πηνειό και τους παραποτάμους του. Κύριοι παραπόταμοι του Πηνειού είναι στο νότιο τμήμα της Λεκάνης ο π. Ενιπέας, ο π. Φαρσαλιώτης, ο π. Σοφαδίτης και ο π. Καλέντζης, στο δυτικό τμήμα το ρ. Μαλακασιώτικο, ο π. Πορταϊκός και ο π. Πάμισος (Πλιούρης) και στο βόρειο τμήμα ο π. Ληθαίος, ο π. Νεοχωρίτης και ο π. Τιταρήσιος. Στον ποταμό Σοφαδίτη έχει κατασκευαστεί το φράγμα του Σμοκόβου, ενώ στο υδατικό διαμέρισμα βρίσκεται και η κλειστή λεκάνη της Λ. Κάρλας. Με τον ποταμό Καλέντζη μεταφέρονται τα νερά από την εκτροπή του ποταμού Ταυρωπού μέσω του ταμιευτήρα Πλαστήρα από το γειτονικό υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.

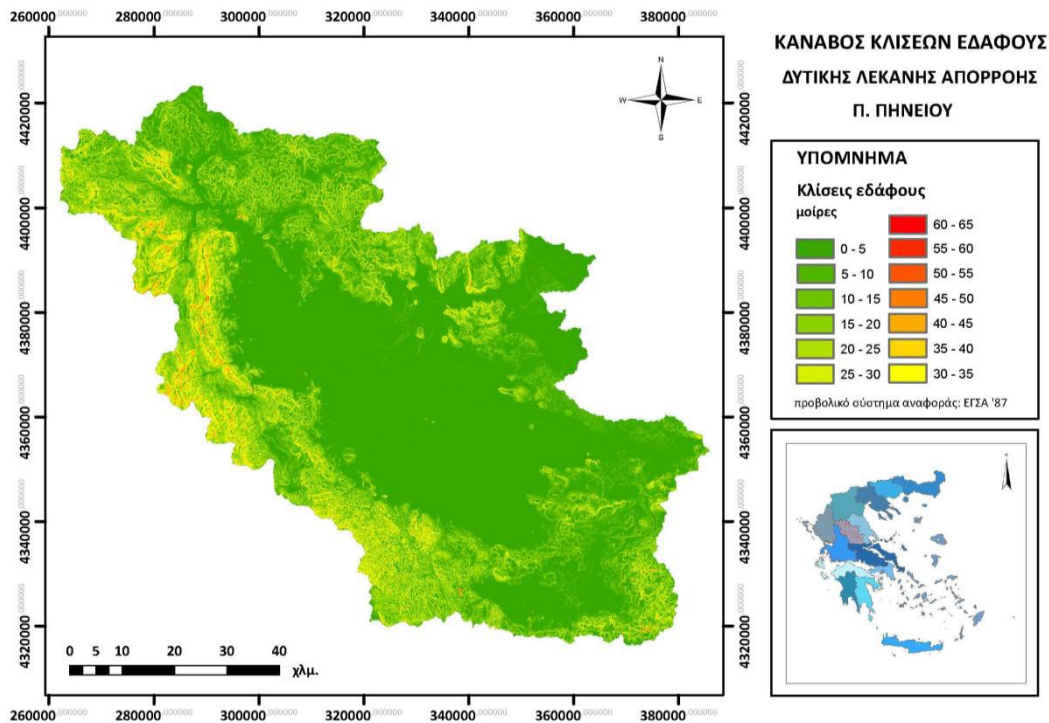
Οι υδατικές ανάγκες του Διαμερίσματος καταγράφονται σε 1632 hm³/y εκ των οποίων 1559 hm³ για κάλυψη των αναγκών άρδευσης, 69 hm³ για ύδρευση και 13 hm³ για τις ανάγκες της κτηνοτροφίας (Κουτσογιάννης κ.α. 2008, Οικονόμου 2013).



Σχήμα 2.6: Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr)

2.3.1. Δυτική λεκάνη Θεσσαλίας

Η Δυτική Λεκάνη του Πηνειού οριοθετείται ανάντη της θέσης Αμυγδαλιά. Έχει έκταση 6300 km², μέση ετήσια βροχόπτωση 779 mm και μέση ετήσια απορροή 259 mm (συντελεστής απορροής 0.33), λαμβάνοντας υπόψη τις απολήψεις (ΥΠΕΧΩΔΕ 2006). Όπως φαίνεται και στον κάρτα κλίσεων εδάφους στον ακόλουθο Χάρτη 2.7 που δημιουργήθηκε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, η Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας αποτελείται από τη δυτική πεδιάδα με πολύ μικρές κλίσεις η οποία περιβάλλεται περιμετρικά από οροσειρές με αυξανόμενες κλίσεις, ενώ στα κατάντη τα Χαλκηδόνια όρη τη διαχωρίζουν από την Ανατολική Λεκάνη.



Σχήμα 2.7: Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας (Πηγή: Αθ. Οικονόμου, 2013).

Διατρέχεται από τον κύριο κλάδο του ποταμού Πηνειού και τους σημαντικότερους παραποτάμους του, εκτός από τον Τιταρήσιο, ο οποίος διατρέχει την ανατολική λεκάνη. Πρόκειται για τη σημαντικότερη περιοχή από πλευράς διαθέσιμων πόρων αλλά και την περιοχή με τις μεγαλύτερες καταναλώσεις κυρίως για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδιάδας. Η ύπαρξη ενός πλούσιου δικτύου ποταμών ευνοεί τον εμπλουτισμό των υπογείων υδροφορέων της Δυτικής πεδιάδας από κατεισδύσεις κατά μήκος των κοιτών με τις σημαντικότερες να σημειώνονται στους κώνους αποθέσεων από πιο αδρομερή υλικά που έχουν δημιουργηθεί στις περιοχές όπου οι ορεινές κοίτες συναντούν την πεδιάδα. Ο εμπλουτισμός των υπογείων υδροφορέων ενισχύεται και από τις υπόγειες πλευρικές διηθήσεις κατά μήκος των επαφών του πεδινού προσχωματικού με τους γύρω ορεινούς όγκους. Σύμφωνα με τη Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων Λεκάνης Απορροής π. Πηνειού, ο διαχωρισμός των υδατικών πόρων σε επιφανειακούς και υπόγειους δεν είναι αρκετά σαφής. Στη Δυτική πεδιάδα, η σχέση μεταξύ επιφανειακών απορροών και υπογείων νερών είναι πολύ στενή. Στα ανάντη της πεδιάδας, οι υδροφόροι εμπλουτίζονται από επιφανειακές απορροές, ενώ στα κατάντη υπάρχουν εκφορτίσεις των υπογείων νερών οι οποίες ενισχύουν την επιφανειακή ροή. Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα στενή και αμφίδρομη επειδή η Δυτική πεδιάδα θεωρείται πρακτικά υδρογεωλογικά κλειστή, χωρίς αξιόλογες υπόγειες διαφυγές. Έτσι, η απορροή στην κατάντη θέση

Αμυγδαλιά καθορίζεται αθροιστικά από την επιφανειακή απορροή και τις υπόγειες εκφορτίσεις, μειούμενη από τις καταναλώσεις. Η Δυτική λεκάνη απορροής του Πηνειού αποτελείται από δύο ευρύτερες υπολεκάνες, του κύριου κλάδου του Πηνειού, η οποία περιλαμβάνει και τις λεκάνες του Ληθαίου, του Πάμισου, του Πορταϊκού και του Νεοχωρίτη και του Ενιπέα, η οποία περιλαμβάνει και τις λεκάνες του Καλέντζη, του Σοφαδίτη και του Φαρσαλιώτη. Η πλέον κατάντη θέση της πρώτης υπολεκάνης είναι η θέση Αλή Εφέντη. Οι δύο λεκάνες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης και απορροής όπως φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.2.

<u>Λεκάνη</u>	Έκταση (km ²)	Μέση Βροχόπτωση (mm/y)	Μέση Απορροή (mm/y)	Συντελεστής Απορροής
Υπολεκάνη κυρίου κλάδου Πηνειού και παραποτάμων του ανάντη της θέσης Αλή Εφέντη	2800	939	421	0.43
Υπολεκάνη Ενιπέα και άλλων παραποτάμων Πηνειού κατάντη της θέσης Αλή Εφέντη και ανάντη της θέσης Αμυγδαλιά	3500	651	129	0.2
Δυτική Λεκάνη Πηνειού	6300	779	259	0.33

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006)

Η περιοχή μελέτης προκειμένου να εξεταστεί, χωρίστηκε σε δημοτικές ενότητες, όπως αυτές ορίστηκαν στο ΦΕΚ με Αρ. Φύλλου 1292 και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Περιφερειακές ενότητες Δυτικής Θεσσαλίας (Πηγή: www.ypes.gr / ΕΛΣΤΑΤ)

Πληθυσμός (2001)		Πληθυσμός (2001)	
Γ1. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΓΡΕΒΕΝΩΝ	37.947	α. Δημοτική Ενότητα Βασιλικής	2.461
1.ΔΗΜΟΣ	7.383	β. Δημοτική Ενότητα	11.841

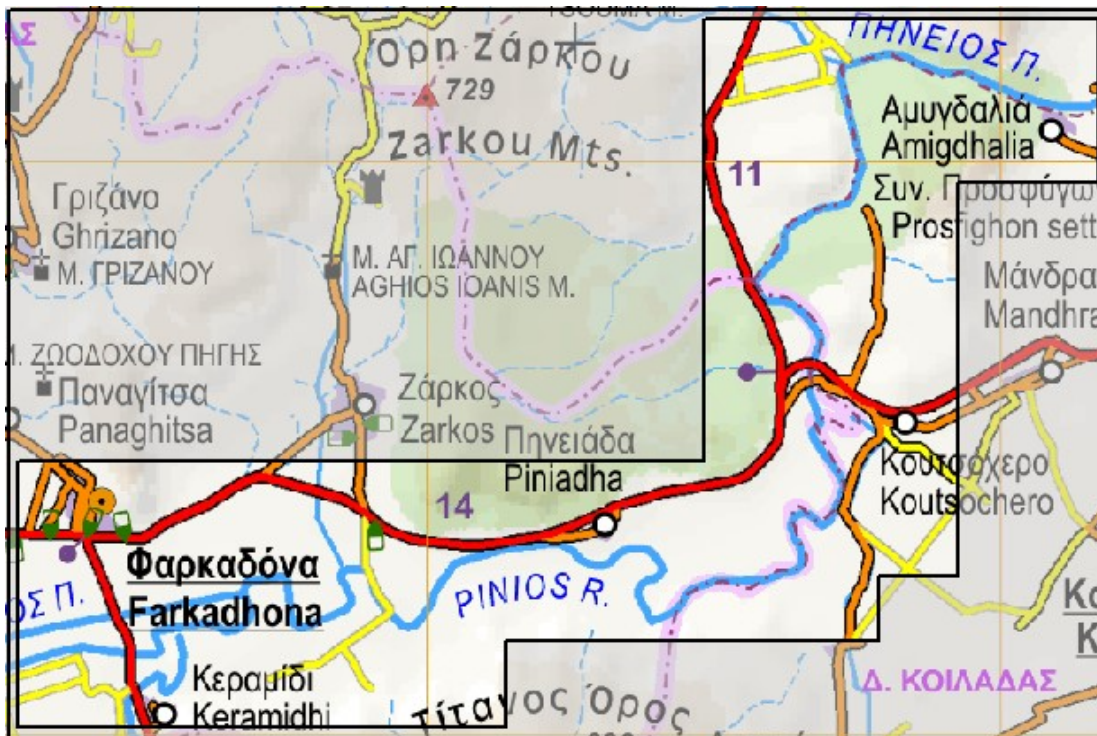
ΔΕΣΚΑΤΗΣ		Καλαμπάκας	
α. Δημοτική Ενότητα Δεσκάτης	5.066	γ. Δημοτική Ενότητα Καστανιάς	1.619
β. Δημοτική Ενότητα Χασίων	2.317	δ. Δημοτική Ενότητα Κλεινόβου	2.301
ΕΙ. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	129.541	ε. Δημοτική Ενότητα Μαλακασσιού	2.090
1.ΔΗΜΟΣ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	55.968	ζ. Δημοτική Ενότητα Τυμφαίων	2.103
α. Δημοτική Ενότητα Ιτάμου	4.726	η. Δημοτική Ενότητα Χασίων	3.736
β. Δημοτική Ενότητα Καλλιφώνου	3.246	2. ΔΗΜΟΣ ΠΥΛΗΣ	20.019
γ. Δημοτική Ενότητα Κάμπου	5.469	α. Δημοτική Ενότητα Αιθίων	2.744
δ. Δημοτική Ενότητα Καρδίτσας	37.768	β. Δημοτική Ενότητα Γόμφων	5.154
ε. Δημοτική Ενότητα Μητρόπολης	4.759	γ. Δημοτική Ενότητα Πιαλείων	3.813
2.ΔΗΜΟΣ ΜΟΥΖΑΚΙΟΥ	17.910	δ. Δημοτική Ενότητα Πινδέων	2.136
α. Δημοτική Ενότητα Ιθώμης	3.140	ε. Δημοτική Ενότητα Πύλης	4.492
β. Δημοτική Ενότητα Μουζακίου	10.148	3.ΔΗΜΟΣ ΤΡΙΚΚΑΙΩΝ	74.592
γ. Δημοτική Ενότητα Παμισού	4.622	α. Δημοτική Ενότητα Εστιαιωτίδας	2.976

3.ΔΗΜΟΣ ΠΑΛΑΜΑ	19.144	β. Δημοτική Ενότητα Καλλίδενδρου	2.456
α. Δημοτική Ενότητα Παλαμά	10.050	γ. Δημοτική Ενότητα Κοζιάκα	2.894
β. Δημοτική Ενότητα Σελλάνων	5.051	δ. Δημοτική Ενότητα Μεγ. Καλυβιών	3.169
γ. Δημοτική Ενότητα Φύλλου	4.043	ε. Δημοτική Ενότητα Παληοκάστρου	3.461
4.ΔΗΜΟΣ ΣΟΦΑΔΩΝ	23.043	ζ. Δημοτική Ενότητα Παραληθαίων	3.689
α. Δημοτική Ενότητα Άρνης	3.299	η. Δημοτική Ενότητα Τρικκαίων	51.862
β. Δημοτική Ενότητα Μενελαΐδας	2.701	θ. Δημοτική Ενότητα Φαλωρείας	4.085
γ. Δημοτική Ενότητα Ρεντίνης	756	4.ΔΗΜΟΣ ΦΑΡΚΑΔΟΝΑΣ	15.881
δ. Δημοτική Ενότητα Σοφάδων	12.215	α. Δημοτική Ενότητα Οιχαλίας	5.783
ε. Δημοτική Ενότητα Ταμασιού	4.072	β. Δημοτική Ενότητα Πελλιναίων	3.005
Ε2. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΛΑΡΙΣΑΣ	279.305	γ. Δημοτική Ενότητα Φαρκαδόνας	7.093
1.ΔΗΜΟΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ	37.264	Θ4. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	178.771
α. Δημοτική Ενότητα	2.236	1.ΔΗΜΟΣ	14.793

Βερδικούσης		ΔΟΜΟΚΟΥ	
2. ΔΗΜΟΣ ΦΑΡΣΑΛΩΝ	23.531	α. Δημοτική Ενότητα Δομοκού	5.692
α. Δημοτική Ενότητα Ενιπέα	4.526	β. Δημοτική Ενότητα Θεσσαλιώτιδος	4.705
β. Δημοτική Ενότητα Ναρθακίου	1.781	γ. Δημοτική Ενότητα Ξυνιάδος	4.396
Ε5. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΡΙΚΑΛΩΝ	138.047	2.ΔΗΜΟΣ ΜΑΚΡΑΚΩΜΗΣ	21.570
1.ΔΗΜΟΣ ΚΑΛΑΜΠΑΚΑΣ	27.555	α. Δημοτική Ενότητα Μακρακώμης	7.132

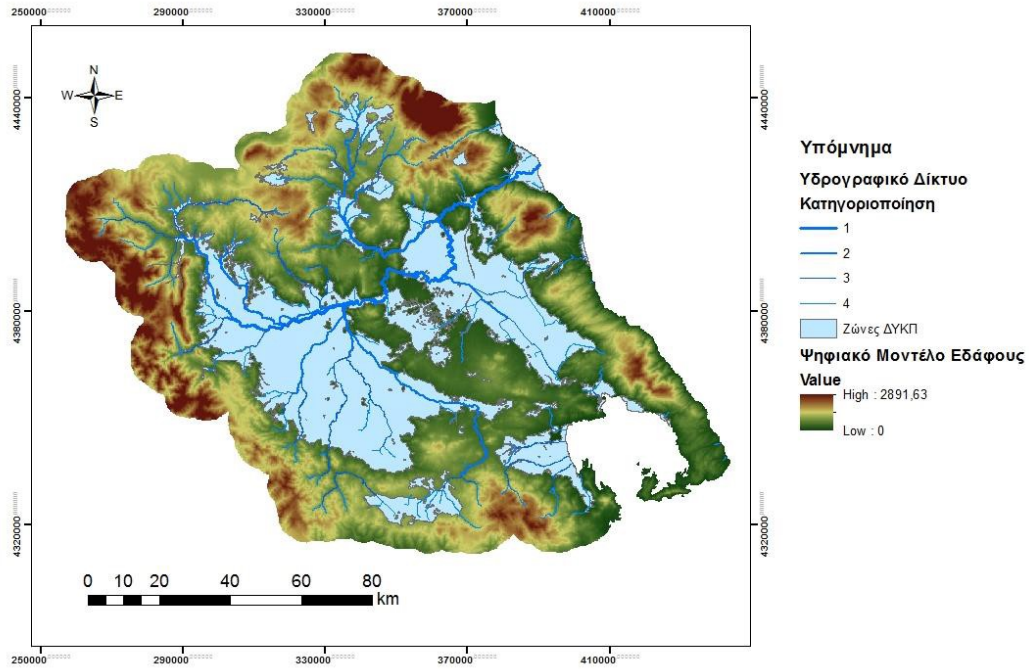
2.3.2. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στη Δυτική Λεκάνη του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, στα όρια των Νομών Τρικάλων και Λάρισας. Αφορά το πλέον κατάντη τμήμα του ποταμού Πηνειού στην Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας. Ξεκινάει στα ανάντη από τη θέση Αλή Εφέντη έως τη θέση Αμυγδαλιά στα κατάντη. Πρόκειται για ένα μήκος ποταμού της τάξης των 40km, ο οποίος διέρχεται από την πεδιάδα της Θεσσαλίας με πολύ μικρές κλίσεις ιδιαίτερα στα πρώτα χιλιόμετρα. Στο μήκος αυτό του ποταμού κατάντη της συμβολής με τον ποταμό Ενιπέα (πλησίον της θέσης Αλή Εφέντη) δεν εκβάλλει άλλος παραπόταμος στον Πηνειό ποταμό. Στην περιοχή αυτή έχουν κατασκευαστεί κάποια αναχώματα για την προστασία της πεδιάδας από επικείμενες πλημμύρες. Κύρια χρήση της περιοχής η καλλιέργεια της γης.



Σχήμα 2.8: Περιοχή μελέτης (www.anavasi.gr).

Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα Ζώνης Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, σύμφωνα με την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας που συντάχθηκε στα πλαίσια εφαρμογής της Οδηγίας για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (2007/60/ΕΚ) και πρόκειται για το πλέον κατάντη θέση της Δυτικής ζώνης.



Σχήμα 2.9: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της αβεβαιότητας στη χαρτογράφηση των πλημμυρών

3.1. Βασικές πηγές αβεβαιότητας στη χαρτογράφηση των πλημμυρών.

3.1.1. Εισαγωγή

Η πρόβλεψη των πλημμυρών και η εκτίμηση των επιπτώσεων τους αποτελεί ένα επιστημονικό θέμα ύψιστης σημασίας, που εκτείνεται πάνω από τις μετεωρολογικές, υδρολογικές, υδραυλικές, περιβαλλοντικές επιστήμες και των συναφών τους τεχνολογιών. Προκαταρκτικές προσπάθειες για τον προσδιορισμό των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τις πλημμύρες προέρχονται ήδη από τους αρχαίους πολιτισμούς (Koutsoyiannis et al., 2007). Η οδηγία της Ε.Ε.2007/60 σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας απαιτεί τη θέσπιση χαρτών επικινδυνότητας και κινδύνων πλημμύρας από τα Κράτη μέλη της που προσδιορίζουν τις πιθανές δυσμενείς συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και των οικονομικών δραστηριοτήτων. Αυτά θα πρέπει να συνοδεύονται από μέτρα για την διαχείριση των πλημμυρών και την άμβλυνση της συχνότητας των πιθανών ζημιών από αυτές.

Βέβαια, τις τελευταίες δεκατίες λόγω της εμφάνισης ακραίων πλημμυρών, πρωταρχικός στόχος στην Ευρώπη αποτελεί ο βέλτιστος σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων (Tsakiris et al. 2009). Ωστόσο, η μεγάλη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των πλημμυρών που προκύπτει από τα υδρολογικά και υδραυλικά δεδομένα εισόδου (Efstratiadis et al., 2014) στους αλγόριθμους διόδευσης πλημμύρας (Dimitriadis et al., 2016), έχει μετατοπίσει το πρωταρχικό στόχο στη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και όχι στην προστασία όπως περιγράφεται στην οδηγία 2007/60 της ΕΕ (Mostert και Junier, 2009). Η εφαρμογή της Οδηγίας επισημαίνει την ανάγκη για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της πλημμύρας, προσφέροντας επίσης την ευκαιρία, μέσα από τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν και τον εντοπισμό των δυσκολιών, να προταθούν πιθανές βελτιώσεις.

Μέσα από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση της πλημμύρας κυρίως για τις ζώνες υψηλού κινδύνου πλημμύρας, παρουσιάζονται πολλά πρακτικά ζητήματα που αφορούν κυρίως:

1. τη συνέπεια και την ακρίβεια των απαιτούμενων στοιχείων εισόδου της τοπογραφίας, όπως το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), οι μετρήσεις διατομών του ποταμού και χάρτες της χρήσης γης.
2. τα στοιχεία αβεβαιότητας που σχετίζονται με το υδρολογικό πλαίσιο SCS-CN και άλλες υδρολογικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος εισόδου(πλημμυρογράφημα).
3. το θεωρητικό πλαίσιο των υδραυλικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η διάσταση των διανυσμάτων των υπολογιζόμενων υδραυλικών χαρακτηριστικών (μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή ψευδοδισδιάστατα), το είδος της λύσης του προγράμματος (ρητή ή άρρητη), οι οριακές συνθήκες και το είδος της διακριτοποίησης (βάσει πλέγματος ή διατομής).
4. τα στοιχεία αβεβαιότητας που σχετίζονται με την μοντελοποίηση πλημμύρας, όπως το πλημμυρογράφημα εισόδου (Di Baldassarre και Montanari, 2009) και ο συντελεστής τραχύτητας του ποταμού και πλημμυρικών πεδίων (Dimitriadis et al., 2016).
5. η αναγκαιότητα της επικύρωσης δεδομένων, όπως η απορροή κατάντη, η πλημμυρισμένη περιοχή και οι μετρήσεις ταχύτητας, έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου, αλλά για να δικαιολογήσουμε επίσης κάθε εύλογη υποθήση που υιοθετήθηκε και σχετίζεται με τις παραμέτρους εισόδου και μεθόδους.

3.1.2. Τοπογραφικά δεδομένα εισόδου

Τα τοπογραφικά δεδομένα αποτελούν ένα από τα προκαταρκτικά στοιχεία εισόδου στην υδρολογική και υδραυλική μελέτη μιας λεκάνης απορροής ποταμού. Περιγράφουν τη μορφολογία της περιοχής μελέτης και, ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη προσομοίωση αλλά και οι τελικοί χάρτες, εξαρτώνται ιδιαίτερα από την ακρίβεια τους. Συνήθως, για τις πλημμυρικές περιοχές χρησιμοποιείται ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, κανονικοποιημένης μορφής (DEM) με μεγάλη ανάλυση, ενώ για την περιοχή κατά μήκος και στις όχθες του ποταμού απαιτείται συνήθως μια πιο λεπτομερής έρευνα.

Να σημειωθεί ότι η ανάλυση του Ψ.Μ.Ε. πρέπει να είναι πιο ακριβής κοντά στην ακτογραμμή όπου υπάρχει δυνητικά υψηλότερος κίνδυνος πλημμυρών. Ιδιαίτερα, σε αυτές τις περιοχές χρησιμοποιείται ένα μικρότερο μέγεθος ανάλυσης, δηλαδή, $1 \times 1 \text{m}^2$.

Προκειμένου να βελτιωθεί η αβεβαιότητα του Ψ.Μ.Ε., θα πρέπει να πραγματοποιούνται τοπογραφικές μετρήσεις στο πεδίο, ιδιαίτερα κοντά στο ποτάμιο δίκτυο (διατομές ποταμού), σε περιοχές με ιδιαίτερη περιβαλλοντική σημασία και ενδιαφέρον, καθώς και κοντά σε τεχνικά έργα, όπως γέφυρες, αναχώματα, φράγματα κλπ, τα οποία έχουν μεγάλη σημασία για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. θα ήταν να χρησιμοποιηθούν δορυφορικά δεδομένα που προέρχονται από δορυφορικές εικόνες ή από ιπτάμενες μηχανές «drone» που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη καταγραφή της τοπογραφίας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι αρκετά καινοτόμος και υπό μελέτη, και δεν υπάρχουν ακόμη αξιόπιστες καταγραφές στην Ελλάδα. Ως εκ τούτου, το εφαρμοσμένο Ψ.Μ.Ε. στην υδρολογική και υδραυλική ανάλυση είναι συνήθως επεξεργασμένο και βασίζεται σε ορισμένες μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιούνται από Τοπογράφους Μηχανικούς. Στη συνέχεια, η ανάλυση του μπορεί να αλλάξει μέγεθος ανάλογα με τις ανάγκες του μοντέλου διόδευσης των πλημμυρών που επιλέγεται. Αυτή η διαδικασία έχει ως στόχο να διατηρήσει τόσο τη σταθερότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου όσο και την επαρκή χωρική ανάλυση για την βέλτιστη προσομοίωση της υδρολογικής διαδικασίας και της χωροχρονικής εξέλιξης του χάρτη πλημμύρας.

3.1.3. Υδρολογικά μοντέλα

Για την κατάρτιση του υδρογραφήματος εισόδου, ακολουθούμε τη πρότυπη υδρολογική μέθοδο εκτίμησης των όμβριων καμπυλών μέσω της κατανομής Γενική Ακραίων Τιμών (η μεθοδολογία περιγράφεται στο Κουτσογιάννης κ.α. 1998):

$$i(d) = \frac{a(T)}{(d + 0.076)^{0.686}} \quad (1)$$

όπου i είναι η ένταση της βροχόπτωσης (mm / hr), d είναι η διάρκεια των βροχοπτώσεων (hr), T η περίοδος επαναφοράς (έτη) και a είναι συνάρτηση του T , συνήθως με τη μορφή $a_1(T^{a_2} - a_3)$, με a_1 , a_2 και a_3 οι παράμετροι που καθορίζονται από τα ιστορικά δεδομένα βροχοπτώσεων της περιοχής ενδιαφέροντος και τον ισουετή χάρτη (χωρική κατανομή της βροχόπτωσης).

Επιπλέον, εκτιμούμε το υετογράφημα για τις περιόδους επαναφοράς των 50 και 100 ετών (το καλύτερο και το μετριοπαθές σενάριο) και το χειρότερο προφίλ για τα 1000 χρόνια της περιόδου επαναφοράς (χειρότερη περίπτωση). Αυτά τα τρία σενάρια προωθούνται για περαιτέρω επεξεργασία και την αξιολόγηση του υδρογραφήματος ροής εισόδου από ένα μοντέλο βροχής-απορροής, όπως το SCS-CN που υλοποιείται μέσω του HEC-HMS (www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/).

Η περίοδος επαναφοράς αποτελεί ένα κοινωνικό – οικονομικό περιορισμό που καθορίζει τον αποδεκτό κίνδυνο r , κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του υπό μελέτη συστήματος. Η συγκεκριμένη διαδικασία μοντελοποίησης είναι ντετερμινιστική, οπότε για μια δεδομένη περίοδο επαναφοράς των βροχοπτώσεων επιτυγχάνεται μια ενιαία τιμή απόκρισης. Η στην παραπάνω υπόθεση, έγκειται στο ότι η πραγματική στατιστική συμπεριφορά της ποσότητας κατάκλυσης πλημμύρας, αντιπροσωπεύεται μόνο εν μέρει μέσω της περιόδου επαναφοράς των βροχοπτώσεων.

Αναλυτικότερα, τα θέματα αβεβαιότητας στη μοντελοποίηση της καταιγίδας σχεδιασμού είναι τα ακόλουθα (Efstratiadis et al., 2013):

- Η καταιγίδα σχεδιασμού για μια συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς ορίζεται από τη διάρκεια D , το συνολικό ύψος βροχόπτωσης h , το χρόνο διεξαγωγής και τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, μεγέθη τα οποία είναι αβέβαια.
- Η διάρκεια της καταιγίδας D εξαρτάται από το χρόνο συγκέντρωσης T_c , που είναι μια εξαιρετικά αβέβαιη ποσότητα, όχι μόνο επειδή οι διαφορετικές προσεγγίσεις παρέχουν σημαντικά διαφορετικές εκτιμήσεις αλλά και επειδή ο χρόνος συγκέντρωσης είναι πολύ στενά συνδεδεμένος με την ποσότητα των πλημμυρών αυτή καθεαυτή (Grimaldi et al., 2012).
- Το ύψος βροχόπτωσης h (d , T) που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς T και διάρκειας d είναι αβέβαιο, αφού εκτιμάται μέσω στατιστικών μοντέλων, των οποίων οι παράμετροι έχουν προκύψει από συνήθως μικρό ιστορικό δείγμα.
- Η κατασκευή ενός υετογραφήματος σχεδιασμού, δηλαδή η εκτίμηση της χρονικής κατανομής των μερικών υψών βροχόπτωσης, γίνεται βάσει ενός ντετερμινιστικού μοντέλου, που αποτυγχάνει να αντιπροσωπεύσει την πραγματική στατιστική συμπεριφορά των βροχοπτώσεων, παρέχοντας συνεπώς, μη ρεαλιστικές δομές αυτοσυσχέτισης.

- Η χωρική κατανομή της εκδήλωσης της βροχόπτωσης πάνω από τη περιοχή της λεκάνης απορροής είναι αβέβαιη, δεδομένου ότι εξαρτάται από διάφορους πολύπλοκους παράγοντες όπως η μορφολογία του εδάφους αλλά και οι καιρικές συνθήκες, οι οποίες δεν θεωρούνται με τυπικές προσεγγίσεις αλλά λαμβάνουν μόνο υπόψιν το μέγεθος της λεκάνης και τη διάρκεια της βροχόπτωσης.

3.1.4. Υδραυλικά μοντέλα πλημμυρών

Μετά την κατασκευή του Ψ.Μ.Ε και του υδρογράφηματος εισόδου, επιλέγουμε τον τύπο του υδραυλικού μοντέλου για τη διόδευση της πλημμύρας, δηλαδή, μονοδιάστατο (1D), δύο διαστάσεων (2D) ή οιονεί-2D, το ψευδοδισδιάστατο. Σε περιπτώσεις όπου η πλευρική ώθηση της ροής δεν είναι πλέον αμελητέα σε σύγκριση με τη διαμήκη, θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα 2D μοντέλο. Ωστόσο, δεδομένου ότι 2D υδραυλικά μοντέλα έχουν συνήθως ένα μεγαλύτερο αριθμητικό βάρος και, κατά συνέπεια, είναι πιο χρονοβόρα, τα ψευδοδισδιάστατα μοντέλα συχνά προτιμώνται (Bates και Roo, 2000; Papaioannou et al., 2016). Μετά την επιλογή του τύπου του μοντέλου, το είδος της διακριτοποίησης, η φύση του αριθμητικού συστήματος, οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και οι διάφορες παράμετροι του θα πρέπει να καθοριστούν ανάλογα με τις πληροφορίες που έχουμε για τη περιοχή ενδιαφέροντος και για τη συμπεριφορά του επιλεγμένου μοντέλου. Όλες οι παραπάνω επιλογές θα έχουν επίδραση στα δεδομένα πλημμύρας εξόδου, και ως εκ τούτου, στη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

3.1.5. Παράμετροι του ποταμού

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των προαναφερθέντων ψευδοδισδιάστατων μοντέλων είναι ότι επιτρέπουν τη χρήση της Monte-Carlo ανάλυσης, η οποία είναι αναγκαία, όταν τα παρατηρούμενα ή τα μετρηθέντα δεδομένα είναι περιορισμένα ή όταν οι ζητούμενες παράμετροι, οι αλγόριθμοι του μοντέλου και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου αναμένεται να είναι άγνωστες ή υψηλής αβεβαιότητας. Ένα ενδιαφέρον αλλά και αναπόφευκτο χαρακτηριστικό όλων των μοντέλων είναι ότι είναι επιρρεπή σε λάθη λόγω διακριτοποίησης και ως εκ τούτου, ακόμη και αν η τοπογραφία και όλα τα υδρολογικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά είναι καλά ορισμένα, ακόμα θα υπάρχει ένα κλάσμα της αβεβαιότητας που σχετίζεται με το επιλεγμένο μοντέλο. Μια απεικόνιση αυτού του χαρακτηριστικού που βασίζεται σε πειράματα αναφοράς (benchmark), όπου δηλαδή, η γεωμετρία και όλες οι παράμετροι είναι γνωστές, περιγράφονται στην ανάλυση των Dimitriadis et al., (2016). Δεδομένου ότι τα στοιχεία αβεβαιότητας που σχετίζονται με την

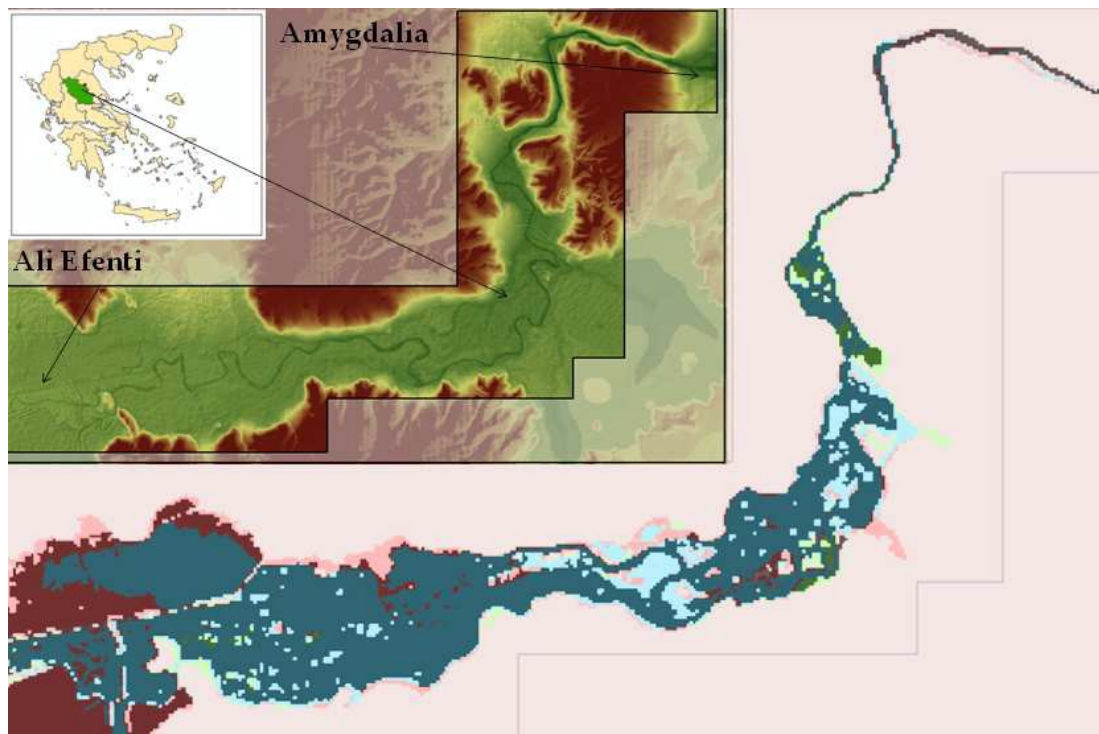
πλημμύρα είναι πολλά, ακόμη και μια ευρεία ανάλυση Monte-Carlo θα μπορούσε να είναι ανέφικτη από την άποψη του κόστους του χρόνου. Συνεπώς, μια απόφαση θα πρέπει να ληφθεί για την εκτίμηση και την ευαισθησία ανάλυσης των παραμέτρων με το μεγαλύτερο βάρος αβεβαιότητας στα δεδομένα εξόδου του μοντέλου. Τέτοιες παράμετροι (από την υψηλότερη στη χαμηλότερη τυποποιημένη αβεβαιότητα) είναι ο αλγόριθμος του μοντέλου, ο συντελεστής τραχύτητας του ποταμού και των πλημμυρικών πεδίων (που λαμβάνεται από τη χρήση γης σύμφωνα με τις οδηγίες Corine, 2000, <http://geodata.gov.gr/en/dataset/corine-2000>), το πλημμυρογράφημα εισόδου, η διαμήκης και εγκάρσια κλίση του ποταμού και πλημμυρικών πεδίων και η ανάλυση του μοντέλου (Dimitriadis et al., 2016). Να σημειωθεί ότι το προαναφερθέν αποτέλεσμα βασίζεται σε συγκεκριμένα πειράματα αναφοράς. Όπως έχει προκύψει από προηγούμενες μελέτες, οι παράμετροι του ποταμού, δηλαδή, ο συντελεστής τραχύτητας και η γεωμετρία του, φαίνεται να έχουν μεγάλη επίδραση στη διόδευση της πλημμύρας και μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ κοστοβόρα ή ακόμη και δύσκολη η μέτρησή τους στο πεδίο, ιδιαίτερα σε τραχιά τοπογραφία και κατά τη διάρκεια σοβαρών πλημμυρών. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη διενέργεια της ανάλυσης ευαισθησίας, όπως στην περίπτωση του πλημμυρογραφήματος εισόδου.

3.1.6. Επικύρωση δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων προς επικύρωση αποτελεί ένα σημαντικό έργο στη μοντελοποίηση των πλημμυρών, δεδομένου ότι η περιορισμένη επικύρωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε αδικαιολόγητες ενέργειες όπως την «υπερβολική» προσομοίωση του μοντέλου και την άσκοπη χρήση υποθέσεων στη χαρτογράφηση των πλημμυρών. Τα επικυρωμένα δεδομένα θα πρέπει να περιλαμβάνουν πλημμυρογραφήματα ροής που ξεκίνησαν στο συγκεκριμένο πλημμυρικό επεισόδιο (π.χ., που λαμβάνονται από τους σταθμούς μέτρησης), πλημμυρικοί χάρτες που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πλημμυρικό επεισόδιο (π.χ., χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες), καθώς και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά του επεισοδίου, όπως οι μετρήσεις ταχύτητας (π.χ., μέσω της ευρείας εγκατάστασης συσκευών μέτρησης δικτύου του ποταμού) και το συντελεστή τραχύτητας (π.χ., από γεωλογικές έρευνες). Ωστόσο, δεδομένου ότι η καταγραφή των παραπάνω στο πεδίο μπορεί να είναι μερικές φορές ανέφικτη (ή ακόμη και αδύνατη) κατά τη διάρκεια ακραίων (ή ακόμα και μέτριων) πλημμυρών, ειδικά σε τραχιά τοπογραφία, κάτι που υφίσταται και στην Ελλάδα, η εφαρμογή των αναλύσεων ευαισθησίας (Horritt και Bates, 2002, Dimitriadis et al, 2016) μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας.

3.2. Μια προτεινόμενη πρακτική: Λεκάνη απορροής Πηνειού

Σε αυτή την εφαρμογή, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση Monte-Carlo για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας ορισμένων πρόσθετων χαρακτηριστικών που συχνά συναντήθηκαν σε λεκάνες που χαρακτηρίζονται από περιορισμένες ή ανεπαρκείς πληροφορίες (Efstratiadis et al., 2014), όπως το πλάτος του ποταμού, το βάθος και ο συντελεστής τραχύτητας. Εφαρμόζουμε τη σταθερή ροή των $750 \text{ m}^3/\text{s}$, όπως προσδιορίζεται από τη μεταπτυχιακή εργασία του Α.Οικονόμου (2013) ως η βέλτιστη εφαρμογή μιας παρατηρούμενης ακραίας πλημμύρας που συνέβει την 28/1/2003. Έτσι, δημιουργήσαμε 50 συνθετικές χρονοσειρές για κάθε παράμετρο του ποταμού που ακολουθούν μια λογαριθμοκανονική κατανομή (Domeneghetti et al., 2013), με μέση τιμή και τυπική απόκλιση για το πλάτος και το βάθος του ποταμού, όπως υποδεικνύεται από το Ψ.Μ.Ε., διατηρώντας επίσης τη συσχέτιση με τα αρχικά δεδομένα, και για τον συντελεστή τραχύτητας με εύρη τιμών 0.025–0.03, όπως υποδεικνύεται από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να βελτιωθεί με μια ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του ποταμού. Ιδιαίτερα, η παρατηρούμενη αλλά όχι-προσομοιούμενη περιοχή (καφέ ζώνη), όπως εκτιμάται από το αρχικό σενάριο σταθερής ροής μπορεί να εξηγηθεί με κάποιο τρόπο από την αβεβαιότητα των συστατικών του ποταμού.



Σχήμα 3.1: Τοποθεσία και τοπογραφία της περιοχής μελέτης. Η καλύτερη προσομοίωση της πλημμύρας εκτιμάται από 5X5 Ψ.Μ.Ε. και σταθερό $n=0.03$. Γαλάζια ζώνη: η παρατηρούμενη και προσομοιούμενη περιοχή. Πράσινη ζώνη: η μη παρατηρούμενη αλλά προσομοιούμενη περιοχή. Ροζ ζώνη: η παρατηρούμενη και μη – προσομοιούμενη περιοχή. Καφέ ζώνη: το 50% του τεταρτημορίου του βάθους νερού από την ανάλυση ευαισθησίας. Μπλε ζώνη: Η συγχώνευση της γαλάζιας και καφέ ζώνης.

Μερικές από τις πιο αβέβαιες παραμέτρους μοντελοποίησης πλημμύρας που συχνά παραμελούνται είναι η γεωμετρία του ποταμού και ο συντελεστής τραχύτητας. Ενώ το πρώτο συνήθως λαμβάνεται από ένα Ψ.Μ.Ε. με μεγάλη ανάλυση, το τελευταίο, στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται ως σταθερό για το όλο το μήκος του ποταμού. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δείχνουμε πώς η αβεβαιότητα από αυτά πηγές μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη σε περιπτώσεις περιορισμένων μετρήσεων ή ανεπαρκών πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία του ποταμού και το υλικό της επιφάνειας του. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη τεχνική πρακτική θα μπορούσε να είναι πάντα εκτελούν αναλύσεις ευαισθησίας για όλες τις παραμέτρους που περιλαμβάνονται στο πλαίσιο των κινδύνων πλημμύρας, αλλά ειδικά για αυτούς που σχετίζονται με το δίκτυο ποταμών (όπως το πλάτος, το βάθος και την τραχύτητα).

3.3. Βιβλιογραφικά στοιχεία κατανομών των παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας που εξάγονται από τα υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης υπόκεινται σε πολλές αβεβαιότητες, οι οποίες συχνά αγνοούνται ή έχουν παρερμηνευθεί. Πιο απλά, η αβεβαιότητα που αφορά την διόδευση της πλημμύρας περιέχεται σε πάρα πολλά στοιχεία. Ακόμη και μία ευρεία ανάλυση (π.χ. Monte Carlo) είναι ανέφικτη και χρονοβόρα. Συνεπώς, πρέπει να οριστούν οι παράμετροι που περιέχουν το μεγαλύτερο βάρος αβεβαιότητας. Αυτοί είναι το μοντέλο του αλγόριθμου, ο συντελεστής τραχύτητας Manning του ποταμού αλλά και του πλημμυρικού πεδίου, το υδρογράφημα εισόδου καθώς και οι κλίσεις, εγκάρσιες ή διαμήκεις (Dimitriadis et al., 2016). Από προηγούμενες αναλύσεις, προκύπτει ότι οι παράμετροι του ποταμού (γεωμετρία, υλικό ποταμού) έχουν μεγάλη επίδραση στη διόδευση της πλημμύρας και είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα η μέτρηση ή ο προσδιορισμός τους στο πεδίο.

Για τη παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρήσαμε ότι η γεωμετρία του καναλιού περικλείει τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Δηλαδή, το πλάτος του καναλιού στη συγκεκριμένη θέση, ο συντελεστής τραχύτητας και το υψόμετρο του πυθμένα είναι οι παράμετροι οι οποίοι εξετάστηκαν. Βέβαια για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ποταμού υπήρχε έλλειψη δεδομένων. Γι'αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε μια ευρεία ανασκόπηση στη διεθνή βιβλιογραφία ούτως ώστε να προσδιοριστεί η κατανομή η οποία προσεγγίζει καλύτερα το αντίστοιχο μέγεθος.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται τα εξής για κάθε μία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, αλλά και για την παροχή του ποταμού στη περίπτωση έλλειψης δεδομένων.

Συντελεστής τραχύτητας Manning

Όπως έχει προαναφερθεί, η εκτίμηση του κατάλληλου συντελεστή τραχύτητας συνδέεται με ένα υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας. Στη μεθοδολογία που περιγράφεται η πρώτη απόπειρα για χαρτογράφηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων με δεδομένα μετά το συμβάν (Baldassarre et al. 2016), σημειώνεται χαρακτηριστικά ότι ο συντελεστής τραχύτητας του καναλιού, αλλά και των πλημμυρικών πεδίων, παραμένει ομοιόμορφος κατά μήκος του ποταμού με εύρη τιμών 0.005–0.3. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν συμβαίνει στη πραγματικότητα. Οι τυπικές του τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.025 και 0.035 για έδαφος με καλές συνθήκες. Συγκεκριμένα, ερευνητές στο Hydraulic Engineering Center (1986)

παρατήρησαν ότι ο συντελεστής τραχύτητας (n) ακολουθεί μια λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή με συντελεστή μεταβλητότητας (cov) που κυμαίνεται από 20%-35%, με μία μέση τιμή 28%, όπως περιγράφεται στο αμερικάνικο ερευνητικό πρόγραμμα για το κατάλληλο σχεδιασμό γέφυρων-αυτοκινητοδρόμων υπό ακραίων φαινομένων.(Design of Highway Bridges for Extreme Events, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM).

Πλάτος καναλιού

Ομοίως και για το πλάτος του καναλιού, σημειώνεται ότι ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή με εύρη αρκετά μεγάλα αλλά πιθανά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Baldassarre et al.2016). Όμως, σε μια σειρά ιστορικών παρατηρήσεων στο σύστημα του ποταμού Πάδου, πλησίον των Γαλλο-ιταλικών συνόρων, διαπιστώθηκε ότι ακολουθεί λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή (Domeneghetti et al.2013), το οποίο αντιπροσωπεύει καλύτερα τη πραγματικότητα.

Υψόμετρο από το πυθμένα – βάθος καναλιού

Όσα αναφέρθηκαν για το πλάτος του καναλιού, ισχύουν και για το υψόμετρο από το πυθμένα (βάθος καναλιού). Είναι σημαντικό, βέβαια, να επισημανθεί ότι από τα αποτελέσματα δοκιμών-τεστ, τα τυχόν σφάλματα στο βάθος κανάλιου είχαν μια μικρή επίδραση επί των προσομοιωμένων βαθών του νερού (Baldassarre et al.2016).

Παροχή - Απορροή ποταμού

Διαφορετικοί ερευνητές και οργανισμοί έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικούς τύπους κατανομής πιθανότητας για να προσδιορίσουν το ποσοστό απορροής Q . Οι πιο κοινώς χρησιμοποιούμενες κατανομές είναι οι Extreme Type 1, η Lognormal και η LogPearson. Μελετώντας διάφορα πιθανοτικά διαγράμματα, το μέγιστο ετήσιο ποσοστό απορροής για διαφορετικά ποτάμια στην Αμερική, βρέθηκε ότι ακολουθεί lognormal κατανομή, όπως περιγράφεται επίσης στο αμερικάνικο ερευνητικό πρόγραμμα για το κατάλληλο σχεδιασμό γέφυρων-αυτοκινητοδρόμων στη περίπτωση ακραίων φαινομένων (Design of Highway Bridges for Extreme Events, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM).

Η συγκεκριμένη θεώρηση για την κατανομή της παροχής του ποταμού, μπορεί να ενισχυθεί από την παρούσα διπλωματική εργασία. Πιο αναλυτικά, από την καταγραφή σκαναρισμένων δεδομένων για την χρονική περίοδο 11/12/1973 – 02/02/1979 και το σταθμό Αλή Εφέντη (ανάντη σταθμός), προέκυψε ότι προσομοιώνεται ικανοποιητικά από

την λογαριθμοκανονική κατανομή τριών παραμέτρων αλλά και από την logPearson, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Για την προσομοίωση της ιστορικής χρονοσειράς χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές συναρτήσεις κατανομής όπως παρουσιάζονται στο βιβλίο Στατιστική Υδρολογία (Κουτσογιάννης, 1997).

Λογαριθμική κατανομή

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας	$f_X(x) = \frac{1}{(x-c)\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-c)-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2}$
Συνάρτηση κατανομής	$F_X(x) = \int_c^x f_X(s)ds$
Τιμές μεταβλητής	$c < x < \infty$ (συνεχής)
Παράμετροι	c : παράμετρος θέσης μ_Y : παράμετρος κλίμακας $\sigma_Y > 0$: παράμετρος σχήματος
Μέση τιμή	$\mu_X = c + e^{\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}}$
Διασπορά	$\sigma_X^2 = e^{2\mu_Y + \sigma_Y^2} (e^{\sigma_Y^2} - 1)$
Τρίτη κεντρική ροπή	$\mu_X^{(3)} = e^{3\mu_Y + \frac{3\sigma_Y^2}{2}} (e^{3\sigma_Y^2} - 3e^{\sigma_Y^2} + 2)$
Συντελεστής ασυμμετρίας	$C_{s_X} = 3(e^{\sigma_Y^2} - 1)^{1/2} + (e^{\sigma_Y^2} - 1)^{3/2}$
Πιθανότερη τιμή	$x_p = c + e^{\mu_Y - \sigma_Y^2}$
Διάμεσος	$x_{0.5} = c + e^{\mu_Y}$

Σχήμα 5.1: Τοπολόγιο της λογαριθμοκανονικής κατανομής τριών παραμέτρων.

Και οι άλλες δύο παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$\mu_Y = \ln(s_X / \phi) - \sigma_Y^2 / 2 \quad c = \bar{x} - \frac{s_X}{\phi} \quad (2)$$

LogPearson κατανομή

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας	$f_X(x) = \frac{\lambda^\kappa}{x\Gamma(\kappa)} (\ln x - c)^{\kappa-1} e^{-\lambda(\ln x - c)}$
Συνάρτηση κατανομής	$F_X(x) = \int_e^x f_X(s) ds$
Τιμές μεταβλητής	$e^c < x < \infty$ (συνεχής)
Παράμετροι	c : παράμετρος κλίμακας $\lambda > 0$: παράμετρος σχήματος $\kappa > 0$: παράμετρος σχήματος
Μέση τιμή	$\mu_X = e^c \left(\frac{\lambda}{\lambda-1} \right)^\kappa$
Διασπορά	$\sigma_X^2 = e^{2c} \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda-2} \right)^\kappa - \left(\frac{\lambda}{\lambda-1} \right)^{2\kappa} \right]$
Ροπή περί την αρχή τάξης r	$m_X^{(r)} = e^{rc} \left(\frac{\lambda}{\lambda-r} \right)^\kappa$

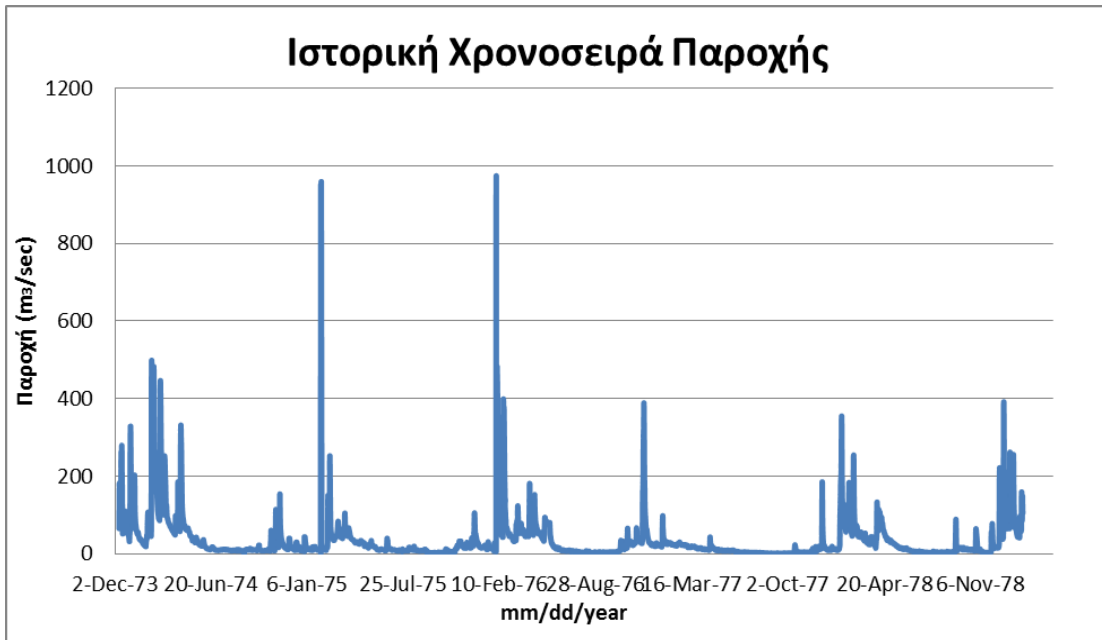
Σχήμα 5.2: Τυπολόγιο της LogPearson κατανομής

Και οι άλλοι τρεις παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

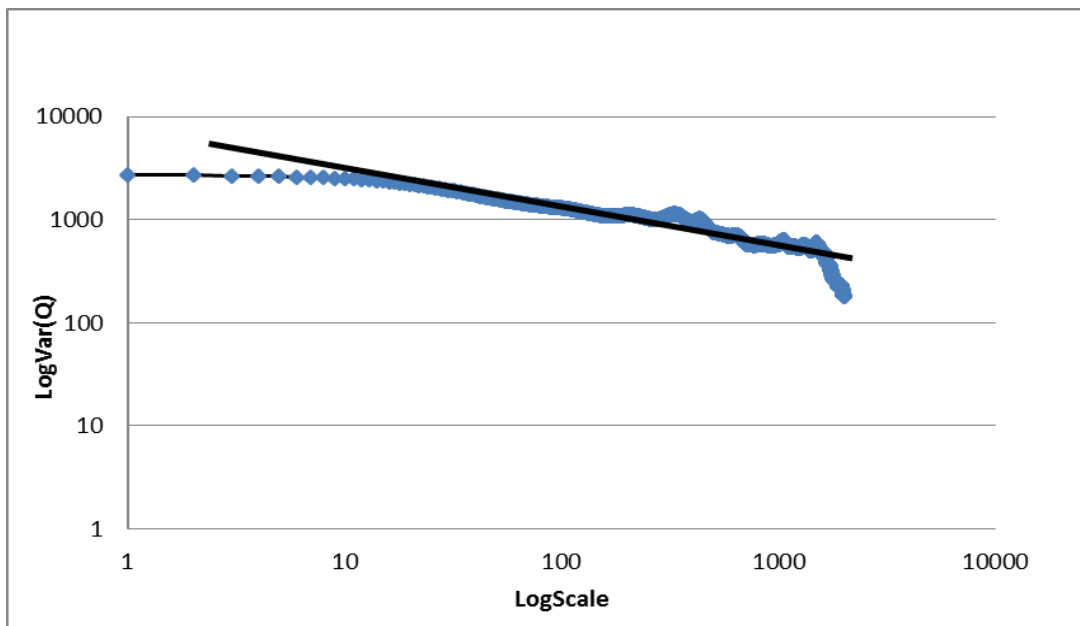
$$\kappa = \frac{4}{\hat{C}_{sY}^2} \quad \lambda = \frac{\sqrt{\kappa}}{s_Y} \quad c = \bar{y} - \frac{\kappa}{\lambda} \quad (3)$$

Τέλος, παρατίθεται και το κλιμακόγραμμα της χρονοσειράς των ιστορικών δεδομένων, ένα κοινό στοχαστικό εργαλείο απεικόνισης εμμοιικής συμπεριφοράς, όπου παρατηρείται να εμφανίζει μακροπρόθεσμη εμμοιή. Το κλιμακόγραμμα συσχετίζει την τυπική απόκλιση $\sigma^{(k)}$ με την κλίμακα. Η αρνητική κλίση που προκύπτει αν προστεθεί στη μονάδα δίνει το συντελεστή Hurst και είναι περίπου $H=0.83$. Δηλαδή μια μεγάλη τιμή έχει μεγάλη πιθανότητα να ακολουθείται από μια μεγάλη τιμή και το αντίστοιχο για μικρότερες τιμές, ακόμη και για μεγάλη χρονική υστέρηση. Όσο το H τείνει στο 1 τόσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τάση. Οι φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από χρονοσειρές αυτής της κατηγορίας είναι πιο δύσκολο να προβλεφθούν, γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Markonis and Koutsoyiannis, 2013). Να σημειωθεί ότι, τα δεδομένα της

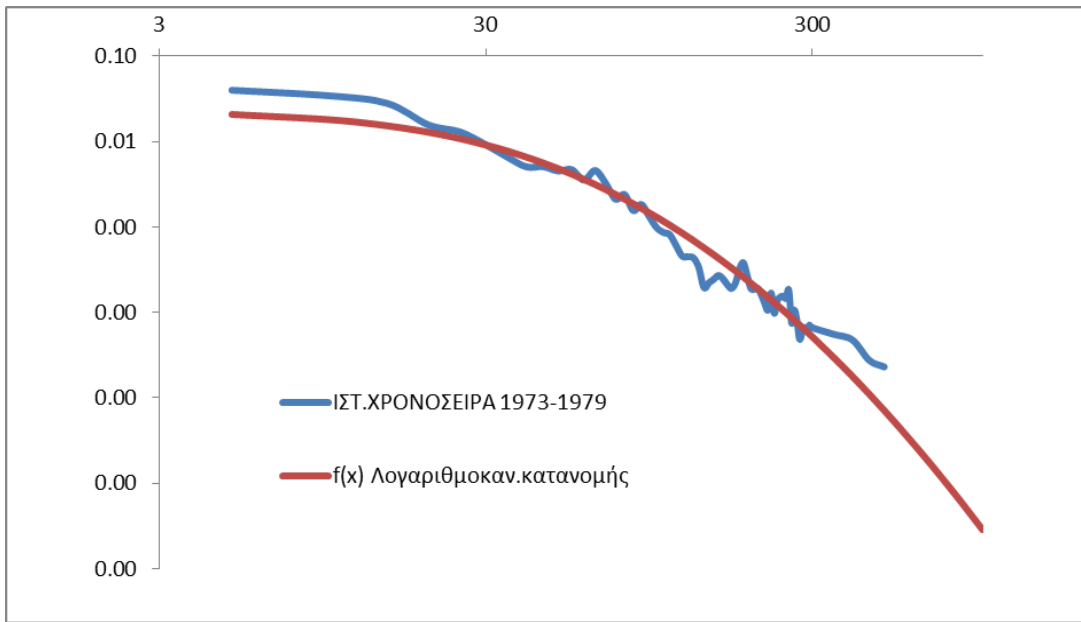
ιστορικής χρονοσειράς προέρχονται από το αρχείο: Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, Παράρτημα Δ2. (ΕΜΠ, Οκτώβριος 1988)



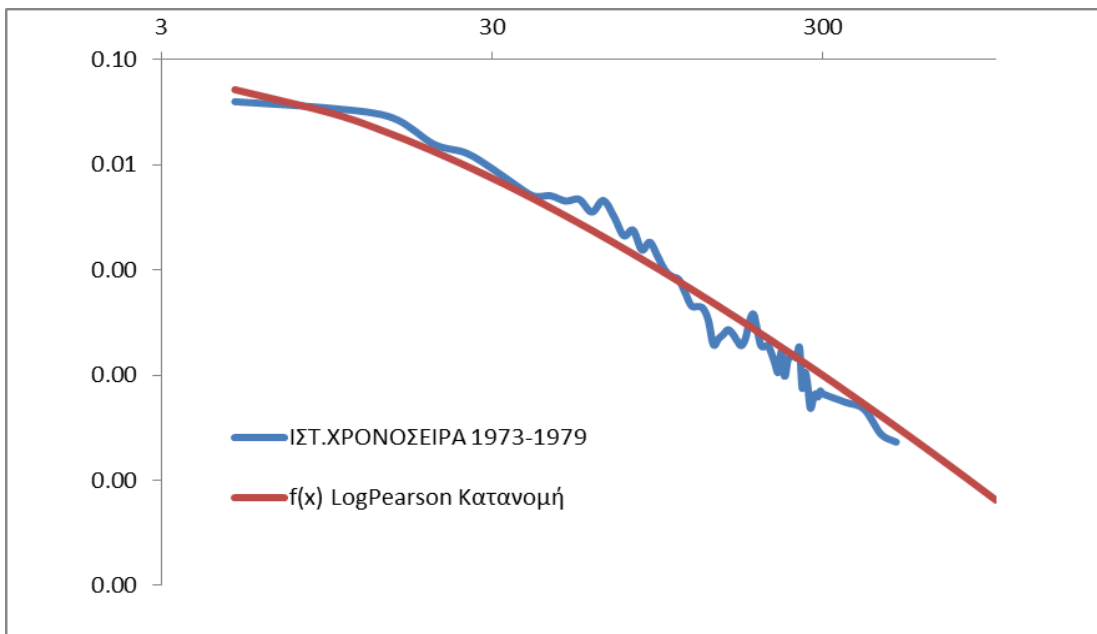
Διάγραμμα 3.1: Απεικόνιση χρονοσειράς ιστορικών δεδομένων παροχής στο σταθμό Αλή Εφέντη(1973-1979)



Διάγραμμα 3.2: Κλιμακόγραμμα ιστορικής χρονοσειράς. Η κλίση της ευθείας δίνει το συντελεστή Hurst (Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015).



Διάγραμμα 3.3: Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας ιστορικής χρονοσειράς - Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας



Διάγραμμα 3.4: Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας ιστορικής χρονοσειράς - Συνάρτηση $f(x)$ πυκνότητας πιθανότητας LogPearson κατανομής.

4. Περιγραφή Υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP

4.1. Περιγραφή Υδραυλικών Μοντέλων

Τα υδραυλικά μοντέλα ανάλογα με τη διάσταση των διανυσμάτων των υπολογιζόμενων υδραυλικών χαρακτηριστικών διακρίνονται γενικά σε μονοδιάστατης, διδιάστατης και τριδιάστατης ανάλυσης.

Τα μονοδιάστατα μοντέλα υδραυλικής προσομοίωσης διόδευσης πλημμύρας υπολογίζουν το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά περίπτωση για συνθήκες μόνιμης ομοιόμορφης, μόνιμης ανομοιόμορφης, ή μη μόνιμης – απότομα ή βαθμιαία - μεταβαλλόμενης ροής. Τα μοντέλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούν την εξίσωση Manning και η επίλυση του μοντέλου αφορά τον υπολογισμό του μέσου βάθους ροής και της μέσης ταχύτητας κάθετα στην διατομή του ποταμού, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή (ή σε τμήματα αυτής) με κοινό συντελεστή τραχύτητας. Με βάση την τοπογραφία της περιοχής παράγεται ο πλημμυρικός χάρτης, με πλημμυρικές περιοχές εκείνες με χαμηλότερο υψόμετρο από εκείνο της υπολογισμένης ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Τα διδιάστατα μοντέλα επιχειρούν την προσομοίωση των πλημμυρικών φαινομένων στις διαστάσεις μήκους και πλάτους. Γίνεται εκτίμηση του βάθους ροής σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης αλλά και ο υπολογισμός της κατανομής της ταχύτητας ροής στις δύο διαστάσεις, κατά την ροή του ποταμού και εγκάρσια αυτού.

Τα τριδιάστατα μοντέλα, χρησιμοποιούνται σε πιο σύνθετες υδραυλικές εφαρμογές, όπως σε περιπτώσεις όπου η κατακόρυφη ταχύτητα είναι σημαντική –αναλύσεις υδραυλικών αλμάτων, σχεδιασμό υπερχειλιστών κ.α.. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιώντας σύνθετες υπολογιστικές σχέσεις επιτυγχάνοντας τον ακριβέστερο υπολογισμό της ροής.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων αποτελούν τα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα, τα οποία επιλύουν ξεχωριστά την μονοδιάστατη εξίσωση της ορμής στην κύρια διεύθυνση της ροής αλλά και στην διεύθυνση κάθετα σε αυτήν. Με αυτόν τον τρόπο συνδυάζουν τον σύντομο υπολογιστικό χρόνο των μοντέλων μονοδιάστατης ανάλυσης παρέχοντας επιπλέον πληροφορία στην δεύτερη διάσταση. Αυτού του είδους τα μοντέλα έχουν αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμα στην προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων (Horritt & Bates, 2002), διότι (α) οι περιοχές που πλημμυρίζουν είναι συνήθως πολλών km^2 , αυξάνοντας πολύ το

υπολογιστικό κόστος, (β) η ορμή της ροής στην κύρια διεύθυνσή της αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της αλληλεπίδρασης των δύο διευθύνσεων να έχει μικρή βαρύτητα στην τελική κατεύθυνση του πλημμυρικού κύματος παράλληλα όμως αυξάνοντας το υπολογιστικό κόστος.

4.1.1. Αιτιολόγηση επιλογής Υδραυλικού Μοντέλου LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP αποτελεί ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να προσομοιώνει την πλημμυρική κατάκλυση με ένα υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο σε σύνθετη τοπογραφία. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των διδιάστατων μοντέλων είναι ότι επιτρέπουν την χρήση Monte Carlo ανάλυσης (επεξεργασία μέχρι και 10^6 κυψελίδες), γεγονός που αποτελεί επιτακτική ανάγκη για τις πιθανολογικές έρευνες όταν τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι περιορισμένα ή όταν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο αναμένεται να είναι άγνωστοι ή να περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Επίσης, το ψευδο - διδιάστατο LISFLOOD-FP χρησιμοποιείται και στη περίπτωση μη μόνιμης ροής, κάτι που δεν ισχύει πάντα για τα μονοδιάστατα μοντέλα καθώς παρουσιάζουν δυσκολίες στη προσομοίωση πλημμύρας για αυτές τις συνθήκες ροής. Επιτρέπει τη χρήση ενός τοπογραφικού αναγλύφου σε μορφή πλέγματος που είναι κατάλληλο για μεγάλες λεκάνες με πλατιά και αβαθή κανάλια, δεδομένου ότι υποθέτει ένα ορθογώνιο τμήμα καναλιού και έτσι προσεγγίζει τη βρεγμένη περίμετρο από το πλάτος του καναλιού. Τέλος, σε περιοχές μικρών κλίσεων (οι κλίσεις εκατέρωθεν της πεδιάδας και του ποταμού δε ξεπερνούν το 2,5% στη περίπτωση της λεκάνης απορροής του π.Πηνειού) και ειδικά με σύνθετη τοπογραφία όπου καταγράφονται πολλαπλές κατευθύνσεις ροής σε κάθε διατομή, το LISFLOOD-FP δίνει εκτιμήσεις πιο κοντά στην πραγματικότητα, προσομοιώνοντας καλύτερα την πλημμύρα ενώ τα μονοδιάστατα μοντέλα αδυνατούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη χωρική κατάκλυση της πλημμύρας (Οικονόμου, 2013).

4.2. Θεωρητικό πλαίσιο

4.2.1. Ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Η ροή με ελεύθερη επιφάνεια χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με χαρακτηριστικά που βασίζονται σε κινηματικά ή δυναμικά κριτήρια.

Από κινηματική άποψη η ροή χαρακτηρίζεται σε (Παπανικολάου Π., Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, 2013) :

- Μόνιμη ροή (steady flow), στην οποία τα χαρακτηριστικά της ροής παραμένουν αμετάβλητα στο χρόνο
- Μη μόνιμη ή χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (unsteady flow), στην οποία τα χαρακτηριστικά της ροής μεταβάλλονται στο χρόνο.
- Ομοιόμορφη (uniform), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής είναι σταθερά σε όλο το μήκος του αγωγού και
- Ανομοιόμορφη (non-uniform), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής μεταβάλλονται κατά μήκος του αγωγού.

Στη φύση οι ροές είναι συνήθως μη μόνιμες και ανομοιόμορφες, παρουσιάζουν δηλαδή χωρική και χρονική μεταβλητότητα.

Από δυναμική άποψη η ροή χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τη σχέση των δυνάμεων αδράνειας (ταχύτητα ρευστού) και βαρύτητας (κύματα) που τη χωρίζουν σε:

(α) Υποκρίσιμη ροή (subcritical), όταν οι δυνάμεις βαρύτητας υπερισχύουν των δυνάμεων αδράνειας. Στην περίπτωση αυτή ένα κύμα κινείται ταχύτερα από τη μέση ροή με αποτέλεσμα τυχόν μικροδιαταραχές στην ελεύθερη επιφάνεια να μεταδίδονται και προς τα

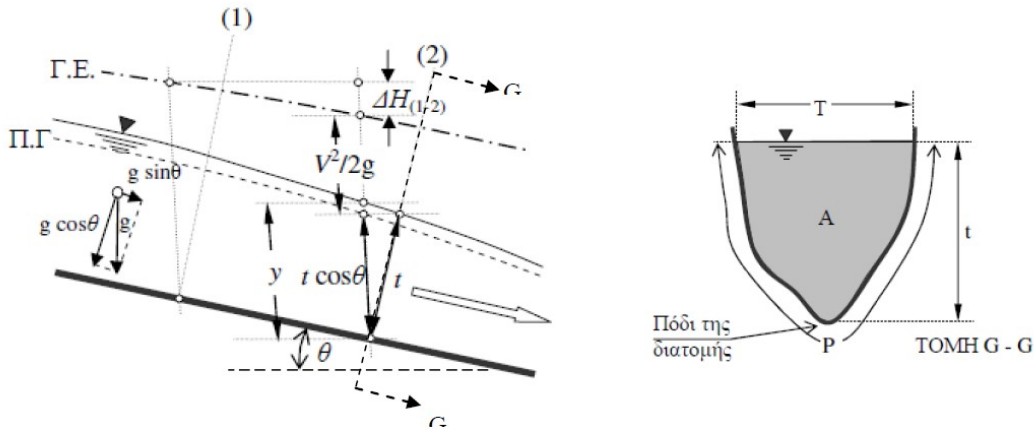
ανάτη. Στην υποκρίσιμη ροή ο αριθμός Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad \text{έχει τιμή } Fr < 1 \quad (4)$$

(β) Υπερκρίσιμη ροή (supercritical), όταν οι δυνάμεις αδράνειας υπερισχύουν των δυνάμεων βαρύτητας. Στην περίπτωση αυτή ένα κύμα κινείται βραδύτερα από τη μέση ροή με αποτέλεσμα τυχόν μικροδιαταραχές στην ελεύθερη επιφάνεια να παρασύρονται προς τα κατάντη. Στην υπερκρίσιμη ροή ο αριθμός Froude έχει τιμή $Fr > 1$

(γ) Κρίσιμη ροή, όταν οι δυνάμεις βαρύτητας και αδράνειας είναι ισοδύναμες. Πρόκειται για ασταθή ροή η οποία μεταπίπτει από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη και αντίστροφα. Στην κρίσιμη ροή ο αριθμός Froude έχει τιμή $Fr = 1$.

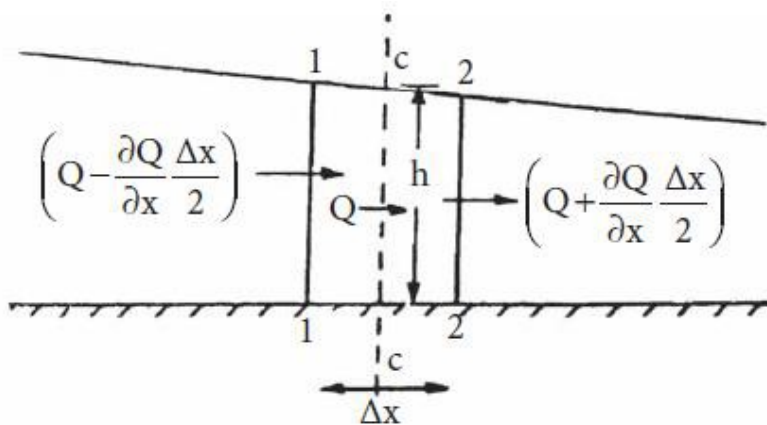
Η ροή για την οποία η παροχή δεν είναι ίδια κατά μήκος του αγωγού, όπως για παράδειγμα η ροή ενός ποταμού, ονομάζεται χωρικά μεταβαλλόμενη ροή (spatially varied flow) και μπορεί να είναι μόνιμη ή μη μόνιμη.



Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια (Παπανικολάου, 2012).

Ενώ η ροή είναι κατά κανόνα τριδιάστατη με μια κύρια συνιστώσα στη διεύθυνση του καναλιού, η ανάλυση γίνεται συνήθως προσεγγιστικά σε μια διάσταση, επιλέγοντας κάποιο όγκο αναφοράς (πεπερασμένο ή διαφορικό) και εφαρμόζοντας τους νόμους της ρευστομηχανικής. Οι βασικές εξισώσεις της ρευστομηχανικής που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή σε ανοιχτούς αγωγούς θεωρώντας ένα ολοκληρωματικό όγκο αναφοράς είναι:

(α) Εξίσωση συνέχειας



Σχήμα 4.2: Εισροή και εκροή σε όγκο ελέγχου (Πρίνος, 2009).

Η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται σε:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

και εκφράζοντας την παροχή σαν γινόμενο της μέσης ταχύτητας και της παροχής, έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial x} (A \bar{V}) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Στην περίπτωση μόνιμης ροής θεωρώντας έναν ολοκληρωματικό όγκο αναφοράς η εξίσωση συνέχειας διαμορφώνεται σε:

$$\int_A \rho(V dA) = 0 \Leftrightarrow A_1 V_1 = A_2 V_2 = A V = Q \quad (7)$$

όπου, A : το εμβαδόν της υγρής διατομής,
 V : η μέση ταχύτητα του υγρού στη διατομή και
 ρ : η πυκνότητα του υγρού

(β) Εξίσωση ποσότητας της κίνησης (ορμής)

Η διατήρηση της ορμής ενός κινούμενου ρευστού εκφράζεται με την εξίσωση των ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε έναν όγκο αναφοράς με το ρυθμό μεταβολής της συνολικής ορμής. Η αρχή διατήρησης της ορμής εφαρμόζεται χωριστά σε κάθε κύρια διεύθυνση του τριδιάστατου συστήματος αναφοράς και λαμβάνει τη μορφή:

$$\sum F_i = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho V_i dS + \sum (M_{out})_i - \sum (M_{in})_i \quad (8)$$

όπου, F_i : οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν όγκο αναφοράς κατά την διεύθυνση i

t : ο χρόνος

cv : ο όγκος ελέγχου

V : η συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση i

A : το εμβαδόν της υγρής διατομής,

ρ : η πυκνότητα του υγρού

S : ο όγκος του ρευστού

M_{out} : ο ρυθμός απώλειας ορμής από τον όγκο ελέγχου

Min : ο ρυθμός εισροής ορμής στον όγκο ελέγχου

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής η αρχή διατήρησης της ορμής εφαρμοζόμενη μεταξύ δύο διατομών 1 και 2 διαμορφώνεται σε:

$$\sum \underline{F} = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = 0 \quad (9)$$

όπου, Q : η παροχή

ρ : η πυκνότητα του υγρού

V : η μέση ταχύτητα σε κάθε διατομή

β : ο συντελεστής διόρθωσης όταν αμελείται η πραγματική κατανομή της $u(z)$

ταχύτητας στον υπολογισμό των αδρανειακών όρων της ορμής, ο οποίος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{\int_A u^2 dA}{V^2 A} \quad (10)$$

(γ) Εξίσωση ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο εγκάρσιων στον πυθμένα διατομών (1) και (2) γράφεται ως εξής:

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{(1-2)}, \quad H = \frac{p}{\rho g} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

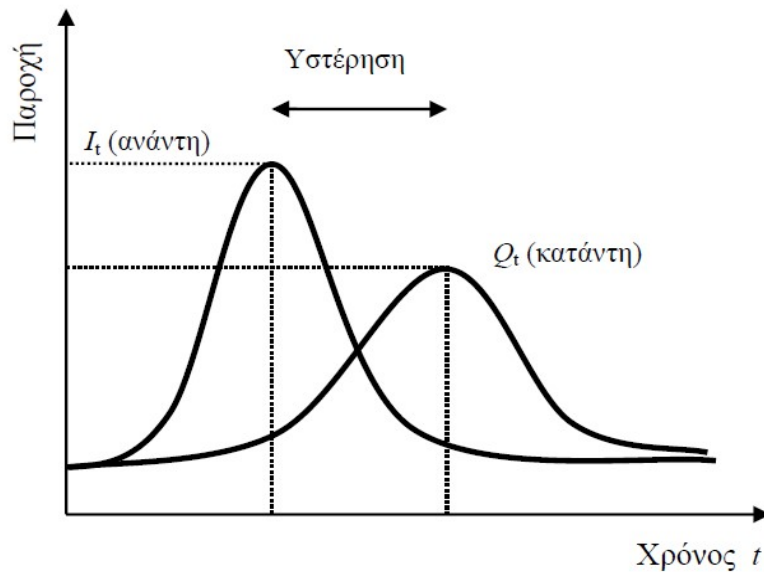
όπου $\Delta H_{(1-2)}$ οι απώλειες ενέργειας ανάμεσα στις διατομές (1) και (2), V η μέση ταχύτητα του υγρού στη διατομή, ρ η πυκνότητα του υγρού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και α διορθωτικός συντελεστής λόγω ανομοιομορφίας της κατανομής ταχύτητας, ο οποίος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\int_A u^3 dA}{V^3 A} \quad (12)$$

4.2.2. Διόδευση Πλημμυρών

Με τον όρο διόδευση νοείται ο υπολογισμός του πλημμυρικού υδρογραφήματος σε μια θέση στα κατάντη ενός υδατορεύματος όταν αυτό είναι γνωστό σε μια θέση στα ανάντη. Πρόκειται για τη μαθηματική αναπαράσταση ενός πλημμυρικού φαινομένου στο χώρο και στο χρόνο. Εφόσον δεν πραγματοποιούνται πλευρικές εισροές κατά μήκος ενός

υδατορεύματος, το υδρογράφημα που εισάγεται ανάντη, εμφανίζεται στα κατάντη με χρονική υστέρηση, μειωμένη αιχμή και αυξημένη χρονική διασπορά.



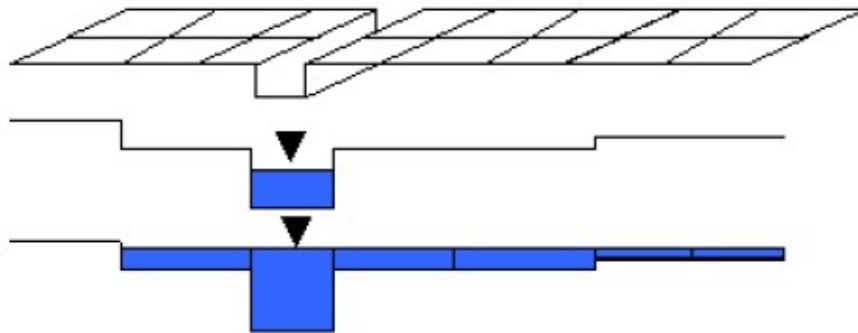
Σχήμα 4.3: Μεταβολή πλημμυρικού κύματος.

Για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιούνται οι διαφορικές εξισώσεις μονοδιάστατης βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής σε ανοιχτούς αγωγούς (πλήρεις εξισώσεις St. Venant - εξίσωση συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης). Το σύστημα των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει σε συνδυασμό με την εξίσωση της συνέχειας, δεν επιλύεται αναλυτικά. Για την επίλυσή τους εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι οι οποίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τις υδραυλικές μεθόδους και τις υδρολογικές μεθόδους επίλυσης των διαφορικών. Οι υδρολογικές μέθοδοι αποτελούν την πλέον εύχρηστη μεθοδολογία, ελέγχοντας τη στάθμη και την παροχή σε δύο σημεία ανάντη και κατάντη, μη εξετάζοντας τη πλήρη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου. Οι υδραυλικές μέθοδοι επιλύουν το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων βασισμένες σε σχήματα πεπερασμένων διαφορών είτε σε απλοποιήσεις που επιτρέπουν την αναλυτική επίλυση.

4.3. Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>) του Πανεπιστημίου του Bristol, αποτελεί ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που έχει σχεδιαστεί ειδικά να προσομοιώνει την πλημμυρική κατάκλυση με ένα υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο σε σύνθετη τοπογραφία. Έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων μεγέθους έως 10^6 κελιά για δυναμικά γεγονότα πλημμύρας και μπορεί να επωφεληθεί από νέες πηγές πληροφορίας εδάφους από τεχνικές τηλεσκοπησης όπως τα εναέρια υψομετρικά λέιζερ και τα δορυφορικά συμβολομετρικά ραντάρ.

Το μοντέλο προβλέπει βάθη νερού σε κάθε κύτταρο σε κάθε χρονικό βήμα και ως εκ τούτου μπορεί να προσομοιώσει τη διάδοση των πλημμυρικών κυμάτων σε ποτάμιας, παράκτιες και περιοχές σε εκβολές ποταμού.



Σχήμα 4.4: Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP (πηγή: <http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>).

Το μοντέλο LISFLOOD-FP, το οποίο εφαρμόζει τη μονοδιάστατη ανάλυση σε δύο διευθύνσεις, μία στην κύρια διεύθυνση της ροής και μία στην εγκάρσια διεύθυνση αυτής. Επιπλέον, η μονοδιάστατη ανάλυση εφαρμόζεται ξεχωριστά για το κανάλι και το πλημμυρικό πεδίο και συνδυάζονται μέσω μίας σχέσης συνέχειας. Στο επίπεδο του καναλιού το LISFLOOD-FP επιλύει τις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας της κίνησης (ορμής) σε μονοδιάστατη ανάλυση ώστε να περιγράψει την κατάντη διάδοση ενός πλημμυρικού κύματος υπολογίζοντας την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

(13)

$$S_0 - \frac{n^2 P^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} = 0 \quad (14)$$

όπου, Q : η παροχή στο κανάλι

A : η βρεχόμενη επιφάνεια της διατομής

q : η ροή προς το κανάλι από άλλες πηγές, όπως από οι πλημμυρικές κοίτες ή τυχόν παράπλευρα κανάλια

S_0 : η κλίση του πυθμένα του καναλιού

n : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning

P : η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής. Γίνεται υπόθεση ότι το κανάλι είναι ευρύ και ρηχό ώστε το πλάτος του να προσεγγίζει τη βρεχόμενη περίμετρο.

Οι παραπάνω εξισώσεις με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών διαμορφώνονται σε ένα μη γραμμικό σύστημα το οποίο επιλύεται χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Βάσει του πλημμυρογραφήματος που τίθεται ανάντη του υδατορεύματος καθορίζονται οι οριακές συνθήκες της ροής. Δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι το πλάτος του καναλιού, η κλίση του πυθμένα του, τα τοπογραφικά υψόμετρα του καναλιού και πλημμυρικού πεδίου και ο συντελεστής τραχύτητας Manning στο κανάλι και στο πλημμυρικό πεδίο, στοιχεία τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος του υδατορεύματος και πλημμυρικού πεδίου. Κάθε κανάλι-υδατόρευμα υλοποιείται ως ένα διάνυσμα ανεξάρτητο από το ψηφιδωτό αρχείο της επιφάνειας το οποίο περιλαμβάνει τις πλημμυρικές περιοχές και αντιπροσωπεύει αποκλειστικά τη ροή του νερού στο κανάλι. Με αυτόν τον τρόπο κάθε φατνίο του ψηφιδωτού αρχείου που βρίσκεται πάνω στο κανάλι έχει δύο βάθη νερού. Εκείνο που προέρχεται από τη ροή του καναλιού και εκείνο που προέρχεται από τις πλημμυρικές περιοχές. Το κανάλι (διανυσματικό αρχείο) αλληλεπιδρά με τις πλημμυρικές περιοχές (φατνία ψηφιδωτού αρχείου που διέρχονται πάνω από το διανυσματικό) με αποτέλεσμα το νερό να ρέει από το κανάλι στο πλημμυρικό πεδίο και αντίστροφα, ροή η οποία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης του Manning. Αυτή η λειτουργία δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης δύο διαφορετικής ανάλυσης αρχείων, ενός πιο λεπτομερούς διανυσματικού αρχείου για το κανάλι και ενός πιο αδρομερούς ψηφιδωτού αρχείου για τις πλημμυρικές παροχές, κάτι το οποίο είναι χρήσιμο στην προσομοίωση πλημμυρικών επεισοδίων μεγάλων περιοχών που διατρέχονται από μικρού πλάτους υδατορεύματα. Ένας βασικός περιορισμός στην

εφαρμογή είναι ότι αν και κατά μήκος του καναλιού μπορεί να αλλάζει η κλίση του πυθμένα του, είναι απαραίτητο να διατηρείται συνεχώς αρνητική. Η ροή στα πλημμυρικά πεδία -πλευρική ροή- περιγράφεται από την εξίσωση του Manning ή την εξίσωση υπερχειλίσσης. Οι πλημμυρικές περιοχές υλοποιούνται μέσω ενός ψηφιδωτού αρχείου, όπου η ροή περιγράφεται από φατνίο σε φατνίο μέσω της διαφοράς του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε ένα από αυτά. Υπολογίζεται ουσιαστικά η χωροχρονική μετατόπιση ενός πλημμυρικού κύματος σε δύο διαστάσεις. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{dh^{ij}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (15)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{\text{flow}}^{5/3}}{n} \left(\frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right)^{1/2} \Delta y \quad (16)$$

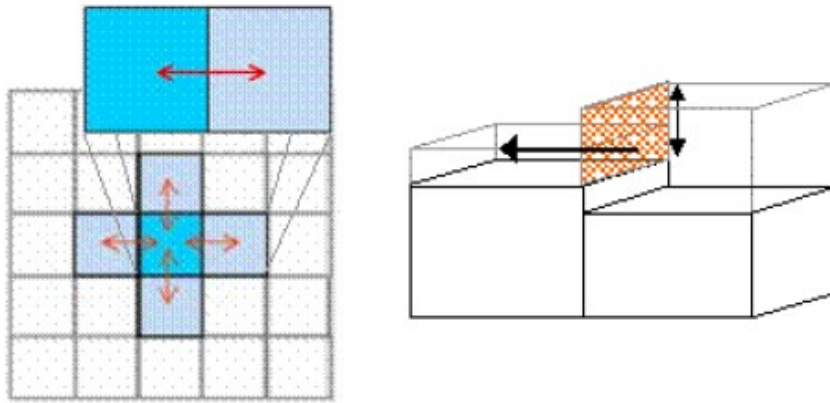
όπου, $h_{i,j}$: το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο φατνίο i, j

$\Delta x, \Delta y$: οι διαστάσεις του φατνίου

n : ο συντελεστής τραχύτητας για τις πλημμυρικές περιοχές

Q_x, Q_y : οι παροχές μεταξύ των φατνίων στις δύο διευθύνσεις (η Q_y προκύπτει κατ' αντιστοιχία με την τελευταία εξίσωση).

h_{flow} : το ικανό βάθος ώστε να υπάρχει ροή από το ένα φατνίο στο άλλο, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης στάθμης ελεύθερης επιφάνειας των δύο φατνίων και του υψηλότερου υψομέτρου από το επίπεδο αναφοράς των δύο φατνίων.



Σχήμα 4.5: Φατνία πλημμυρικού πεδίου, ροή μεταξύ αυτών (Πηγή: <http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>)

Με την ίδια μεθοδολογία οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ροής μεταξύ πλημμυρικών πεδίων και καναλιού. Σε συνδυασμό με την αρχική εξίσωση του καναλιού επιτυγχάνεται η σύνδεση των πλημμυρικών πεδίων με το κανάλι. Πρόκειται για μια απλουστευμένη προσέγγιση στη σύνδεση πλημμυρικών πεδίων και καναλιού, η οποία βασίζεται αποκλειστικά στη σχετική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (μεταβολή μάζας), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μεταβολές ορμής μεταξύ καναλιού και πλημμυρικών πεδίων. Το μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει χρονικό βήμα υπολογισμών ενώ, για την αποφυγή αστοχιών, υπολογίζεται και μια μέγιστη επιτρεπτή παροχή μεταξύ των φατνίων ως συνάρτηση του βάθους ροής, του μεγέθους του φατνίου, και του χρονικού βήματος υπολογισμών:

$$S_0 - \frac{n^2 P^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} = 0 \quad (17)$$

Θέτοντας το παραπάνω περιορισμό εξασφαλίζεται ότι η παροχή δεν θα υπερβεί κάποιο όριο το οποίο θα οδηγήσει σε αντιστροφή της ροής προς ή από το φατνίο στο επόμενο χρονικό βήμα. Σε πιθανή τέτοια περίπτωση αντικαθίσταται η παροχή που υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Manning από μια νέα τιμή η οποία προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του μοντέλου -όπως το μέγεθος του φατνίου και το χρονικό βήμα υπολογισμών- και η οποία δεν παρουσιάζει ευαισθησία στο συντελεστή τραχύτητας του Manning. Η εξεύρεση βέλτιστου χρονικού βήματος, τέτοιου ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη υπολογιστική αποδοτικότητα και ταυτόχρονα η μέγιστη σταθερότητα των υπολογισμών άρει την ανάγκη χρήσης του παραπάνω περιορισμού.

4.4. Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τόσο του καναλιού όσο και των πλημμυρικών πεδίων, τα υδρολογικά δεδομένα και οι οριακές συνθήκες της ροής. Η γεωμετρία των πλημμυρικών πεδίων εισάγεται μέσω ενός αρχείου κειμένου, επέκτασης .ascii, το οποίο καταγράφει την περιοχή υπό μορφή κανάβου (επέκταση αρχείου .dem.ascii). Αξιοποιείται πλήρως το επεξεργασμένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο εξάγεται στη συγκεκριμένη μορφή, κρατώντας τη χωρική ανάλυση του Ψ.Μ.Ε., απευθείας μέσω του λογισμικού ArcMap. Σε ένα όμοιο αρχείο καταγράφεται σε μορφή κανάβου ίδιας ανάλυσης με το Ψ.Μ.Ε. η τιμή του συντελεστή τραχύτητας του Manning (επέκταση αρχείου .n.ascii). Σε ότι αφορά τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα από το LISFLOOD-FP πρέπει να αναφερθεί ότι στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης όπως αυτή εισάχθηκε στο μοντέλο, δεν έχουν συμπεριληφθεί τα υφιστάμενα αναχώματα (Οικονόμου 2013).

Η γεωμετρία του καναλιού, το οποίο όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια διανυσματική οντότητα, εισάγεται με δεδομένα για το κάθε σημείο του διανύσματος τα εξής: τις συντεταγμένες (x, y), το πλάτος του καναλιού στη συγκεκριμένη θέση, το συντελεστή τραχύτητας, το υψόμετρο του πυθμένα. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η γεωμετρία του καναλιού δεν υπεισέρχεται ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο καθώς γίνεται η απλοποιητική θεώρηση ορθογωνικής διατομής. Στη συνέχεια, στο πρώτο σημείο του διανύσματος καταγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής του καναλιού (επέκταση αρχείου .river). Τα πλάτη του καναλιού προέκυψαν από την καταγραφή που έγινε χρησιμοποιώντας τις ορθοεικόνες της Κτηματολόγιο ΑΕ, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Το βάθος του καναλιού προέκυψε από το Ψ.Μ.Ε. κατόπιν επιπλέον επεξεργασίας από την αρχική επεξεργασία του Ψ.Μ.Ε. Αυτό απαιτήθηκε γιατί το μοντέλο στην προς τα κατάντη ροή του ποταμού δέχεται μόνο αρνητικές κλίσεις, κάτι που δεν ικανοποιούσε πλήρως ούτε το επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε. Τα επιπλέον υψομετρικά δεδομένα είναι το υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού στη θέση Αλή Εφέντη (ανάντη θέση περιοχής μελέτης) και στη θέση Αμυγδαλιά (κατάντη θέση) τα οποία προέρχονται από τα στοιχεία των σταθμημέτρων στις συγκεκριμένες θέσεις. Με βάση αυτά τα δεδομένα διορθώθηκαν υψομετρικά τα ενδιάμεσα σημεία, όπου ήταν απαραίτητο, ώστε να επιτευχθεί παντού αρνητική κλίση.

Ως οριακές συνθήκες ροής στα πλημμυρικά πεδία μπορούν να ορισθούν:

- (α) Κλειστό Όριο (Zero-Flux), η οποία αποτελεί και την προεπιλεγμένη συνθήκη
- (β) Ανοιχτό Όριο (Uniform Flow)
- (γ) η Σταθερή Ελεύθερη Επιφάνεια του νερού (Fixed Free Surface Elevation)
- (δ) η Χρονικά Μεταβαλλόμενη Ελεύθερη Επιφάνεια του νερού (Time Varying free surface Elevation)
- ε) η Σταθερή Παροχή για συνθήκες σταθερής εισροής (Fixed flow)
- (στ) η Χρονικά Μεταβαλλόμενη ροή (Time varying flow)

Ο επιλεγμένος τύπος των οριακών συνθηκών, το αν δηλαδή πρόκειται για ανοιχτό ή κλειστό όριο καθορίζεται από ένα αρχείο της μορφής .bci, ενώ το αρχείο που περιγράφει την οριακή συνθήκη είναι της μορφής .bdy. Επιλέχθηκαν τα ανατολικά και δυτικά όρια του πλημμυρικού πεδίου ως ανοιχτά ενώ το βόρειο και νότιο επιλέχθηκαν να είναι κλειστά. Σε ότι αφορά τις οριακές συνθήκες του ποταμού, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο επιλέχθηκε αρχικά σταθερή παροχή εισόδου. Στη συνέχεια, στο πλαίσιο της σύγκρισης και της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσομοίωση με χρονικά μεταβαλλόμενη εισροή.

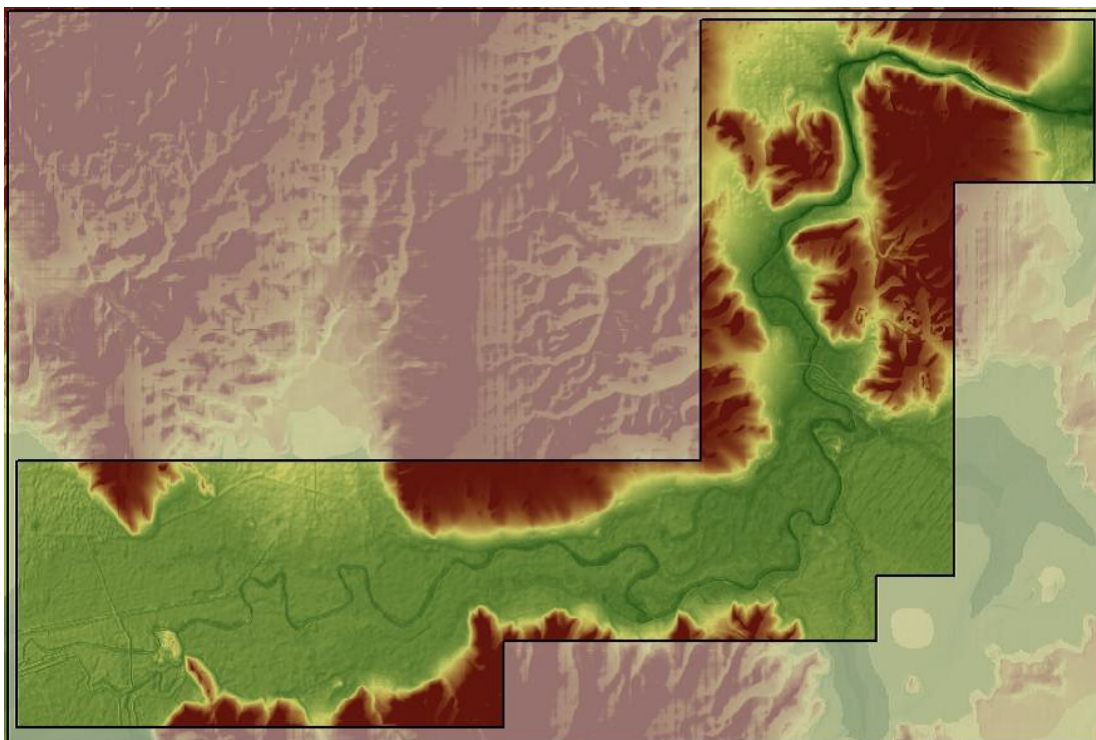
Το σύνολο των δεδομένων οργανώνονται σε ένα αρχείο (με επέκταση .par) το οποίο αποτελεί το αρχείο δεδομένων που εισάγεται στο μοντέλο για την υδραυλική προσομοίωση. Στο ακόλουθο Σχήμα φαίνεται το σύνολο των δεδομένων που εισάχθηκαν στο υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP, για ένα τυχαίο σενάριο που πραγματοποιήθηκε.

5. Εφαρμογή Ανάλυσης Αβεβαιότητας

5.1. Υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης

5.1.1. Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

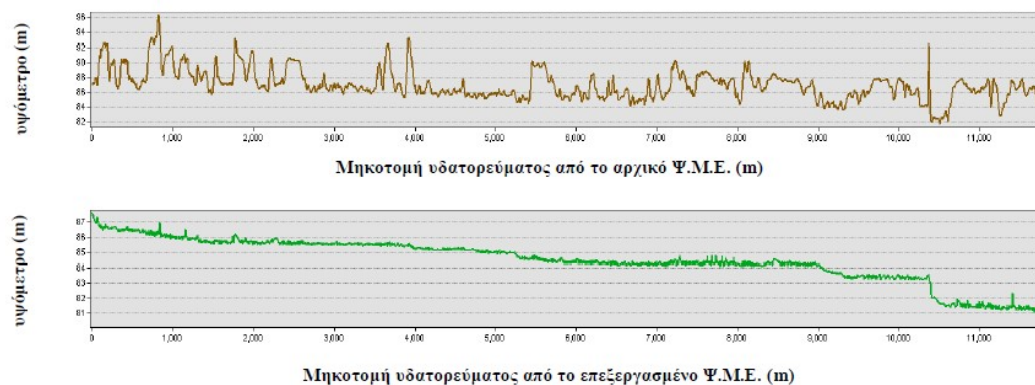
Η μορφολογία της περιοχής μελέτης περιγράφεται μέσω ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, κανονικοποιημένης μορφής (grid) και ανάλυσης 50m x 50m, από το οποίο αντλήθηκαν όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής.



Σχήμα 5.1: Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης(Πηγή: Οικονόμου, 2013).

Από τον έλεγχο των παραγόμενων δεδομένων προέκυψε ότι η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. στην υψομετρική διεύθυνση δεν ικανοποιεί τις ανάγκες του υδραυλικού μοντέλου για το οποίο παρήχθησαν. Το πρόβλημα εστιάζεται στη κατεύθυνση ροής του κυρίως κλάδου του υδατορεύματος (ποταμός Πηνειός), η μηκοτομή του οποίου παρουσιάζει έντονη μεταβολή της κλίσης, αρνητική και θετική, κάτι που όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό δεν οφείλεται στη μορφολογία της περιοχής αλλά στην ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. Για το λόγο αυτό το Ψ.Μ.Ε. επαναδομήθηκε λαμβάνοντας υπόψη μια επιπλέον έμμεση υψομετρική πληροφορία, η

οποία προκύπτει από το ίδιο το Ψ.Μ.Ε., τη γραμμή ροής του κύριου υδατορεύματος. Η γραμμή ροής του ποταμού δίνει την ακμή μεταβολής της κλίσης των επιφανειών εκατέρωθεν του υδατορεύματος και παράλληλα αποτελεί τη βαθιά γραμμή ροής του. Η υπόλοιπη περιοχή μελέτης διατηρεί την υψομετρική πληροφορία του αρχικού Ψ.Μ.Ε. Η περιγραφόμενη επεξεργασία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS, το αποτέλεσμα της οποίας παρουσιάζεται για τμήμα του υδατορεύματος στην Εικόνα 5.2. Η περιγραφόμενη επεξεργασία με σκοπό την εξαγωγή του επεξεργασμένου Ψ.Μ.Ε. έγινε στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου (2013), όπου πραγματοποιείται εφαρμογή στην ίδια περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα της περιγραφόμενης διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν και στη παρούσα διπλωματική εργασία.



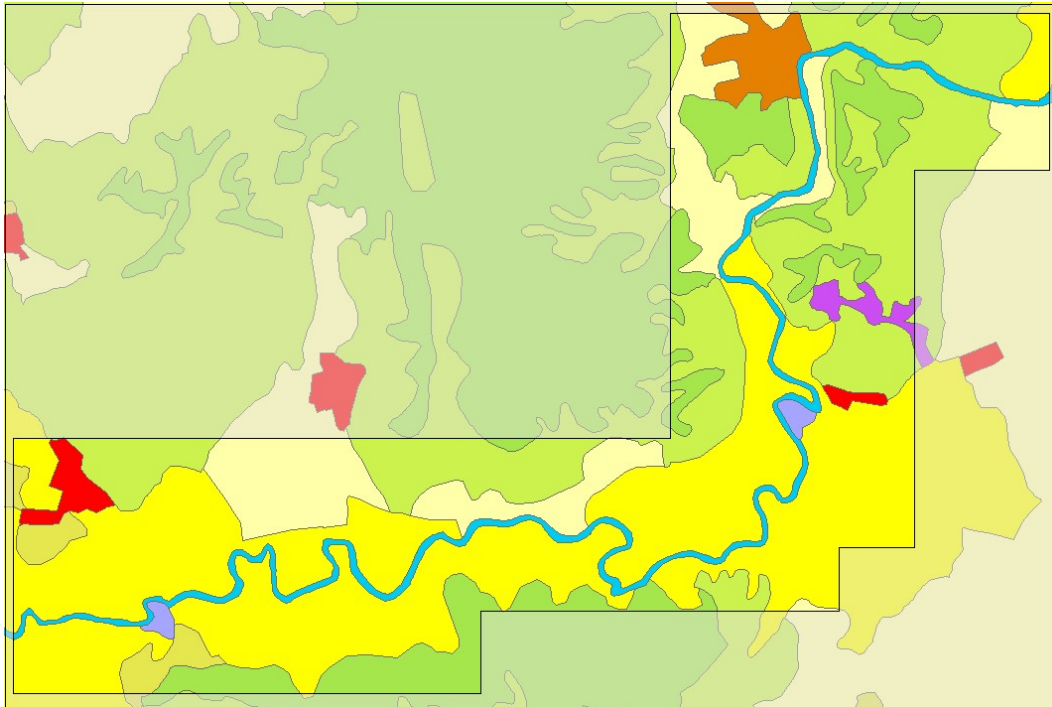
Σχήμα 5.2: Μηκοτομές τμήματος π.Πηνειού από το αρχικό και επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε.

(Πηγή: Οικονόμου, 2013).



Σχήμα 5.3: : Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης. Δορυφόρος Landsat 7 (bands RGB 321). Σημειώνεται η ροή του π. Πηνειού (Πηγή: landsatlook.usgs.gov)

Επιπλέον, αξιοποιείται στην εφαρμογή η καταγραφή των χρήσεων κάλυψης γης από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine 2000, για την εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning. Η δημιουργία του Corine (CO-ordination of Information on the Environment) βασίζεται σε οπτική φωτοερμηνεία εικόνων του δορυφόρου LANDSAT 7 ETM+ από εθνικές ομάδες εργασίας.



Σχήμα 5.4: Ζώνες corine 2000 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: www.geodata.gov.gr).

Η αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning για τις επιμέρους κατηγορίες χρήσεων γης που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης, φαίνονται στον πίνακα 5.1. (Yan Huang 2006).

κωδικός	Χρήση	Συντελεστής n Manning ($m^{-1/3} s$)
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.200
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.030
221	Αμπελώνες	0.100
231	Λιβάδια	0.033
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.035
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.050
511	Ροές υδάτων	0.027

Πίνακας 5.1: Συντελεστής τραχύτητας συναρτήσει της χρήσης γης (Πηγή: Οικονόμου, 2013)

5.1.2. Συνθήκες Ροής

Η εφαρμογή του μοντέλου LISFLOOD-FP έγινε θεωρώντας συνθήκες μη μόνιμης ροής. Από τα αρχεία της μελέτης Υδρολογική διευρέυνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, Παράρτημα Δ2 (ΕΜΠ, Οκτώβριος 1988) καταγράφηκαν οι ωριαίες παροχές του σταθμού Αλή Εφέντη που υπήρχαν, δηλαδή περίπου 150 ημέρες σε διάστημα 6 χρόνων και συγκεκριμένα από τις 11/12/1973 μέχρι 02/02/1979. Οι τιμές αυτές, ουσιαστικά αφορούν τις μέρες όπου παρατηρήθηκαν διάφορα επεισόδια πλημμυρών. Για τις υπόλοιπες ημέρες, που δεν παρουσιάστηκε κάποιο επεισόδιο, δεν υπήρχε έντονη διακύμανση της παροχής μέσα στην διάρκεια της ημέρας, οπότε χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη ημερήσια παροχή. Αυτή αντιστοιχίστηκε στην 8^η ώρα της ημέρας και μεταξύ των υπολοίπων έγινε γραμμική παρεμβολή για να συμπληρωθεί η ιστορική χρονοσειρά. Να σημειωθεί ότι η γραμμική παρεμβολή σε μικρές τιμές παροχών δεν επηρεάζει τη συσχέτιση. Στο διάγραμμα 3.1. (κεφ.3) φαίνονται οι τιμές της ιστορικής χρονοσειράς με μέγιστες τιμές που οριακά φτάνουν τα 1000 m³/s.

5.1.3. Παράμετροι του ποταμού

Όπως έχει προαναφερθεί οι παράμετροι του ποταμού που μελετήθηκαν στη παρούσα εργασία είναι το πλάτος του ποταμού, το υψόμετρο από τον πυθμένα (βάθος) καθώς και ο συντελεστής τραχύτητας Manning. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κεφ.3) οι παράμετροι ακολουθούν λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή. Για κάθε μία από τις παραμέτρους του ποταμού παραγάγαμε 54 συνθετικές χρονοσειρές, όσα και τα επεισόδια που προέκυψαν από την ιστορική χρονοσειρά, ακολουθώντας τη λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή, . Όσον αφορά το πλάτος και το υψόμετρο του ποταμού, οι συνθετικές χρονοσειρές που παρήχθησαν έχουν μέση τιμή και τυπική απόκλιση όπως υποδεικνύεται από τα τοπογραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (DEM), διατηρώντας τη συσχέτιση με τα αρχικά δεδομένα. Για το συντελεστή τραχύτητας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που περιγράφηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

5.2. Προτεινόμενη Εφαρμογή Ανάλυσης Αβεβαιότητας

5.2.1. Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (καναλιού και πλημμυρικών πεδίων), τα υδρολογικά δεδομένα και οι οριακές συνθήκες της ροής.

Η γεωμετρία των πλημμυρικών πεδίων εισάγεται μέσω ενός αρχείου μορφής ascii, το οποίο καταγράφει την περιοχή υπό μορφή κανάβου (επέκταση αρχείου .dem.ascii). Αξιοποιείται πλήρως το επεξεργασμένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο εξάγεται στην συγκεκριμένη μορφή (κρατώντας την ανάλυση του Ψ.Μ.Ε.) απευθείας μέσω του λογισμικού ArcMap. Ένα όμοιο αρχείο καταγράφει σε μορφή κανάβου (και πάλι ίδιας ανάλυσης με το Ψ.Μ.Ε.) την τιμή του συντελεστή τραχύτητας του Manning (επέκταση αρχείου .n.ascii).

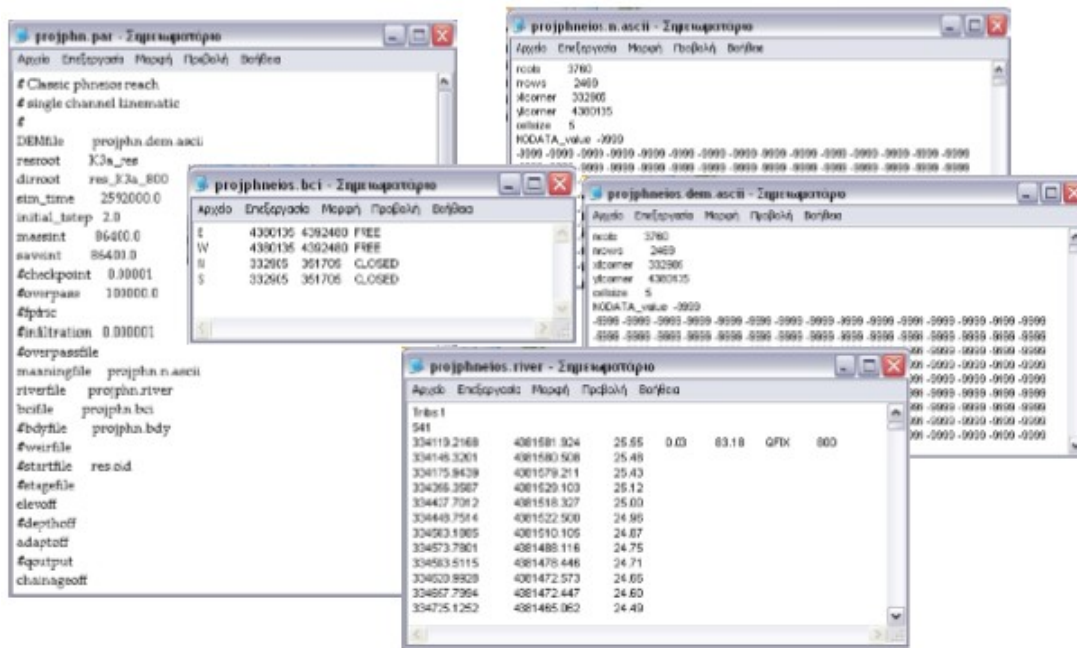
Η γεωμετρία του καναλιού, το οποίο όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια διανυσματική οντότητα, εισάγεται με δεδομένα για τη κάθε κορυφή του διανύσματος τις συντεταγμένες (x, y), το πλάτος του καναλιού στη συγκεκριμένη θέση, τον συντελεστή τραχύτητας, το υψόμετρο του πυθμένα. Επιπλέον στο πρώτο σημείο του διανύσματος καταγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής του καναλιού (επέκταση αρχείου .river). Το πλάτος του καναλιού προέκυψαν από συνθετικές χρονοσειρές όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ομοίως και για το υψόμετρο του πυθμένα, που επεξεργάστηκε ώστε να είναι σε φθίνουσες τιμές. Αυτό απαιτήθηκε γιατί το μοντέλο στην προς τα κατάντη ροή του ποταμού δέχεται μόνο αρνητικές κλίσεις, κάτι που δεν ικανοποιούνταν από την αρχική συνθετική τυχαία χρονοσειρά.

Οριακές συνθήκες ροής στα πλημμυρικά πεδία μπορούν να ορισθούν:

- (α) κλειστό όριο (zero-flux), η οποία αποτελεί και την προεπιλεγμένη συνθήκη,
- (β) ανοιχτό όριο (uniform flow)
- (γ) η σταθερή ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Fixed free surface elevation)
- (δ) η χρονικά μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Time varying free surface elevation)
- (ε) η σταθερή παροχή για συνθήκες μόνιμης ροής (Fixed flow)
- (στ) η χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (Time varying flow)

Ο επιλεγμένος τύπος των οριακών συνθηκών σε κάποια θέση του πλημμυρικού πεδίου καταγράφεται σε ένα αρχείο μορφής .bci, ενώ το αρχείο που περιγράφει την τυχόν μεταβαλλόμενη ροή είναι της μορφής .bdy.

Το σύνολο των δεδομένων οργανώνονται σε ένα αρχείο (με επέκταση .par) το οποίο αποτελεί το αρχείο δεδομένων που εισάγεται στο μοντέλο για την υδραυλική προσομοίωση.



Σχήμα 5.5: Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP

5.2.2. Προτεινόμενη μεθοδολογία - εφαρμογή

Όπως έχει προαναφερθεί, τα δισδιάστατα μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν την πραγματοποίηση μιας Monte Carlo ανάλυσης. Η Monte Carlo ανάλυση αποτελεί μια ευέλικτη μέθοδο για την ανάλυση της συμπεριφοράς ορισμένων δραστηριοτήτων, προγραμμάτων ή διαδικασιών που αφορούν την αβεβαιότητα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μοντελοποίηση των φαινομένων που παρουσιάζουν σημαντική αβεβαιότητα, όπως οι πλημμύρες.

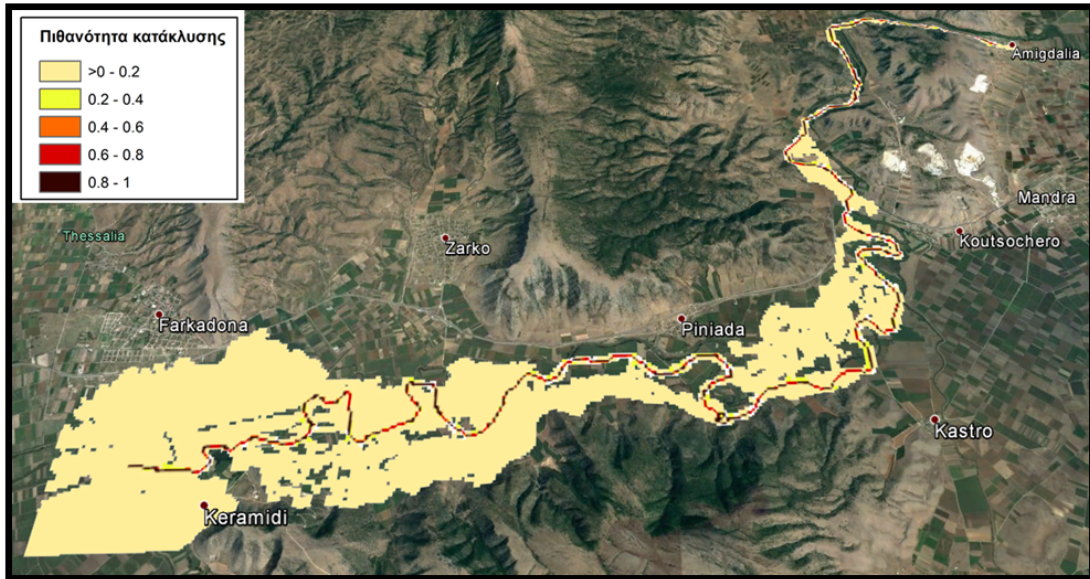
Χωρίζοντας, λοιπόν, την ιστορική χρονοσειρά σε 54 παρατηρούμενα πλημμυρικά επεισόδια, παράγουμε τις αντίστοιχες συνθετικές χρονοσειρές των παραμέτρων του ποταμού για κάθε ένα από τα πλημμυρικά επεισόδια. Έτσι, προκύπτουν 54 πιθανά πλημμυρικά σενάρια, τα οποία αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου. Αυτά εισάγονται στο υδραυλικό μοντέλο σαν δεδομένα εισόδου και μέσω μιας

προγραμματιστικής εντολής που συντάχθηκε σε @MATLAB, δίνεται η δυνατότητα να εισάγονται στο υδραυλικό πρόγραμμα με τη σειρά. Δηλαδή, με το πέρας του ενός πλημμυρικού επεισοδίου, ξεκινάει το επόμενο χωρίς να διακόπτεται το υδραυλικό μοντέλο.

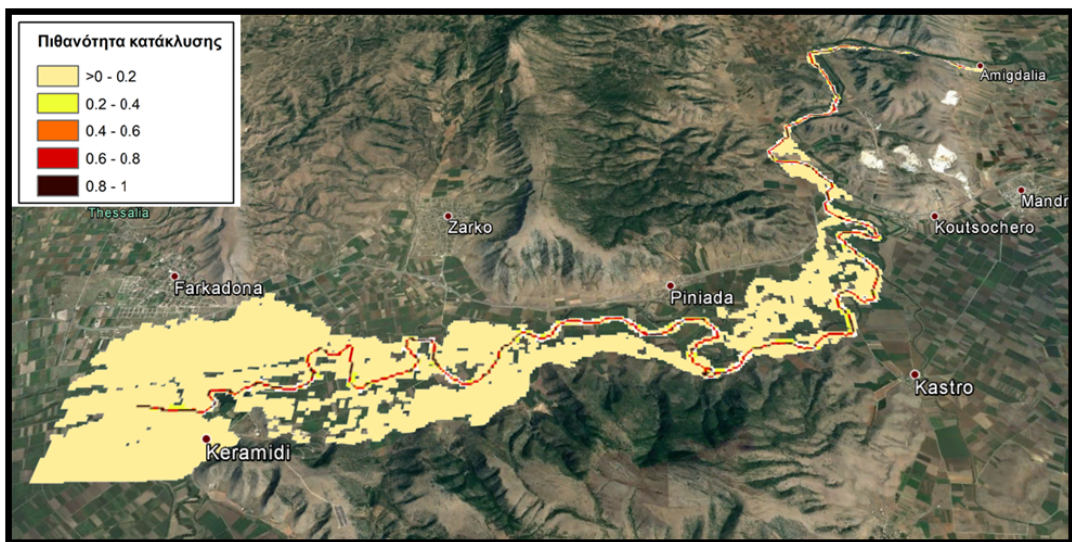
Τέλος, τα αποτελέσματα των βαθών του ποταμού που προέκυψαν αντιστοιχήθηκαν στην αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης τους στο κάθε σημείο και προέκυψε ο χάρτης που ακολουθεί. Η αντιστοίχιση του κάθε σημείου με την πιθανότητα εμφάνισης της πλημμύρας στο συγκεκριμένο σημείο, έγινε αυτοματοποιημένα, λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, μέσω μιας αντίστοιχης προγραμματιστικής εντολής που συντάχθηκε σε περιβάλλον Matlab. Ουσιαστικά, για κάθε σημείο του Ψ.Μ.Ε. προκύπτει μέσω του υδραυλικού μοντέλου, μια χρονοσειρά βαθών για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Έτσι, σε κάθε σημείο μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα υπέρβασης $P(x>S)$ κατάκλισης πλημμύρας πάνω από κάποιο κατώτατο όριο βάθους S (threshold). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως κατώτατο όριο θεωρήθηκε το 0.1μ, το 0.3μ αλλά και το 1.0μ για την οικονομική ανάλυση των ζημιών από τις πλημμύρες (κεφ. 6). Συνεπώς, για την τελική χαρτογράφηση της πλημμύρας, σε κάθε σημείο υπολογίστηκε η τελική πιθανότητα κατάκλισης σαν άθροισμα των πιθανοτήτων κάθε πλημμυρικού επεισοδίου προς το άθροισμα της διάρκειας τους, σύμφωνα με τον τύπο:

$$P = \frac{p_1+p_2+\dots+p_5}{N_1+N_2+\dots+N_5} \quad (18)$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση, με τη βοήθεια του προγράμματος GIS παρουσιάζονται παρακάτω σε υπόβαθρο GoogleEarth.



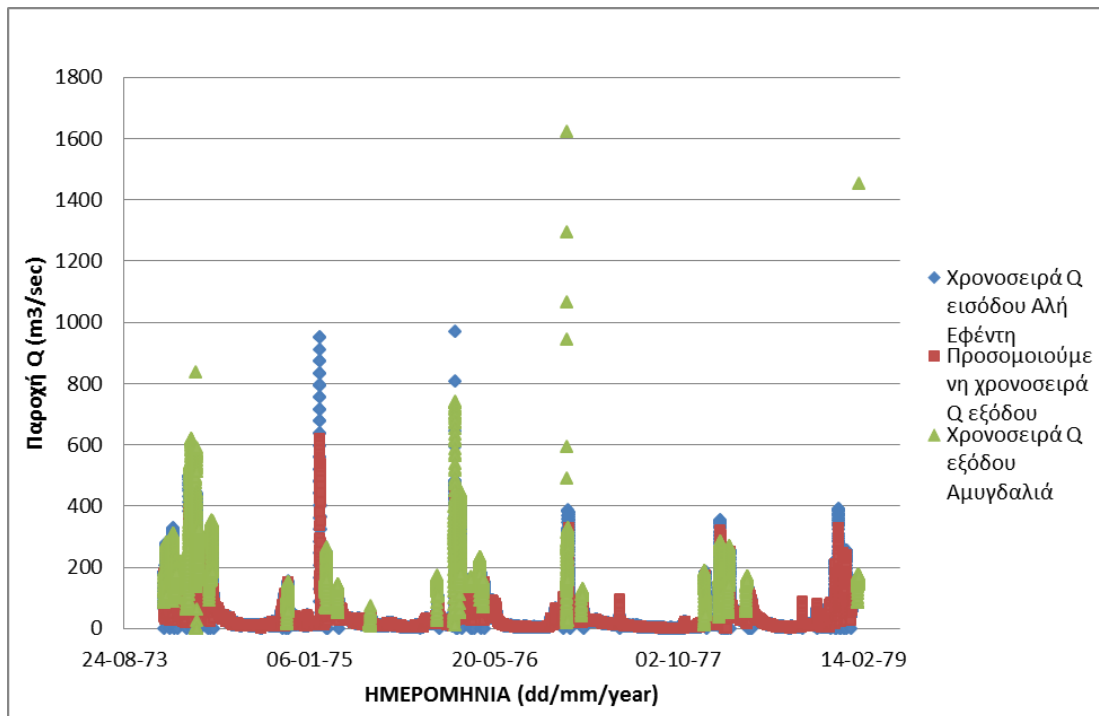
Σχήμα 5.6: Πιθανοτικός Χάρτης κατάκλισης πλημμύρας για βάθος 0,1m (Υπόβαθρο: Google Earth).



Σχήμα 5.7: Πιθανοτικός Χάρτης κατάκλισης πλημμύρας για βάθος 0,3m (Υπόβαθρο: Google Earth).

5.2.3. Έλεγχος Υδραυλικών χαρακτηριστικών μοντέλου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε ένας έλεγχος των υδραυλικών υπολογισμών του μοντέλου. Αναλυτικότερα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υδραυλικό μοντέλο προσομοίωσης κατάντη με τα αντίστοιχα που υπήρχαν από τα δεδομένα για την παροχή στο σταθμό της Αμυγδαλιάς. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, η προσομοιούμενη χρονοσειρά στη θέση κατάντη, προσεγγίζει επαρκώς τα ιστορικά δεδομένα παροχής που υπήρχαν για τη θέση Αμυγδαλιά.



Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση ιστορικής χρονοσειράς στη θέση Αμυγδαλιά με τη χρονοσειρά εξόδου που προκύπτει από την προσομοίωση. Παρουσιάζεται και η ιστορική χρονοσειρά εισόδου στα ανάντη.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε ένας έλεγχος για τον προσδιορισμό της ταχύτητας και του αριθμού Froude. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου προέκυψαν οι μέγιστες παροχές που εμφανίζονται σε κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Από την αρχική επεξεργασία των δεδομένων γεωμετρίας είχαν προκύψει το μέσο βάθος και πλάτος της τυπικής ορθογωνικής διατομής. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, έγινε ο προσδιορισμός μιας μέσης ταχύτητας του κάθε επεισοδίου, καθώς και ο αντίστοιχος αριθμός Froude.

Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών, συνοψίζονται στο πίνακα που ακολουθεί:

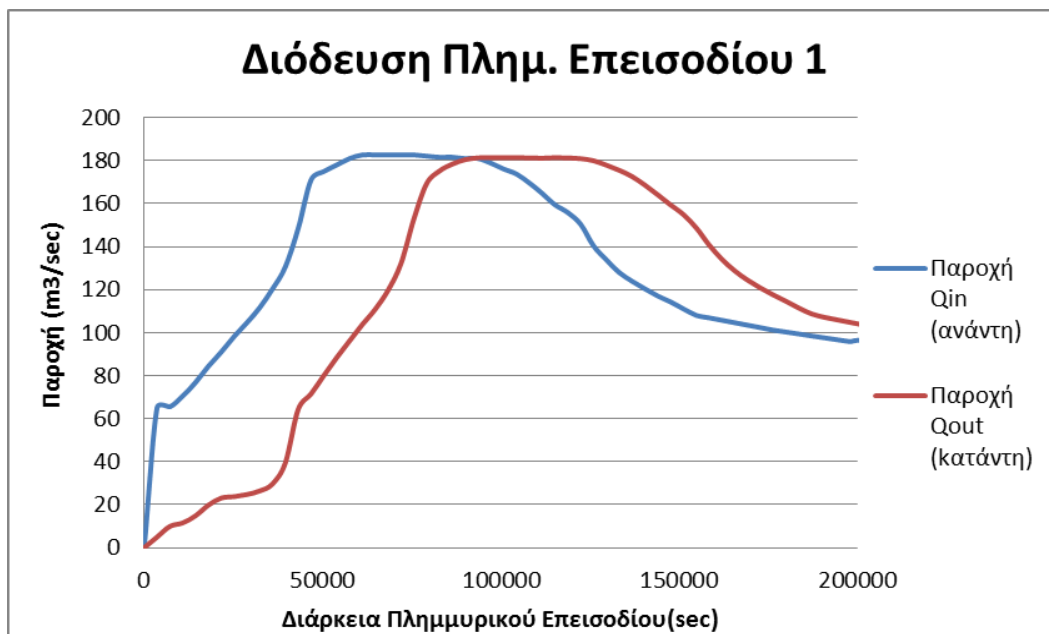
Επεισόδιο	Διάρκεια (h)	Max Q(m ³ /s)	V(m/s)	Αρ. Froude
1	58	409.54	2.76	0.470
2	121	402.60	2.71	0.462
3	145	441.15	2.97	0.507
4	338	392.45	2.64	0.451
5	170	476.66	3.21	0.547
6	650	425.05	2.86	0.488
7	314	380.18	2.56	0.437
8	74	423.72	2.85	0.487
9	290	330.12	2.22	0.379
10	122	435.62	2.93	0.500
11	50	375.19	2.52	0.431
12	530	428.71	2.88	0.492
13	146	401.12	2.70	0.461
14	170	844.19	5.68	0.969
15	4466	429.93	2.89	0.494
16	242	439.34	2.96	0.505
17	194	454.67	3.06	0.522
18	2426	894.41	6.02	1.027
19	98	438.39	2.95	0.503
20	722	467.26	3.14	0.537
21	6506	444.71	2.99	0.511
22	1130	865.71	5.83	0.994
23	50	419.75	2.82	0.482
24	338	437.53	2.94	0.502

25	530	442.57	2.98	0.508
26	98	446.99	3.01	0.513
27	146	406.83	2.74	0.467
28	458	418.81	2.82	0.481
29	242	415.34	2.79	0.477
30	5066	404.39	2.72	0.464
31	434	397.16	2.67	0.456
32	890	435.94	2.93	0.501
33	2354	402.32	2.71	0.462
34	5642	404.25	2.72	0.464
35	962	426.17	2.87	0.489
36	194	399.83	2.69	0.459
37	194	421.67	2.84	0.484
38	218	422.54	2.84	0.485
39	1154	432.59	2.91	0.497
40	74	470.13	3.16	0.540
41	50	441.21	2.97	0.507
42	98	416.77	2.80	0.479
43	3272	464.37	3.12	0.533
44	986	398.35	2.68	0.457
45	842	422.89	2.85	0.486
46	338	448.48	3.02	0.515
47	50	424.03	2.85	0.487
48	194	443.92	2.99	0.510
49	74	443.40	2.98	0.509
50	218	392.17	2.64	0.450

51	50	461.53	3.11	0.530
52	146	413.06	2.78	0.474
53	290	430.46	2.90	0.494
54	139	430.46	2.90	0.494

Όπως προκύπτει από τον πίνακα, η μέση ταχύτητα ροής κυμαίνεται από 2,6 - 3,0 m/s ενώ ο αριθμός Froude είναι μικρότερος της μονάδας, έχουμε δηλαδή υποκρίσιμη ροή. Στην κατάσταση αυτή ο ρόλος των δυνάμεων της βαρύτητας είναι πιο έντονος γι'αυτό η ροή έχει μικρή ταχύτητα και περιγράφεται συνήθως ως σταθερή, ποτάμια ροή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος του πλημμυρικού όγκου που προκύπτει στα κατάντη από το υδραυλικό μοντέλο, με τον αρχικό όγκο, ο οποίος διατηρείται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 5.2: Πλημμυρική διόδευση πρώτου πλημμυρικού επεισοδίου. Παρατηρείται η διατήρηση του όγκου εισόδου-εξόδου. $Q_{max_in}/Q_{max_out} = 1,1$, $t_{AB} = 11h$.

6. Εκτίμηση Οικονομικών Ζημιών από πλημμύρες

6.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια επέκταση των υδραυλικών αποτελεσμάτων σε οικονομικές εκτιμήσεις καθώς παρουσιάζεται μια απλοποιημένη μεθοδολογία για την εκτίμηση των οικονομικών ζημιών από τις πλημμύρες που εμφανίστηκαν στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που μελετήθηκε. Με δεδομένο ότι η πλημμύρα αποτελεί ένα ακραίο φαινόμενο που περιγράφεται από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η εκτίμηση των οικονομικών ζημιών γίνεται ως μέσο αναμενόμενο μέγεθος ανά έτος (ετησιοποιημένο μέγεθος). Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί και να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτικές προσεγγίσεις στην κατεύθυνση των εργασιών που προβλέπονται με βάση την Οδηγία 2007/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις πλημμύρες. Η χρησιμότητα της ανάλυσης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι συμβάλλει στην αδρομερή αλλά γρήγορη εκτίμηση των οικονομικών ζημιών και της πλημμυρικής διακινδύνευσης μιας παραποτάμιας περιοχής. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης σε ετήσιες χρηματικές μονάδες, που περιλαμβάνει την στοχαστική εξέλιξη των πλημμυρών σε μία περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύριο οικονομικό κριτήριο για την ιεραρχική κατάταξη των περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες. Με τον τρόπο αυτό η πολιτεία θα μπορεί να ιεραρχήσει τις ανάγκες της από πλευράς έργων που απαιτούνται για την προστασία από τις πλημμύρες.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης ενός φυσικού κινδύνου και της εκτίμησης της κρισιμότητας του, εξετάζονται όροι όπως ο κίνδυνος (hazard), η τρωτότητα (vulnerability), η έκθεση (exposure), και η διακινδύνευση (risk) που ορίζονται παρακάτω.

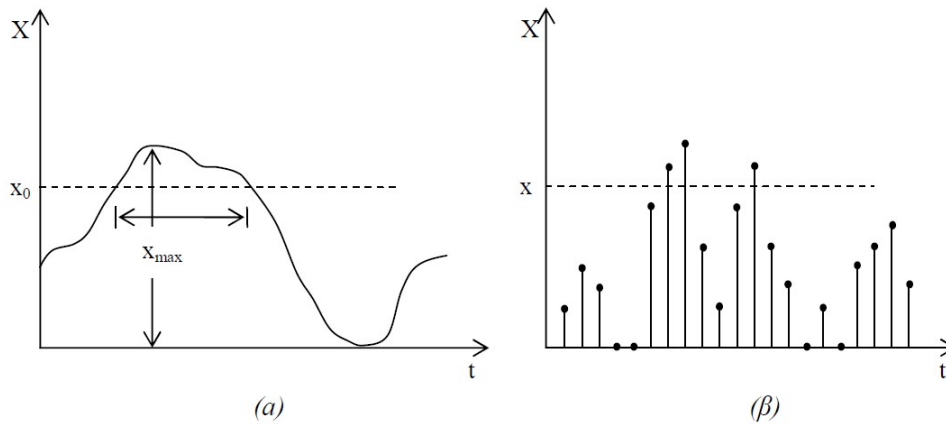
Με μια γενική θεώρηση ο φυσικός κίνδυνος (hazard) είναι μια απειλή σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει στοιχεία (elements) όπως ο άνθρωπος, οι περιουσίες, οι υποδομές, οι οικονομικές δραστηριότητες, το περιβάλλον και τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Ο κίνδυνος εκδηλώνεται με μεταβαλλόμενη ένταση στο χώρο και στο χρόνο με αποτέλεσμα να απειλεί με διαφορετική ένταση κάθε σύστημα και κάθε στοιχείο που μελετάμε.

Η τρωτότητα (vulnerability) αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα αντίστασης στον κίνδυνο ή τη δυνατότητα προστασίας των στοιχείων του συστήματος έναντι του συγκεκριμένου

κινδύνου. Τέλος η διακινδύνευση (risk) είναι το μέγεθος του κινδύνου που τελικά πραγματικά απειλεί τα στοιχεία του συστήματος.

Με πιο επιστημονικούς όρους και μαθηματικές εκφράσεις οι όροι, κίνδυνος, τρωτότητα, έκθεση και διακινδύνευση περιγράφονται παρακάτω.

Ένα φυσικό φαινόμενο αποτελεί κίνδυνο αν υπερβεί μια ορισμένη οριακή τιμή (hazard threshold) (που μπορεί να μεταβάλλεται στον χρόνο). Από μια πλήρη χρονοσειρά του φαινομένου προκύπτουν οι τιμές που υπερβαίνουν αυτή την τιμή με αποτέλεσμα να προκύπτει μια μερική σειρά που περιλαμβάνει τα μεγέθη που αποτελούν απειλή δηλ. κίνδυνο. Στο Σχ. 6.1 παρουσιάζονται γραφικά οι χρονοσειρές ενός φαινομένου συνεχούς χρόνου και ενός φαινομένου διακριτού χρόνου αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση η μεταβλητή είναι συνεχής (π.χ. παροχή σε μια διατομή ενός υδατορεύματος) και στην δεύτερη η μεταβλητή είναι διακριτή (π.χ. ημερήσια ύψη βροχής). Και στις δύο περιπτώσεις φαίνονται οι τιμές και οι αντίστοιχοι χρόνοι που τα παραπάνω φυσικά φαινόμενα αποτελούν κίνδυνο (επίπεδο $x > x_0$). (Χαλικιάς, 2003 / Χατζηνικολάου, 2002)



Σχήμα 6.1: Χρονοσειρές του μεγέθους δύο φυσικών φαινομένων (α) συνεχούς μεταβλητής, (β) διακριτής μεταβλητής

Για την περιγραφή συνεπώς ενός φυσικού κινδύνου στην απλούστερη διακριτή προσομοίωση απαιτείται περιγραφή της στοχαστικής ανέλιξης που αναφέρεται στη μεταβλητή x ($x \geq x_0$) και τη χρονική τους διάρκεια. Για να καθοριστεί ορθολογικά η παραπάνω οριακή τιμή θα πρέπει να ελεγχθούν οι συνέπειες από μια γκάμα μεγεθών που έχουν διάφορες πιθανότητες υπέρβασης και έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στο σύστημα που εξετάζεται. Επομένως για μια σειρά σημαντικών μεγεθών κινδύνου θα πρέπει να

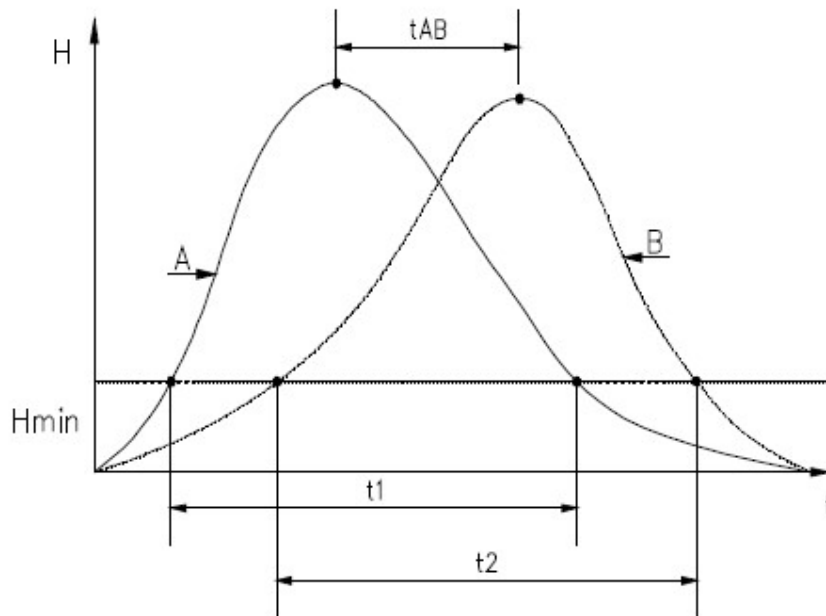
μελετηθούν οι επιπτώσεις που αφορούν στη ζωή, στην υγεία, στις περιουσίες, στις υποδομές, στις παραγωγικές διαδικασίες στην πολιτιστική κληρονομιά μιας περιοχής. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται στην εκτίμηση της τρωτότητας και της έκθεσης του συστήματος στον συγκεκριμένο κίνδυνο. Αν μείνουμε όμως στο κίνδυνο, θα πρέπει να προσδιορίσουμε ένα άλλο σημαντικό όριο, το όριο της ολικής καταστροφής (limit of total destruction) που αναφέρεται σε μεγέθη του φαινομένου πάνω από τα οποία προκαλείται η μέγιστη δυνατή καταστροφή. Συνεπώς ο κίνδυνος για ένα σύστημα μπορεί να περιγραφεί από μια χρονοσειρά μεγεθών διατεταγμένη στο χρόνο πάνω από ένα βασικό μέγεθος x_0 . Από την στατιστική ανάλυση αυτών των μεγεθών, σε κάθε μέγεθος μπορεί να αντιστοιχηθεί μια πιθανότητα υπέρβασης ή μια περίοδος επαναφοράς. Όμως ο προσδιορισμός αυτός δεν είναι επαρκής για την κατανόηση σε ποσοτικούς όρους της σπουδαιότητας/σοβαρότητας του αντίστοιχου μεγέθους. Αν και θεωρητικά ο κίνδυνος αναφέρεται σε απειλή και όχι σε επιπτώσεις πολλές φορές είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε τα μέγιστα (πιο δυσμενή) αποτελέσματα στην περίπτωση εκδήλωσης του κινδύνου με αυτό το μέγεθος σε ένα σύστημα χωρίς προστασία. Στην πραγματικότητα για τα μικρά μεγέθη του κινδύνου πρακτικά σε κάθε σύστημα δεν υπάρχουν επιπτώσεις ή οι επιπτώσεις είναι ελάχιστες. Συνεπώς ένα ελάχιστο επίπεδο προστασίας υπάρχει σε κάθε σύστημα. Όμως η ιδέα της εκτίμησης των μέγιστων δυνατικών επιπτώσεων (potential consequences) σε ένα απροστάτευτο σύστημα είναι ένα σημαντικό στοιχείο για ορθολογικές αποφάσεις σε σχέση με τα έργα και τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την αποτελεσματική του προστασία. Οι μέγιστες δυνητικές επιπτώσεις στο όριο της ολικής καταστροφής συχνά αναφέρονται στα ελληνικά ως διακύβευμα.

6.2. Παράμετροι που επηρεάζουν τις επιπτώσεις

Ο υπολογισμός των επιπτώσεων από κάθε μέγεθος κινδύνου είναι μια δύσκολη διαδικασία που απαιτεί καλή γνώση της εξέλιξης του φαινομένου, των χρήσεων γης, της έκθεσης του συστήματος στον κίνδυνο και της ανθεκτικότητας / αντοχής του συστήματος στον κίνδυνο. Σημαντικό ρόλο επίσης διαδραματίζει ο χρόνος (timing) που εκδηλώνεται ο κίνδυνος καθώς και η ύπαρξη σταθερών ή μεταβαλλόμενων συνθηκών αντοχής στο χρόνο (π.χ. γήρανση κατασκευών). (CANAH, 2006, 2007)

Πιο αναλυτικά η εξέλιξη του φαινομένου όπως είναι η πλημμύρα, χαρακτηρίζεται από την κατάκλυση ενός στοιχείου A με βάθη νερού που εξελίσσονται στο χρόνο όπως φαίνεται στο αντίστοιχο σχήμα. Σε ένα στοιχείο B κατάντη του A , η εξέλιξη της μεταβολής του βάθους κατάκλυσης παρουσιάζεται με μια μετατοπισμένη ως προς τον χρόνο καμπύλη (Σχ.

6.2).Ο χρόνος κατάκλυσης ,δηλαδή ο χρόνος που το νερό παραμένει στο στοιχείο A ή B με ένα βάθος μεγαλύτερο από το βάθος που δημιουργεί προβλήματα υπολογίζεται ως t_1 και t_2 αντίστοιχα. Τέλος κρίσιμο μέγεθος που επηρεάζει το μέγεθος των καταστροφών είναι και η ταχύτητα με την οποία διέρχεται η πλημμύρα. Η ταχύτητα αυτή αδρομερώς υπολογίζεται από την απόσταση των σημείων A και B που βρίσκονται στην κεντρική κατεύθυνση της πλημμύρας προς τον χρόνο διέλευσης του κύματος από το A στο B δηλαδή, $v = S_{AB}/t_{AB}$.



Σχήμα 6.2: Καμπύλη στάθμης – χρόνου σε ένα στοιχείο

Σε μελέτες των τελευταίων ετών ως αντιπροσωπευτική μεταβλητή θεωρείται το γινόμενο βάθους x ταχύτητα (δηλ. $h \times v$), ειδικά στην περίπτωση των απότομων πλημμυρών (flash floods) όπου ο χρόνος παραμονής είναι σχετικά μικρός. Πέρα από την επιλογή της παραμέτρου της πλημμύρας που επηρεάζει τις επιπτώσεις σημαντικό ρόλο στις επιπτώσεις παίζει η χρήση γης. Για δομημένες αστικές περιοχές οι επιπτώσεις αναμένεται να είναι μεγαλύτερες λόγω της αξίας της γης και των κτισμάτων της αστικής περιοχής. Η έκθεση ενός στοιχείου ενός συστήματος (π.χ. μιας ιδιοκτησίας) στον κίνδυνο πλημμύρας οφείλεται κυρίως στη θέση του στοιχείου στο χώρο, δηλαδή της απόστασης από την πηγή του κινδύνου (στην περίπτωσή μας την απόσταση από το ποτάμι) και του υψομέτρου σε σχέση πάντα με την πηγή κινδύνου. Είναι προφανές ότι η έκθεση εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της πλημμύρας αλλά και από τα τυχόν προστατευτικά μέτρα που έχουμε λάβει. Η

έκθεση στον κίνδυνο της πλημμύρας αποτελεί επίσης παράμετρο που μπορεί να διαφοροποιήσει τις επιπτώσεις. Για παράδειγμα για την αποφυγή θανάτων και τεράστιων ζημιών σε περιοχή κατάντη ενός φράγματος μπορεί ως εναλλακτική λύση να εξετάζεται η μετεγκατάσταση των κατοίκων σε υψηλότερα υψόμετρα ώστε να μην εκτίθενται στον κίνδυνο κατάκλυσης από ενδεχόμενη θραύση του φράγματος. Σημαντικό ρόλο στο ύψος των επιπτώσεων διαδραματίζει και ο χρόνος που συμβαίνει η πλημμύρα. Αν για παράδειγμα μια πλημμύρα συμβαίνει σε μια καλλιεργημένη έκταση τον Νοέμβριο ή Δεκέμβριο ενδεχομένως οι ζημιές να είναι πολύ μικρές. Αντίθετα αν μια πλημμύρα συμβεί την άνοιξη όταν οι περισσότερες καλλιέργειες έχουν καρπό οι ζημιές θα είναι πολύ μεγαλύτερες. Τέλος επίσης ρόλο στο ύψος των ζημιών διαδραματίζει η ηλικία των κατασκευών και η γήρανση των στοιχείων ενός συστήματος όπως και τα προστατευτικά έργα. Αν για παράδειγμα μια περιοχή προστατεύεται από αναχώματα αν αυτά παραμείνουν ασυντήρητα είναι προφανές ότι γίνονται πιο ευάλωτα σε σχέση με την αρχική τους αντοχή. Σύνυφασμένο με την τελευταία παρατήρηση είναι το γεγονός ότι ένα σύστημα πρέπει να θεωρείται ως δυναμική οντότητα που μεταβάλλεται στον χρόνο και επομένως οι εκτιμήσεις ζημιών ή γενικότερα των επιπτώσεων σ' αυτό από τις ενδεχόμενες πλημμύρες πρέπει να παίρνουν υπόψη κατά το δυνατόν τις κυοφορούμενες και μελλοντικές μεταβολές.

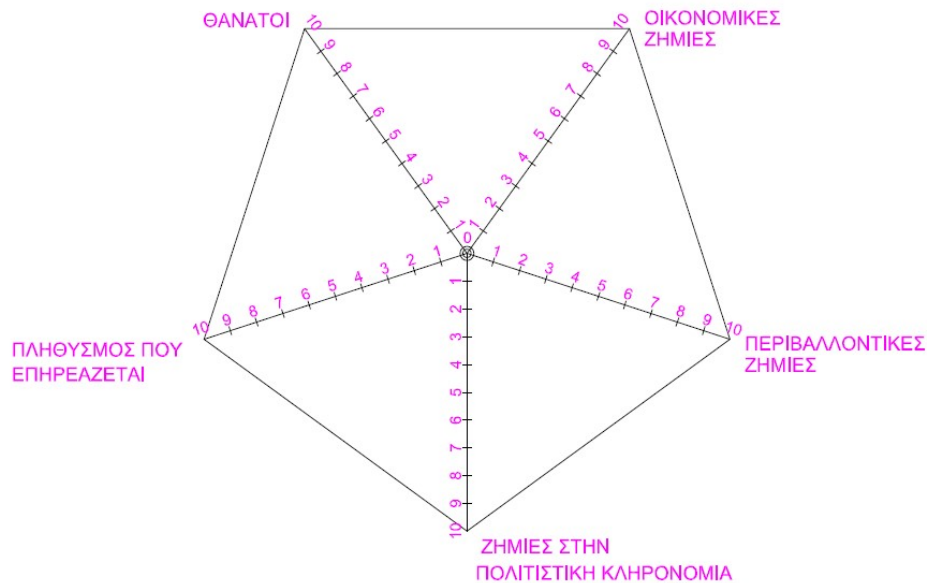
6.3. Κατηγορίες Οικονομικών Ζημιών

Οι οικονομικές ζημιές από πλημμύρες θα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες : οι άμεσες (direct) και οι έμμεσες (indirect). Οι άμεσες έχουν σχέση με τη φυσική επίδραση του νερού, ενώ οι έμμεσες δεν έχουν απόλυτη σχέση με το νερό. Οι άμεσες διακρίνονται επίσης σε μετρήσιμες (tangible) και μη μετρήσιμες (intangible). Οι μετρήσιμες αναφέρονται στα κτήρια, στις υποδομές, στη γεωργική παραγωγή και στα κεφαλαιουχικά αγαθά (κινητά και ακίνητα) κτλ. Οι μη μετρήσιμες αναφέρονται στην απώλεια ζώων , βλάβες στην υγεία, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επιπτώσεις στα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς.

Όμοια οι έμμεσες ζημιές διακρίνονται σε μετρήσιμες και μη μετρήσιμες. Στις μετρήσιμες έμμεσες περιλαμβάνονται πιθανές επιδράσεις σε γύρω περιοχές έξω από την περιοχή που κατακλύζεται. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η απώλεια χρόνου για επισκευές κλπ και η αναστάτωση των αγορών. Στις έμμεσες μη μετρήσιμες ανήκει η πιθανή μετανάστευση σε άλλες περιοχές, η μείωση της ανταγωνιστικότητας της περιοχής και η μεγέθυνση των κινδύνων στις οικονομικές δραστηριότητες.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για την εκτίμηση των ζημιών οι οικονομικές ζημιές αποτελούν ένα μέρος του όλου. Επιπλέον στην οικονομική ανάλυση συνήθως υπολογίζονται οι άμεσες μετρήσιμες οικονομικές ζημιές μια που πολλές άλλες κατηγορίες ζημιών δύσκολα ποσοτικοποιούνται. (Pistrika and Tsakiris, 2006)

Στο Σχ. 6.3 παρουσιάζονται γραφικά οι κατηγορίες ζημιών που προέρχονται από τις πλημμύρες με τη σπουδαιότερη όλων την απώλεια ζωών.



Σχήμα 6.3: Κατηγορίες ζημιών από πλημμύρες.

6.4. Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60

Προσπάθειες για την εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60 άρχισαν να εμφανίζονται σε διάφορες χώρες. Μία προσπάθεια εφαρμογής της Οδηγίας αυτής επιχειρήθηκε στην Ελλάδα σε ερευνητικό επίπεδο.

Η εφαρμογή εκτίμησης της έκτασης κατάκλυσης και των ζημιών από τις πλημμύρες έγινε πρόσφατα (2007) από Ερευνητικά Προγράμματα του Κέντρου Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων του ΕΜΠ (Πρόγραμμα DISMA, 2007). Η περιοχή εφαρμογής ήταν η λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας, της οποίας κύριο ρέμα (Ρέμα Βρανά) εκβάλλει στον όρμο του Μαραθώνα. Η λεκάνη απορροής έχει έκταση 35 km² και ιστορικά έχουν παρατηρηθεί πλημμύρες στο πεδινό τμήμα με τελευταία την πλημμύρα του Νοεμβρίου 2004. Πριν 15 χρόνια περίπου (2002) έχει κατασκευαστεί στην ορεινή ζώνη της λεκάνης ένα φράγμα αντιπλημμυρικής προστασίας για την συγκράτηση για λίγο χρόνο των νερών της πλημμύρας. Για την εκτίμηση της έκτασης κατάκλυσης αλλά και των βαθών του νερού

στα διάφορα σημεία της λεκάνης με βάση σενάρια ραγδαίων βροχών διαφόρων περιόδων επαναφοράς χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά υποβάθρα υψηλής ανάλυσης που προέκυψαν από έγχρωμες αεροφωτογραφίες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) που λήφθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2005 με κλίμακα 1:15000. Ο κάρναβος των σημείων του ψηφιακού υποβάθρου είχε πυκνότητα 25 m. Για την παραγωγή του ψηφιακού υποβάθρου χρησιμοποιήθηκαν 14 αεροφωτογραφίες σε τρεις επικαλυπτόμενες λωρίδες. Με φωτοερμηνεία διακρίθηκαν επτά κατηγορίες χρήσης γης:

1. Δομημένες περιοχές
2. Θερμοκήπια
3. Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
4. Δενδρώδεις καλλιέργειες
5. Δασικές περιοχές
6. Ακάλυπτες εκτάσεις – βραχώδεις εκτάσεις
7. Δρόμοι

Η εκτίμηση του κόστους των πλημμυρικών ζημιών έγινε με βάση τις τέσσερις πρώτες κατηγορίες χρήσης γης. Οι υδραυλικοί υπολογισμοί έγιναν για τρία σενάρια πλημμύρας με περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 έτη. Για κάθε σενάριο πλημμύρας έγιναν οι ακόλουθες εργασίες (CANAH, 2007 / Pistrika and Tsakiris, 2007):

1. Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού
2. Διόδευση πλημμύρας μέσω ταμιευτήρα
3. Μη μόνιμη διόδευση πλημμύρας μέσω τμήματος ποταμού
4. Χάρτης έκτασης περιβάλλουσας πλημμύρας σε περιβάλλον GIS

Τα αποτελέσματα σε σχέση με την περιβάλλουσα πλημμύρας αλλά και τα μέγιστα βάθη κατάκλυσης παρουσιάστηκαν σε ψηφιακούς χάρτες για κάθε περίοδο επαναφοράς.

Τέλος, όσον αφορά στην εκτίμηση των ζημιών χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις κόστους-ζημιών με ανεξάρτητη μεταβλητή το μέγιστο βάθος κατάκλυσης. Η εκτίμηση των οικονομικών ζημιών στηρίζεται σε διαφορετικές συναρτήσεις ανάλογα με τη χρήση γης. Κριτήριο – κατώφλι βάθους για τις διάφορες ζημιές χρησιμοποιήθηκε το βάθος των 30 cm. Ιδιαίτερα για τη γεωργία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συναρτήσεις για τις κατηγορίες : α) Κηπευτικές/ξηρικές καλλιέργειες, β) Δενδρώδεις καλλιέργειες, γ) Θερμοκήπια. Οι

συναρτήσεις προέκυψαν από εκτεταμένες συζητήσεις με ειδικούς επιστήμονες και ανθρώπους της περιοχής. Οι κατηγορίες οικονομικών ζημιών αναφέρονται στην οικονομική αποτίμηση των απευθείας μετρήσιμων ζημιών. Συνεπώς υπάρχουν πολλές άλλες δυνητικές επιπτώσεις οι οποίες δεν προσμετρήθηκαν. Όπως συμπεραίνεται από τη σύντομη παρουσίαση της εφαρμογής είναι προφανές ότι για την εκτίμηση της διακινδύνευσης στις πεδινές παράκτιες περιοχές, η οδηγία 2007/60 δημιουργεί μεγάλες απαιτήσεις σε γεωγραφικό υπόβαθρο, οικονομικά, δημογραφικά στοιχεία και άλλων δραστηριοτήτων, στοιχεία που είναι περιέχουν μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας και είναι κοστοβόρο να προσδιοριστούν, λαμβάνοντας ως μόνη παράμετρο αβεβαιότητας την περίοδο επαναφοράς. Αυτές οι απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα μεγάλες ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί στο σύνολο της χώρας.

6.5. Εκτίμηση της αξίας αστικών ακινήτων

Πριν προχωρήσουμε στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για τις αξίες των ακινήτων που εκτίθενται σε κίνδυνο από τις πλημμύρες, είναι σκόπιμο να καθορίσουμε τις κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται ο χώρος. Μια πρώτη διάκριση του χώρου τον χαρακτηρίζει ως αστικό, αγροτικό και δασικό. Σε κάθε κατηγορία επιτρέπονται μία σειρά από δραστηριότητες / βελτιώσεις ώστε ο χώρος να προσφέρει στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη κάθε περιοχής αλλά και στη διατήρηση καλών συνθηκών περιβάλλοντος. Με το δεδομένο ότι υπάρχει συνταγματική προστασία της χρήσης του δασικού χώρου ως ακίνητα του δασικού χώρου εννοούνται τα δασικά γεωτεμάχια με καθορισμένη και αποκλειστική χρήση. Αντίθετα τα ακίνητα του αστικού χώρου νοούνται ως συνδυασμός των αστικών γεωτεμαχίων (ή αστικών οικοπέδων) και τυχόν «βελτιώσεων» (κατασκευών) που μπορούν να αναπτυχθούν σύμφωνα με την κατά τόπους ισχύουσα πολεοδομική νομοθεσία. Τέλος τα ακίνητα του αγροτικού χώρου είναι τα αγροτικά γεωτεμάχια και αυτά με νόμιμες «βελτιώσεις» (δηλ. κατασκευές σύμφωνα με τα ισχύοντα για την εκτός σχεδίου δόμηση), ή μη νόμιμες.

Όπως έχει προαναφερθεί οι πλημμύρες απειλούν τόσο φυσικό όσο και το δομημένο περιβάλλον. Οι περιοχές του αστικού χώρου αναμφισβήτητα αποτελούν το μεγαλύτερο διακύβευμα από τον κίνδυνο των πλημμυρών. Το γεγονός αυτό προκύπτει από το υψηλό κόστους επίπεδο επενδύσεων στον αστικό χώρο. Οι αστικές περιοχές αποτιμώνται συνήθως σε τιμές πολλαπλάσιες αυτές των αγροτικών εκτάσεων. Η μεγάλη αξία των αστικών ακινήτων οφείλεται σε δύο παράγοντες: στην μεγάλη αξία της γης στον αστικό χώρο και στην μεγάλη αξία των πάσης φύσεως οικοδομημάτων.

Ο κίνδυνος πλημμύρας στις αστικές περιοχές είναι γενικά μεγαλύτερος λόγω του γεγονότος ότι οι επιφάνειες του αστικού χώρου είναι στην πλειονότητα τους αδιαπέρατες. Οι αδιαπέρατες αυτές επιφάνειες δημιουργούν μεγαλύτερους όγκους πλημμύρας (επομένως βάθος κατάκλυσης) και μεγαλύτερες ταχύτητες ροής.

Για τους παραπάνω λόγους κατά την εκτίμηση των ζημιών από τις πλημμύρες η έμφαση πρέπει να δίνεται στις αστικές περιοχές όπου οι ζημιές αναμένεται να είναι μεγαλύτερες.

6.5.1. Μέθοδοι εκτίμησης της αξίας των ακινήτων

Βασικές Αρχές

Η αγορά ακινήτων αποτελεί μια σύνθετη δραστηριότητα στην οποία συμμετέχουν πολλά συγγενή επαγγέλματα τα οποία αποσκοπούν στο να καθορίσουν τις τιμές των ακινήτων, να διευκολύνουν την πώληση / αγορά και να συντελέσουν στην οικονομική ανάπτυξη με τη βέλτιστη χρήση των ακινήτων. Μεταξύ των επαγγελματιών αυτού του χώρου βρίσκονται οι χαρτογράφοι (Αγρονόμοι και Τοπογράφοι Μηχανικοί) που προσδιορίζουν τη θέση και το μέγεθος των ακινήτων, οι εκτιμητές που εκτιμούν την αξία του ακινήτου, οι μεσίτες, οι developers, οι συμβολαιογράφοι, οι δικηγόροι και άλλοι. Για τον καθορισμό της αξίας ενός ακινήτου που αναφέρεται αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε στις επόμενες παραγράφους με α) τους τρόπους εκτίμησης της αξίας των ακινήτων β) με το χρόνο ζωής των ακινήτων και την υποτίμηση στο χρόνο. Για το λόγο αυτό θα διακρίνουμε κατηγορίες ακινήτων και θα αναφερθούμε και στα επιμέρους δικαιώματα κυριότητας.

Οι βασικές αρχές που διέπουν την εκτίμηση ενός ακινήτου είναι :

- i. η λειτουργία του νόμου προσφοράς – ζήτησης
- ii. το κόστος ευκαιρίας (αν δηλαδή υπάρχουν άλλες επενδύσεις που αποδίδουν περισσότερα)
- iii. η πρόβλεψη για την εξέλιξη της αξίας του ακινήτου στο μέλλον
- iv. η από ένα βαθμό και πάνω μείωση της απόδοσης
- v. η καλύτερη – δυνατή χρήση (και επομένως απόδοση)

Συμβατικές Μέθοδοι Εκτίμησης Αξίας Ακινήτων

Οι συμβατικές μέθοδοι εκτίμησης της αξίας των ακινήτων είναι τρεις (Ζεντέλης,2001) :

- α) Η συγκριτική μέθοδος ή μέθοδος αγοραίας αξίας

β) Η μέθοδος του κόστους αντικατάστασης

γ) Η μέθοδος εκτίμησης της παρούσας αξίας των εισοδημάτων

Οι τρεις αυτές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιούνται αυτοτελώς ή να συνυπάρχουν σε συνδυασμούς. Πιο αναλυτικά οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

α) Μέθοδος αγοραίας αξίας

Η μέθοδος αυτή κατά βάση στηρίζεται στη σύγκριση με άλλες παρόμοιες περιπτώσεις αγοράς αντίστοιχων ακινήτων (ίδια περιοχή, ίδια πλεονεκτήματα). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι η αξία της συναλλαγής δεν μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από μια αντίστοιχη περίπτωση ακινήτου γιατί ο αγοραστής θα κινηθεί προς την κατεύθυνση του φθηνότερου ακινήτου. Προυπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η αγορά να είναι ζωντανή και να υπάρχουν παραδείγματα εκτίμησης της αξίας όμοιων ακινήτων με παρεμφερή πλεονεκτήματα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η τεχνητή αλλοίωση των στοιχείων της αγοράς από παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις αγοραίες τιμές (π.χ. τεχνητή αύξηση της τιμής ορισμένων ακινήτων από μεγαλοεπιχειρηματίες μιας περιοχής)

β) Η μέθοδος του κόστους αντικατάστασης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην θεώρηση ότι η ζητούμενη αξία του ακινήτου προκύπτει από το πραγματικό κόστος ανακατασκευής κατά την περίοδο που γίνεται η εκτίμηση. Η μέθοδος χωρίζει την αξία του ακινήτου σε αξία της γης και αξία των επ' αυτού κατασκευών. Επιπλέον αφαιρεί την αξία υποτίμησης κυρίως των κατασκευών λόγω παλαίωσης (χρόνος και χρήση μετά την κατασκευή).

Η μέθοδος οδηγεί σε δίκαιη εκτίμηση της αξίας των ακινήτων στην περίπτωση αποζημίωσης λόγω κάποιας βλάβης. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία του ιδιοκτήτη να επαναφέρει την πρότερη κατάσταση του ακινήτου γιατί το κόστος αντικατάστασης δεν αρκεί για την πραγματική αντικατάσταση επειδή είναι πάντα χαμηλότερο από το απαιτούμενο κόστος που επαναφέρει το ακίνητο στην αρχική κατάσταση και όχι στην κατάσταση λίγο πριν τη βλάβη. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στις ασφαλιστικές εταιρείες επειδή μειώνει το κόστος αποζημίωσης.

Ιδιαίτερα όσον αφορά στην υποτίμηση (μείωση της αξίας) των κατασκευών, οι ασφαλιστικές εταιρείες την προσεγγίζουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια χωρίζοντας τις κατασκευές σε τμήματα όπου η παλαίωση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και επηρεάζει

διαφορετικά την τελική τιμή. Για παράδειγμα σε ένα κτήριο μπορεί να μελετηθεί διαφορετικά η επίδραση του χρόνου παλαιώσης για i) τον φέροντα οργανισμό (π.χ. υποστυλώματα, δοκοί, πλάκες από σκυρόδεμα) ii) τα οικοδομικά στοιχεία που διαμορφώνουν το κτήριο (τοίχοι, μάνια, κουφώματα) και iii) τις εγκαταστάσεις (υδραυλικές, ηλεκτρικές, θέρμανση κλπ).

γ) Η μέθοδος εκτίμησης της παρούσας αξίας των εισοδημάτων

Η μέθοδος στηρίζεται στη θεώρηση ότι το κάθε αστικό ακίνητο είναι ένα διαρκές αγαθό που προσφέρει τις υπηρεσίες του για μεγάλο χρονικό διάστημα (ή και για πάντα). Συνεπώς ένας τρόπος εκτίμησης θα ήταν να υπολογισθούν οι μελλοντικές ωφέλειες και να αναχθούν σε παρούσα αξία. Δηλαδή αν το ακίνητο προσφέρει στον ιδιοκτήτη εν είδει ενοικίου ένα ποσό ανά έτος (σταθερό ή μεταβαλλόμενο στο χρόνο)η λογική τιμή του ακινήτου θα ήταν ίση με το ποσό παρούσας αξίας που προκύπτει με την αναγωγή της χρηματοροής αυτής των εισοδημάτων. Βασική υπόθεση στη μέθοδο αυτή είναι η κατά βέλτιστο τρόπο (περισσότερο αποδοτικό) χρήση του ακινήτου.

Κρίσιμο θέμα στην εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί το χρονικό διάστημα που γίνεται η αναγωγή. Συνήθως αυτό το διάστημα αντιστοιχεί στην λεγόμενη «οικονομική ζωή του ακινήτου» (κυρίως του κτηρίου), δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η χρήση του έργου θα εκτελείται ανεμπόδιστα χωρίς η παλαιότητα να μειώνει την απόδοσή του. Κρίσιμο επίσης μέγεθος αποτελεί το επιτόκιο προεξόφλησης που χρησιμοποιείται στις αναγωγές. Ο καθορισμός διαφορετικού επιτοκίου από το πραγματικά αναμενόμενο μπορεί να οδηγήσει σε εντελώς λανθασμένες εκτιμήσεις. Τέλος, δεν πρέπει να λησμονείται και η υπολειμματική αξία μετά την περίοδο χρήσης (οικονομική ζωή) που πρέπει και αυτή να ανάγεται σε παρούσα αξία ($F \rightarrow P$).

ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Από τις τρεις μεθόδους γίνεται φανερό ότι καμία δεν είναι απολύτως κατάλληλη για τον υπολογισμό του διακυβεύματος το οποίο τελεί σε πλημμυρικό κίνδυνο. Εντούτοις η πλησιέστερη φαίνεται να είναι η δεύτερη που στηρίζεται στο κόστος αντικατάστασης. Σημαντικό ρόλο στην αξία ενός ακινήτου φαίνεται να διαδραματίζει η Τρίτη μέθοδος κυρίως ως προς το σκέλος της διαχρονικής εξέλιξης της αξίας του ακινήτου. Το τελευταίο κρίνεται απαραίτητο λόγω του γεγονότος ότι η ανάλυση καλύπτει ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα και επομένως η αξία των ακινήτων αλλά και του διακυβεύματος δεν μπορεί να

γίνεται για την αφετηρία της ανάλυσης, αλλά σε αντιπροσωπευτικό χρόνο στο διάστημα της ανάλυσης.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στα έργα που κατασκευάζονται από το Δημόσιο είναι αυτή της Οικονομικής Αξιολόγησης που χρησιμοποιεί λογιστικές τιμές και όχι αγοραίες τιμές. Για το λόγο αυτό και όσο αφορά στις οικονομικές ζημιές αυτές πρέπει να προκύπτουν κατά δυνατόν με τρόπους που να αποφεύγουν τις αγοραίες τιμές. Το κόστος αντικατάστασης και μάλιστα ως μέγεθος που μεταβάλλεται διαχρονικά παρουσιάζεται ως η πιο ενδεδειγμένη λύση στην εκτίμηση των αξιών των αστικών ακινήτων και του διακυβέματος. Είναι προφανές ότι το κόστος αντικατάστασης χρησιμοποιεί τιμές που ελάχιστα επηρεάζονται από τις συνθήκες προσφοράς και ζήτησης. Αντίθετα μπορεί σχεδόν πάντα να υπολογίζεται αυτό το κόστος με λογιστικές (σκιώδεις) τιμές όπως στην περίπτωση της κοστολόγησης των έργων.

Συμπερασματικά, χρησιμοποιώντας σκιώδεις τιμές προκύπτει το κόστος αντικατάστασης που μπορεί να συγκριθεί με το κόστος κατασκευής των αντιπλημμυρικών έργων, ως ομοειδείς ποσότητες. Επίσης οι οικονομικές ζημιές πρέπει να υπολογίζονται σε αντιπροσωπευτικές για την περίοδο που αναλύεται χρονικές στιγμές.

6.5.2. Παράδειγμα Εκτίμηση Διακυβέματος Αστικών Ακινήτων

Είναι φανερό ότι η αξία ενός ακινήτου που διατρέχει κίνδυνο από τις πλημμύρες εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του ακινήτου, την κατάσταση του κατά την έναρξη της περιόδου ανάλυσης αλλά και πολλούς άλλους παράγοντες που καθορίζουν την τρωτότητα του ακινήτου σε σχέση με τον κίνδυνο πλημμύρας.

Ως διακύβευμα ορίζουμε την αξία της δυνητικής καταστροφής σε ένα γεγονός πολύ μικρής πιθανότητας ή πολύ μεγάλης περιόδου επαναφοράς. Σε κάθε περίπτωση το διακύβευμα θα μπορούσε να προκύψει με βάση τα μέγιστα πλημμύρας που μπορούν να συμβούν σε μία περιοχή. Επειδή όμως δεν μπορεί να προσδιορισθεί αυτό το μέγιστο, αλλά ταυτόχρονα επειδή πρόκειται για ένα εντελώς σπάνιο γεγονός υποστηρίζουμε ότι το διακύβευμα πρέπει να προκύπτει από κάποια ιδιαίτερα μεγάλη περίοδο επαναφοράς ή πολύ μικρής πιθανότητας κατάκλυσης. Θεωρείται ότι το διακύβευμα προκύπτει για απώλεια αξίας με βάθος μεγαλύτερο του 1 m.

Ένας οδηγός για τον καθορισμό του διακυβέματος αποτελεί και η συνολική αξία του ακινήτου. Ένα σημαντικό μέρος αυτής της αξίας, που μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να πλησιάζει ολόκληρη την αξία του κτηρίου αποτελεί το διακύβευμα. Είναι συνεπώς

προφανές ότι η εκτίμηση του διακυβεύματος βρίσκεται μεταξύ της συνολικής αξίας του ακινήτου και ενός σημαντικού μέρους που αποτελεί την υπολειμματική του αξία.

Με βάση τα παραπάνω, το διακύβευμα αστικών ακινήτων ποικίλλει από 100% της αξίας τους για κτήρια ισόγεια (και υπόγεια), μέχρι το 50% για διώροφα και 1/3 για πολυώροφα. Η αξία των κτηρίων αναφέρεται στο κόστος ανακατασκευής και το κόστος όλου του εξοπλισμού που περιέχεται και θεωρείται αναπόσπαστο τμήμα του κτηρίου. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις έμπειρων μηχανικών για κάθε τετραγωνικό μέτρο κάλυψης οικοδομής (ισόγειο και υπόγειο) για το μισό του χρόνου ζωής ενός κτηρίου το διακύβευμα πλημμύρας προσεγγίζεται από το μισό της αξίας που υπολογίζεται :

Παράδειγμα: $2.500 * (3/2) * (1/2) - 0,10 * 2.500 = 1.625 \text{ €/m}^2$, (όπου ο συντελεστής 3/2 είναι ο συντελεστής προσαύξησης λόγω υπογείου, ο συντελεστής 1/2 είναι ο μειωτικός συντελεστής λόγω παλαιότητας και 0,10 επί της αρχικής αξίας είναι η υπολλειμματική αξία)

Συνεπώς το κόστος των αστικών ακινήτων ανέρχεται περίπου 1600000 €/στρ.

Επειδή η πλημμύρα δεν μπορεί να καταστρέψει ολοσχερώς το κτήριο οι μέγιστες ζημιές μπορούν να ανέλθουν μέχρι το μισό της παραπάνω αξίας δηλ. 800000 €/στρ.

6.6. Εκτίμηση αξιών βιομηχανικών, αγροτικών, δασικών εκτάσεων και κινητών αξιών.

Εκτός των ζημιών που προκαλούνται στα αστικά ακίνητα ζημιές προκαλούνται και σε πολλές άλλες κατηγορίες αξιών. Παρουσιάζεται η εκτίμηση των κινητών αξιών που σχετίζονται με τα αστικά ακίνητα, των βιομηχανικών και βιοτεχνικών εγκαταστάσεων, των υποδομών κοινής ωφέλειας, των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, των δασών και των δασικών εκτάσεων. Προσδιορίζεται η αξία αντικατάστασης για όλες τις ιδιωτικές αξίες, ενώ για τις αξίες ορισμένων κατηγοριών όπως οι υποδομές και οι δασικές εκτάσεις γίνεται προσπάθεια για τον προσδιορισμό της αξίας με άλλους συμβατικούς τρόπους. Ιδιαίτερα για τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις η εκτίμηση της αξίας αναφέρεται τόσο στη γεωργική γη όσο και στην αξία της παραγωγής που χάνεται σε ενδεχόμενο πλημμύρας.

Με βάση αυτή την προσέγγιση προκύπτει ότι οι αξίες όπως και στην περίπτωση των αστικών ακινήτων δεν είναι σταθερά μεγέθη αλλά διαφοροποιούνται σε σχέση με τον χρόνο. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπως στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις ο κίνδυνος καταστροφής της παραγωγής εξαρτάται απόλυτα από την περίοδο που συμβαίνουν οι πλημμύρες μέσα στο έτος.

KINHTEΣ AXIEΣ

Ως κινητές αξίες για τις ανάγκες αυτής της εργασίας ορίζουμε οποιοδήποτε περιουσιακό αντικείμενο το οποίο μπορεί να μεταφερθεί, μη αποτελώντας αναπόσπαστο τμήμα του ακινήτου. Με βάση αυτόν τον ορισμό κινητές αξίες που σχετίζονται με τα αστικά ακίνητα ή με άλλες κατηγορίες ακινήτων είναι: (α) ο οικιακός εξοπλισμός που μπορεί να μετακινηθεί, (β) ο κινητός εξοπλισμός για εμπορικές, βιοτεχνικές και βιομηχανικές επιχειρήσεις, (γ) τα πάσης φύσεως οχήματα, σκάφη, γεωργικά μηχανήματα κτλ.

Η ιδιαιτερότητα των κινητών αξιών σε σχέση με τα υπόλοιπα ακίνητα οφείλεται στο γεγονός ότι σε μεγάλο βαθμό μπορούν να προστατευθούν από επερχόμενη πλημμύρα εάν υπάρχει έγκαιρη προειδοποίηση και ο λεγόμενος κοινωνικός παράγων (γνώση, εκπαίδευση, διάθεση και ετοιμότητα) βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο.

Όσον αφορά στον οικιακό εξοπλισμό, παρά το γεγονός ότι μέρος του μπορεί να μεταφερθεί, εντούτοις σπάνια συντρέχουν οι προϋποθέσεις για τη μεταφορά πριν από την πλημμύρα. Επίσης δεν πρέπει να διαφεύγει της προσοχής μας ότι υπάρχει η τάση που θεωρεί ότι ο οικιακός εξοπλισμός αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του ακινήτου(π.χ.

εντοχισμένες συσκευές). Συνεπώς η εκτίμηση της αξίας του οικιακού εξοπλισμού παρά το γεγονός ότι υπολογίζεται χωριστά εντούτοις θεωρείται ως μέρος του ακινήτου, δεν μεταφέρεται και επομένως η ζημία αναφέρεται επί της αξίας του.

Η αξία του εξοπλισμού αυτού εξαρτάται από την αρχική αξία του εξοπλισμού, τον χρόνο που έχει παρέλθει από την αγορά του εξοπλισμού, από τον χρόνο λειτουργικής ζωής του και από την υπολειμματική του αξία. Οι υπολογισμοί αυτοί ακολουθούν τη διαδικασία υπολογισμού των χρηματοοικονομικών ροών (cash flow).

Όπως ο οικιακός εξοπλισμός έτσι και ο κινητός βιοτεχνικός ή βιομηχανικός εξοπλισμός δύσκολα μπορεί να μετακινηθεί πριν από την πλημμύρα. Επειδή όμως οι βιοτεχνικές ή βιομηχανικές μονάδες διαθέτουν οχήματα και προσωπικό, εάν υπάρχει έγκαιρη προειδοποίηση, τμήμα αυτού του εξοπλισμού μπορεί να απομακρυνθεί. Σημειώνεται ότι οι βιοτεχνικές ή βιομηχανικές μονάδες επειδή λειτουργούν συνήθως σε ισόγεια ή υπόγεια κινδυνεύουν συχνότερα και περισσότερο, γεγονός που συμβάλλει στην ετοιμότητα τους να αντιμετωπίσουν κινδύνους πλημμύρας. Συνεπώς κατά την καταγραφή του εξοπλισμού των μονάδων αυτών πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ κινητού και ακίνητου εξοπλισμού και να γίνεται η υπόθεση ότι μέρος του πιο ευαίσθητου κινητού εξοπλισμού μπορεί να απομακρυνθεί ή να τοποθετηθεί σε υψηλότερα σημεία ώστε να μην καταστραφεί.

Όσον αφορά στα οχήματα ιδιωτικής χρήσης, η καταστροφή τους από ενδεχόμενη πλημμύρα μπορεί να προκύψει μόνο εφόσον αφεθούν στην επικίνδυνη περιοχή ή βρεθούν να διέρχονται από την περιοχή αυτή κατά την εξέλιξη της πλημμύρας. Ανάλογα με την ώρα εκδήλωσης της πλημμύρας μπορεί να εκτιμηθεί ο αριθμός των αυτοκινήτων που παραμένουν ή διέρχονται από την περιοχή. Ένα αυτοκίνητο ιδιωτικής χρήσης ανατρέπεται ανάλογα με τον κυβισμό του και το ύψος των αξόνων των τροχών από το δάπεδο. Σύμφωνα με πρακτικούς υπολογισμούς για το αντικείμενο αυτό, τα ιδιωτικής χρήσης οχήματα ανατρέπονται αν η στάθμη του νερού υπερβεί 0,30 m για μικρά οχήματα και 0,50 έως 0,55 m για τα SUV (τύπου τζιπ). Η ανατροπή και η παράσυρση ενός αυτοκινήτου που βρίσκεται κάθετα στη ροή της πλημμύρας μπορεί να οδηγήσει στην κατακόρυφη μείωση της τιμής του μέχρι και στο επίπεδο υπολειμματικής αξίας που δεν ξεπερνά συνήθως το 10% της αρχικής του αξίας.

Τα γεωργικά μηχανήματα, τα οχήματα μεταφοράς επιβατών (πούλμαν) και τα φορτηγά συνήθως δεν θεωρούνται ότι μπορούν να υποστούν πολύ μεγάλες ζημιές ακόμη και αν βρεθούν σε κατακλυσμένη περιοχή. Συμπερασματικά ο κινητός εξοπλισμός των κτηρίων θεωρείται κατά βάση αναπόσπαστο μέρος των κτηρίων και συνεπώς συμπεριλαμβάνεται

στην αξία του κτηρίου αλλά και στο διακύβευμα που εκτίθεται στον κίνδυνο της πλημμύρας. Τη μόνη εξαίρεση μπορεί να αποτελέσουν βιομηχανικά εργαλεία και μηχανήματα που μπορούν να απομακρυνθούν έγκαιρα. Αυτοκίνητα ιδιωτικής χρήσης μπορούν να ανατραπούν και να καταστραφούν αν βρεθούν σε μεγάλα βάθη ροής (π.χ. 1 m). Ο υπολογισμός των αυτοκινήτων που βρίσκονται σε κίνδυνο υπολογίζεται με βάση τον πληθυσμό της περιοχής και το ποσοστό αυτοκινήτων ανά 1000 κατοίκους. Σήμερα αντιστοιχούν περί τα 500-600 αυτοκίνητα ανά 1000 κατοίκους ως μέσος όρος για την Ελλάδα. Ενδεχομένως αυτό το ποσοστό σε πεδινές αστικές περιοχές να είναι πολύ μεγαλύτερο και να πλησιάζει τα 1000 αυτοκίνητα ανά 1000 κατοίκους.

ΥΠΟΔΟΜΕΣ

Οι βασικές υποδομές μιας περιοχής αφορούν στις μεταφορές και τα δίκτυα κοινής ωφέλειας. Πιο αναλυτικά στις αστικές περιοχές στις υποδομές περιλαμβάνονται πάσης φύσεως δρόμοι (ασφαλτοστρωμένοι και μη), σιδηροδρομικές γραμμές, γέφυρες, σήραγγες, λιμάνια, χώροι στάθμευσης οχημάτων, χώροι αναψυχής (δημόσιοι κήποι, λίμνες κλπ.), δίκτυα ύδρευσης, δίκτυα αποχέτευσης, εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, δεξαμενές, δίκτυα ηλεκτρισμού, δίκτυα φυσικού αερίου κτλ.

Σε περίπτωση πλημμύρας ανάλογα με το μέγεθος της πλημμύρας και την τρωτότητα κάθε δικτύου προκαλούνται καταστροφές που στην ακραία τους εκδοχή μπορούν να προκαλέσουν ολική καταστροφή του δικτύου. Και εδώ όπως και προηγούμενα ως εκτίμηση της καταστροφής υπολογίζεται το κόστος της αντικατάστασης. Δυστυχώς είναι πολύ δύσκολο (αν και απαραίτητο) να προστεθεί στο κόστος αυτό το «κόστος» της όχλησης του κοινωνικού συνόλου κατά τη διάρκεια που το αντίστοιχο δίκτυο δεν θα λειτουργεί. Αξίζει να σκεφτεί κανείς την όχληση αλλά και την παρεμπόδιση κάθε δραστηριότητας από την πολυήμερη διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος σε μία πόλη.

Οι εκτιμήσεις των πιθανών ζημιών στα δίκτυα είναι εξειδικευμένο αντικείμενο και απαιτεί καλή τεχνολογική γνώση των δικτύων και των συνθηκών κάτω από τις οποίες προκαλούνται δυσλειτουργίες και βλάβες στα δίκτυα. Συνεπώς οι εκτιμήσεις των ζημιών πρέπει να προέρχονται από εξειδικευμένους επιστήμονες/μηχανικούς. Τέλος σε αγροτικές περιοχές οι υποδομές μπορεί να περιλαμβάνουν και αρδευτικά και στραγγιστικά δίκτυα που μπορεί να είναι και επιφανειακά. Επίσης στις αγροτικές περιοχές συναντώνται πάσης φύσεως φρεάτια δικτύων, αντλητικά συγκροτήματα και δεξαμενές.

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Σε μια οργανωμένη χώρα οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις βρίσκονται σε ειδικά χωροθετημένες περιοχές τις «βιομηχανικές ζώνες». Στις ζώνες αυτές επειδή συνήθως οι επενδύσεις είναι μεγάλες, υπάρχει μεγαλύτερη προστασία από τις πλημμύρες τόσο με προστατευτικά έργα αλλά κυρίως με την επιλογή των θέσεων αυτών των περιοχών ώστε να εκτίθενται λιγότερο στον κίνδυνο πλημμύρας. Στις βιομηχανικές περιοχές επίσης είναι πιο σύνηθες να τοποθετούνται συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (early warning systems) ώστε σε περίπτωση ενδεχομένου πλημμύρας να είναι δυνατή η απομάκρυνση των εργαζομένων, αλλά και η μετακόμιση μέρους του κινητού εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένων και των αυτοκινήτων. Αν και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις αντιμετωπίζονται διαφορετικά από τα άλλα αστικά ακίνητα (εκτίμηση γης, εκτίμηση κτηρίων, εκτίμηση εξοπλισμού και εγκαταστάσεων), η γενικότερη μέθοδος προσέγγισης της αξίας τους είναι η ίδια όπως και στα αστικά ακίνητα. Λόγω του μεγάλου ύψους των επενδύσεων στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αυτές κατά κανόνα ασφαλιζονται.

ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΓΑΙΕΣ

Στις αγροτικές γαίες περιλαμβάνονται αγροτεμάχια (καλλιεργούμενα ή μη, αρδευόμενα ή ξηρικά), μικρά αγροτικά σπίτια ή αποθήκες, βοσκότοποι καθώς και εκτάσεις χωρίς βλάστηση. Οι οικονομικές ζημιές είναι μεγαλύτερες για τις καλλιεργούμενες και κυρίως τις αρδευόμενες εκτάσεις λόγω της καταστροφής της παραγωγής αλλά και της καταστροφής των πάσης φύσεως εγκαταστάσεων (π.χ.αρδευτικό δίκτυο). Ιδιαίτερα μεγάλη αξία (και επομένως μεγάλο διακύβευμα) αντιστοιχεί στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες όπου το κόστος των επενδύσεων είναι μεγάλο ενώ οι αντίστοιχες κατασκευές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε κάθε μορφή κακοκαιρίας που συνήθως συνοδεύει τα μεγάλα ύψη βροχής και τις πλημμύρες.

Ιδιαίτερη σημασία για την εκτίμηση των επιπτώσεων από τις πλημμύρες διαδραματίζει το είδος της καλλιέργειας και ο χρόνος/εποχή που συμβαίνει μια πλημμύρα.

Για τον υπολογισμό της αξίας μιας γεωργικής γης με ρεαλιστικούς όρους η πιο κατάλληλη μέθοδος είναι η αναγωγή των ετήσιων καθαρών ποσών κέρδους (απόδοσης) σε παρούσα αξία. Η παρούσα αυτή αξία μπορεί να ανάγεται σε κάθε αντιπροσωπευτικό χρόνο στη διάρκεια της περιόδου που αναλύουμε.

ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ

Τα δάση και οι δασικές εκτάσεις παρά τα οφέλη που προσφέρουν στους ανθρώπους εντούτοις όταν αξιολογούνται οικονομικά θεωρούνται μηδενικής αξίας επειδή δεν προσφέρουν άμεσα δυνατότητες αξιοποίησης και οικονομικής ανάπτυξης ή παραγωγής πλούτου. Αυτός είναι και ο λόγος που δύσκολα μπαίνουν σε σύγκριση με άλλες μορφές ακινήτων που παράγουν οικονομικό αποτέλεσμα.

Αν θέλαμε να αξιολογήσουμε οπωσδήποτε μια δασική έκταση ο καλύτερος τρόπος είναι να εκτιμήσουμε την αξία της με βάση την αρχή της επιθυμίας μας να πληρώσουμε για να υπάρχει (willingness to pay principle). Το μέγεθος αυτό μπορεί να υπολογίζεται σε ετήσια βάση. Είναι προφανές ότι το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του. Δείχνει όμως το πόσο ευαίσθητη είναι μία κοινωνία στον κίνδυνο να απωλέσει βασικά υποστηρικτικά συστήματα που διαμορφώνουν συνθήκες καλής διαβίωσης.

6.6.1. Παράδειγμα Εκτίμησης Διακυβεύματος κινητών αξιών, υποδομών, βιομηχανικών εγκαταστάσεων, αγροτικών και δασικών εκτάσεων

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε θα επιχειρηθεί τώρα η εκτίμηση του διακυβεύματος έναντι των πλημμυρών για όλες τις κατηγορίες αξιών που αναπτύχθηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο. Όπως έχει εξηγηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια το διακύβευμα προσεγγίζεται με το μεγαλύτερο δυνατό ύψος ζημιών που μπορεί να προκληθεί από πλημμύρες.

Συνεπώς το διακύβευμα από πλευράς κινητών αξιών σε μια περιοχή που κινδυνεύει από πλημμύρες είναι οι αναμενόμενες καταστροφές στις κινητές αξίες (κυρίως αυτοκίνητα) όταν το βάθος κατάκλυσης ξεπερνά το 1 m. Με βάση τον μόνιμο πληθυσμό και τον αριθμό αυτοκινήτων ανά 1000 άτομα που υπάρχουν στην περιοχή εκτιμάται το μέγιστο αναμενόμενο κόστος ζημιών. Για ένα παράδειγμα 100 αυτοκινήτων με μέσο κόστος του κάθε αυτοκινήτου περίπου 25.000€ προκύπτει:

$100 \cdot (25,000 - 7,500 - 2,500) = 1,500,000 \text{ €}$ (αρχική αξία – μείωση τιμής λόγω παλαιότητας – υπολειμματική αξία).

Οι κινητές αξίες των βιομηχανικών εγκαταστάσεων θεωρείται ότι μπορούν να απομακρυνθούν έγκαιρα (οχήματα, κινητός εξοπλισμός). Όσον αφορά στις βιομηχανικές

εγκαταστάσεις αυτές απαιτούν ιδιαίτερο υπολογισμό με τεχνοκρατική γνώση. Επειδή οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις είναι ισόγειες και υπόγειες ο κίνδυνος πλημμύρας τις απειλεί με πολύ υψηλά ποσοστά της αξίας των κτηρίων και των μηχανημάτων που διαθέτουν. Συνεπώς οι πιθανές μέγιστες ζημιές είναι στα κτήρια και στο εμπόρευμα που διακινείται. Με εντελώς εμπειρική εκτίμηση το διακύβευμα τέτοιων εγκαταστάσεων (πολλών αποθηκών και λίγων βιομηχανικών) θεωρείται εμπειρικά ως 1,5 του διακυβεύματος των αστικών ακινήτων.

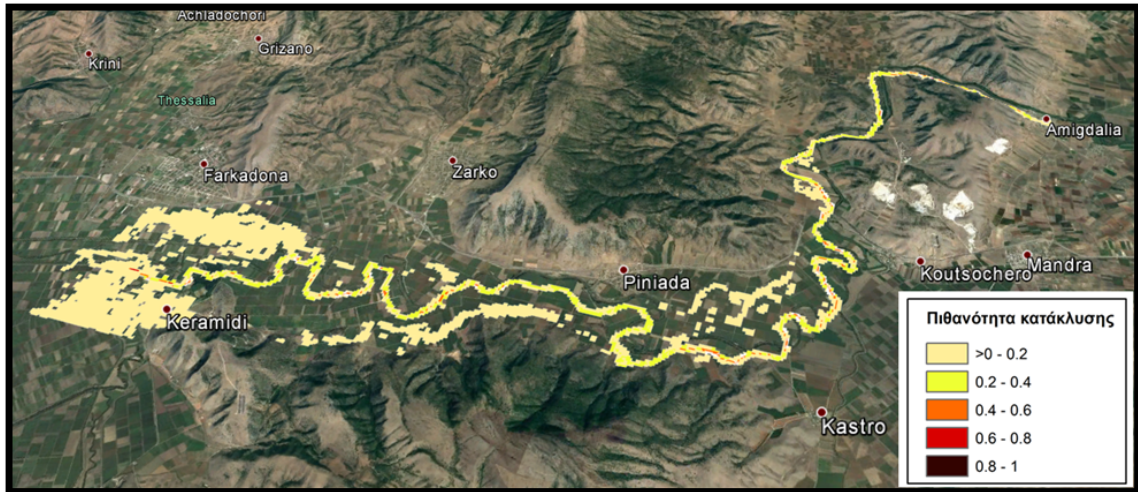
Οι πάσης φύσεως υποδομές δρόμοι, δίκτυα, έργα κοινής ωφέλειας κινδυνεύουν με ένα μικρό ποσοστό της αξίας τους που δεν ξεπερνά το 1/3 λόγω της ύπαρξης κατάκλυσης πάνω από 1 m.

Στις αγροτικές εκτάσεις (που ποικίλλουν λόγω των εγκαταστάσεων τους) διακύβευμα αποτελεί το σύνολο της παραγωγής καθώς και η αξία των εγκαταστάσεων. Μία μέση αξία της ετήσιας παραγωγής εκτιμάται για τις συνήθεις καλλιέργειες της περιοχής (π.χ. αμπέλια) μαζί με την τοκοχρεωλυτική δόση των εγκαταστάσεων κυμαίνεται από 300-400 €/στρέμμα.

Επειδή οι δασικές εκτάσεις και τα δάση δεν κινδυνεύουν ιδιαίτερα από τις πλημμύρες και παρά το γεγονός ότι υπάρχει τρόπος εκτίμησης της αξίας τους όπως παρουσιάστηκε το διακύβευμα λόγω πλημμυρών θεωρείται μηδενικό.

6.7. Εφαρμογή απλοποιημένης εκτίμησης ζημιών (post- event damage)

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των οικονομικών ζημιών από πλημμύρες που συνέβησαν από το 1973-1979 (post- event damage). Η διαδικασία έχει βασιστεί πάνω στο πιθανοτικό χάρτη που προέκυψε από την εφαρμογή του υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP, περιλαμβάνοντας και την αβεβαιότητα των παραμέτρων του ποταμού για βάθη ροής 1m. (Σχήμα 6.3)

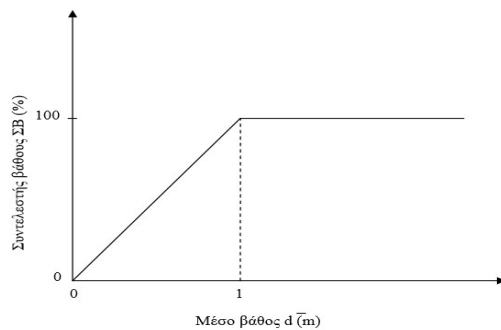


Σχήμα 6.4: Πιθανοτικός χάρτης κατάκλυσης για βάθη ροής 1m

Ο υπολογισμός των άμεσων ζημιών (Z) γίνεται για ζώνη εκατέρωθεν του τμήματος του ποταμού μήκους 1m κατά μήκος του. Ο υπολογισμός στηρίζεται αρχικά στην εκτίμηση του διακυβεύματος (D) σε νομισματικές τιμές ανά μονάδα εκτάσεως (π.χ. στρέμμα).

Η έκταση προσδιορίζεται από το πλάτος κατάκλυσης (W) της έκτασης που κατακλύζεται και στην οποία προκαλούνται οι κάθε λογής ζημιές.

Τέλος στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται και ο συντελεστής μέσου βάθους (ΣΒ ή F)



Σχήμα 6.5: Ο συντελεστής βάθους σε συνάρτηση με το μέσο βάθος κατάκλυσης

Η εξίσωση εκτίμησης των άμεσων οικονομικών ζημιών ανά μέτρο μήκους του ποταμού είναι:

$$z_1 = D * \left(\frac{W * 1}{1000} \right) * F \quad (18)$$

όπου z_1 : €/m μήκους ποταμού, D: €/στρέμμα, W: m πλάτος κατάκλυσης, F: αδιάστατος συντελεστής μέσου βάθους

Τέλος το συνολικό ύψος των ζημιών υπολογίζεται:

$$Z = z_1 \times L \quad (19)$$

Όπου L το μήκος του ρέματος σε m για όλο το μήκος του ρέματος που αναλύεται.

Είναι προφανές ότι το ύψος των ζημιών αυξάνει όσο το σενάριο της πλημμύρας γίνεται πιο ακραίο.

Συνεπώς για μια σειρά σεναρίων που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες πιθανότητες κατάκλυσης όπως προσδιορίστηκαν από τον πιθανοτικό χάρτη, μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις των ζημιών που προέρχονται από κάθε τέτοιο σενάριο.

Για κάθε κλάση πιθανοτήτων έγιναν οι υπολογισμοί για τις άμεσες ζημιές για ζώνη εκατέρωθεν του τμήματος του ποταμού μήκους 1m κατά μήκος του. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 6.1.

Πιθ. κατάκλυσης	D(€/στρέμμα)	W(m)	F	z(€/m μήκος)	L(m)	Z(€)
0.8-1	400	0	100%	0	0	€ 0.00
0.6-0.8	400	50		20	20,000	€ 400,000.00
0.4-0.6	400	75		30	40,000	€ 1,200,000.00
0.2-0.4	400	125		50	40,000	€ 2,000,000.00
>0-0.2	400	150		60	40,000	€ 2,400,000.00

Πίνακας 6.1: Υπολογισμός των άμεσων ζημιών κατά μήκος του ποταμού.

Σημείωση:

1. Πιθανότητα κατάκλυσης 0.8–1: Μηδενική ζημιά, διότι δεν εμφανίζεται στο πιθανοτικό χάρτη κατάκλυσης.

2. Πιθανότητα κατάκλυσης 0.6 – 0.8: Υπολογίζεται βάση των άμεσων ζημιών που προκύπτουν κατά μήκος του ποταμού. Τυπική τιμή για D είναι 400€/στρέμμα και το πλάτος κατάκλυσης W είναι 50m όπως φαίνεται από το πιθανοτικό χάρτη. Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες τιμές πιθανότητας κατάκλυσης δεν εμφανίζονται σε ολόκληρο το μήκος του ποταμού, αλλά περίπου στο 50% αυτού.

Σύμφωνα με αυτά που αναλύθηκαν στις υποενότητες 6.5.2 και 6.6.1 του παρόν κεφαλαίου γίνεται ο υπολογισμός του διακυβεύματος των αστικών ακινήτων, των κινητών αξιών και των γεωρικών εκτάσεων.

Όπως, μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε από το πιθανοτικό χάρτη κατάκλυσης για βάθος 1m., η μόνη περιοχή που δύναται να πλημμυρίσει είναι ο οικισμός Κεραμίδι. Το Κεραμίδι είναι χωρίο του νομού Μαγνησίας χτισμένο στις πλαγιές του Μαυροβουνίου,

βόρεια του Πηλίου σε υψόμετρο 300 μέτρων και ο πληθυσμός του είναι 325 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή του 2011.



Σχήμα 6.6: Οικισμός Κεραμιδίου (πηγή: Google Earth)

Με τη βοήθεια των δορυφορικών εικόνων της περιοχής, μπορούμε να προσδιορίσουμε προσεγγιστικά το εμβαδό κατάκλυσης του οικισμού, που ανέρχεται σε $A = 236$ στρέμματα.

Χρησιμοποιώντας μια μέση τυπική τιμή της αγοραστικής αξίας της περιοχής που κυμαίνεται από 700 – 1,500€, υπολογίζουμε το διακύβευμα του οικισμού.

$$Z_0 = 1,000\text{€/τ.μ.} \cdot (3/2) \cdot (1/2) - 0.10 \cdot 1,000 = 650\text{€/τ.μ. και } A: 236,000\text{τ.μ.}$$

Τελικώς, προκύπτει ότι για την έκταση κατάκλυσης το διακύβευμα ανέρχεται σε:

$$Z_0 \cdot A = 153,400,000\text{€} \cdot 50\% = \mathbf{76,700,000\text{€}}.$$

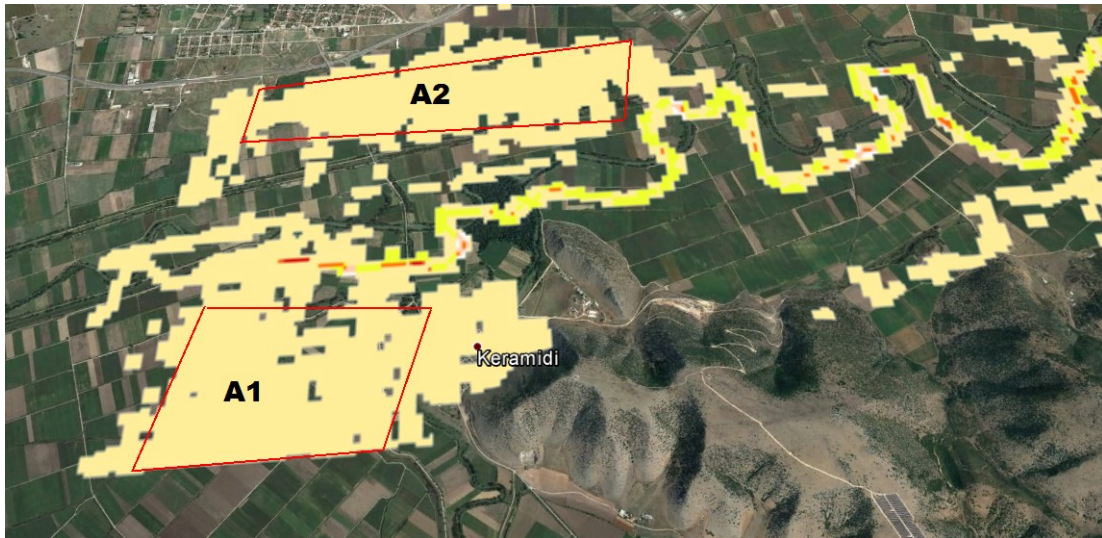
Όσο αφορά την εκτίμηση του διακυβεύματος λόγω κινητών αξιών, να σημειωθεί ότι υπολογίζεται μόνο η αξία των αυτοκινήτων, διότι οι υπόλοιπες κινητές αξίες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω έλλειψης πληροφοριών. Όπως αναφέρθηκε και στη σχετική υποενότητα, στην Ελλάδα αντιστοιχούν 500-600 αυτοκίνητο ανά κάτοικο. Αυτό όμως μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 100% σε πεδινές περιοχές. Με βάση αυτή την παραδοχή, θεωρούμε ότι τα αυτοκίνητα του οικισμού Κεραμιδίου είναι 325, όσοι και οι μόνιμοι κάτοικοι του.

Η μέση τιμή αξίας ενός αυτοκινήτου θεωρήθηκε προσεγγιστικά 25,000€.

Υπολογισμός διακυβέματος κινητής αξίας:

$$325 * (25,000 - 7,500 - 2,500) = 4,875,000\text{€}.$$

Για τον υπολογισμό του διακυβέματος των γεωργικών γαιών που κατακλύζονται (κίτρινη ζώνη), υπολογίζονται οι πιθανές εκτάσεις κατάκλυσης προσεγγιστικά με τη βοήθεια του Google Earth. Οι εκτάσεις κατάκλυσης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.7: Περιοχές κατάκλυσης A1 έκτασης 1,800στρ. και A2 έκτασης 2,352στρ.

Υπολογισμός διακυβέματος γεωργικών γαιών

A₁ έκταση 1,800στρ

A₂ έκταση 2,352στρ

Και αντίστοιχα:

$$Z_1 = 400\text{€/στρ} * 1,800\text{στρ} = 720,000\text{€}$$

$$Z_2 = 400\text{€/στρ} * 2,352\text{στρ} = 940,800\text{€}$$

Τελικώς, τα συνολικά κόστη των ζημιών, άμεσων και διακυβέματος αστικών, κινητών και γεωργικών αξιών, συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα 6.2.

Πιθ. κατάκλυσης	Z(€) - Άμεσες	Z(€) - Αστικές	Z(€) - Κινητές	Z(€) - Γεωργικές	Συνολικές Z(€)
0.8-1	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00
0.6-0.8	€ 400,000.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 400,000.00
0.4-0.6	€ 1,200,000.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 1,200,000.00
0.2-0.4	€ 2,000,000.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 2,000,000.00
>0-0.2	€ 2,400,000.00	€ 76,700,000.00	€ 4,875,000.00	€ 1,660,800.00	€ 85,635,800.00

Πίνακας 6.2: Αναλυτικός πίνακας οικονομικών ζημιών και αθροιστικά οι συνολικές.

7. Συμπεράσματα

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας που εξάγονται από τα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης υπόκεινται σε πολλές αβεβαιότητες, οι οποίες συνήθως αμελούνται. Μερικές από τις πιο αβέβαιες παραμέτρους μοντελοποίησης πλημμύρας που συχνά παραμελούνται ή υπάρχουν για αυτές ανεπαρκείς μετρήσεις είναι η γεωμετρία του ποταμού (πλάτος και βάθος καναλιού) και ο συντελεστής τραχύτητας. Ενώ η γεωμετρία του ποταμού λαμβάνεται συνήθως από ένα αδρό DEM, ο συντελεστής τραχύτητας Manning, στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται ως σταθερός για όλο το μήκος του ποταμού.

Από τη παρούσα διπλωματική εργασία, όπου έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση στην αβεβαιότητα των πλημμυρών προέκυψε ότι η αβεβαιότητα που προέρχεται από πηγές που σχετίζονται με το ποτάμι, τον κύριο αγωγό της ορμής, είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά σε περιπτώσεις περιορισμένων μετρήσεων ή ανεπαρκών πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία του ποταμού και το υλικό της επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι από την ανάλυση αβεβαιότητας σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές, προέκυψε ότι η παροχή φαίνεται να παρουσιάζει μακροπρόθεσμη εμμονή (long-term memory), καθώς εμφανίζει συντελεστή Hurst 0.83, όπου φαίνεται η «μνήμη» της χρονοσειράς, δηλαδή, η τάση της να εμφανίζει ακραίες τιμές σε ομάδες καθώς μια μεγάλη τιμή έχει μεγάλη πιθανότητα να ακολουθείται από μια μεγάλη τιμή και το αντίστοιχο για μικρότερες τιμές, ακόμη και για μεγάλη χρονική υστέρηση. Ως εκ τούτου, προκύπτει το συμπέρασμα ότι μια προτεινόμενη πρακτική θα μπορούσε να είναι πάντα η πραγματοποίηση στοχαστικών προσομοιώσεων για όλες τις παραμέτρους που περιλαμβάνονται στο πλαίσιο των κινδύνων πλημμύρας, αλλά ειδικά για αυτούς που σχετίζονται με το δίκτυο ποταμού (όπως το πλάτος, το βάθος και την τραχύτητα).

Στο πλαίσιο της οικονομικής ανάλυσης που αφορά και την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας, παρατηρήθηκε ότι από μία πιθανή πλημμύρα, με πιθανότητα κατάκλυσης μεγαλύτερη από 0.6, δεν θα μπορούσαν να υποστούν ζημιές κατοικημένες περιοχές. Αντιθέτως, οι γεωργικές εκτάσεις θα υποστούν σοβαρές καταστροφές και σε μεγαλύτερο βαθμό επηρεάζονται οι μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν και το υψηλότερο ποσοστό της περιοχής μελέτης και οι σύνθετες καλλιέργειες. Επίσης, οι βιομηχανικές μονάδες βρίσκονται εκτός της κατακλυζόμενης περιοχής.

Όπως ήταν αναμενόμενο από την ανάλυση αβεβαιότητας προέκυψε ότι όσο μειώνεται η πιθανότητα κατάκλυσης, τόσο αυξάνεται το κόστος των ζημιών από τις πλημμύρες, (δηλ. σε πιο σπάνιες περιπτώσεις πλημμυρών που συνέβησαν κατά τη διάρκεια των έξι χρόνων είχαμε ζημιές που σε σημερινές συνθήκες έφταναν την αξία των 85εκ. Ευρώ).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία γρήγορης εκτίμησης των οικονομικών ζημιών και της πλημμυρικής διακινδύνευσης μιας παραποτάμιας περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτικές προσεγγίσεις στην κατεύθυνση των εργασιών που προβλέπονται με βάση την Οδηγία 2007/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις πλημμύρες. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης σε χρηματικές μονάδες, που περιλαμβάνει την στοχαστική εξέλιξη των πλημμυρών σε μία περιοχή αλλά και το διακύβευμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύριο οικονομικό κριτήριο για την ιεραρχική κατάταξη των περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες. Με τον τρόπο αυτό η πολιτεία θα μπορεί να ιεραρχήσει τις ανάγκες της από πλευράς έργων που απαιτούνται για την προστασία από τις πλημμύρες.

Είναι προφανές ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία προτείνεται και ισχύει για τις περισσότερες συνθήκες πλημμυρών από ρέματα και ποταμούς. Υπάρχουν όμως και περιορισμοί αλλά και θέματα που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση. Οι βασικές δυσκολίες και αδυναμίες εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζονται:

- 1) όταν οι συνθήκες δόμησης και χρήσεων γης είναι εντελώς διαφορετικές κατά μήκος του ποταμού ώστε να μην μπορεί να επιλεγεί ένα μικρό τμήμα που να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα του
- 2) όταν οι κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες, η δόμηση και γενικότερα οι χρήσεις γης για το μέλλον δεν μπορούν να προβλεφθούν με κάποια στοιχειώδη σιγουριά
- 3) όταν η μακροχρόνια οικονομική ανάλυση ζημιών εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά τα οικονομικά μεγέθη
- 4) η μεθοδολογία υποτιμά τις ζημιές από τις πλημμύρες αφού αρκείται στον προσδιορισμό μόνο των άμεσων οικονομικών ζημιών. Οι άλλες επιπτώσεις (μετρήσιμες ή μη) μπορεί να είναι πολύ πιο σημαντικές χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι λόγω των αβεβαιοτήτων που αναφέρθηκαν σε όλα τα πεδία απαιτείται ένα σύγχρονο πλαίσιο σε επιστημονικό – τεχνολογικό επίπεδο για τη μελέτη του φαινομένου και την ορθότερη πρόβλεψη του.

8. Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ελληνικές Βιβλιογραφικές Αναφορές

Αναγνωστοπούλου Ε., 2013 *Πλημμυρική Επικινδυνότητα στη Δυτική Θεσσαλία, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.*

Ε.Κ., 2000. *Οδηγία 2000/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. 22.12.2000. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. L 327, 1 – 72*

Ε.Κ., 2007. *Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 6.11.2007: L 288: 27 - 34.*

Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία , Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*

Κουτσογιάννης Δ., *Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*

Κουτσογιάννης, Δ., Σ. Ρώτη, Ι. Τζεράνης, και Θ. Ξανθόπουλος, 1988. *Πλημμύρες σχεδιασμού, Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, Τεύχος 4, 107 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*

Λέκκας, Ε., 2009, *Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές - Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης στελεχών τοπικής αυτοδιοίκησης, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.*

Μαμάσης, Ν., *Πλημμύρες, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, 2013. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.*

Οικονόμου, Α., 2013. *Διερεύνηση λειτουργίας λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης στην εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης. Εφαρμογή στην πεδιάδα της Θεσσαλίας, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.*

Παγανά, Β., 2012. *Κατάρτιση Χαρτών Πλημμύρας στην Περιοχή της Ραφήνας, Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων», Αθήνα.*

Τσακίρης Π., 2009. *Εκτίμηση οικονομικών ζημιών από πλημμύρες. Μελέτη περίπτωσης: Διευθέτηση ρέματος Ραφήνας, Εθνικό Μετσόβιο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.*

Ξενόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές

Bates, P.D., and De Roo, A.P.J., 2000, *A simple raster-based model for flood inundation simulation, Journal of Hydrology*

Di Baldassarre, G., and Montanari, A., 2009, *Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis, Hydrol. Earth Syst.*

Dimitriadis P., Tegos A., Petsiou A., Pagana V., Apostolopoulos I., Vassilopoulos E., Gini M., Koussis A., Mamassis N., Koutsoyiannis D. and Papanicolaou P., *Flood Directive implementation in Greece; Experiences and future improvements (in review), 2017.*

Dimitriadis P., Aristoteles Tegos, Athanasios Oikonomou, Vassiliki Pagana, Antonios Koukouvinos, Nikos Mamassis, Demetris Koutsoyiannis, Andreas Efstratiadis, 2016, *Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping, Journal of Hydrology January 2016.*

Domeneghetti A., S. Vorogushyn, A. Castellarin, B. Merz, and A. Brath, 2016, *Probabilistic flood hazard mapping: effects of uncertain boundary conditions, EGU Conference 2016.*

Efstratiadis A., Antonis Koukouvinos, Panayiotis Dimitriadis, Aristoteles Tegos, Nikos Mamassis & DemetrisKoutsoyiannis, 2013, *(Towards) a stochastic simulation framework for flood engineering, 5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13 Kos Island, Greece.*

Fuentes–Andino D., Keith Beven, Sven Halldin, Chong–Yu Xu, José Eduardo Reynolds and Giuliano Di Baldassarre, 2016, *Reproducing an extreme flood with uncertain post–event information, EGU Conference 2016.*

Horritt, M. S., & Bates, P. D., 2002, *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation, Journal of Hydrology.*

National Cooperative Highway Research Program, Michel Ghosn, Fred Moses and Jian Wang, 2003, *Design of Highway Bridges for Extreme Events*, ,City College City University of New York New York, NY.

Oikonomou, A., Dimitriadis, P., Koukouvinos, A., Tegos, A., Pagana, V., Panagopoulos, P., Mamassis, N., and Koutsoyiannis, D., 2013, *Floodplain mapping via 1D and quasi-2D numerical models in the valley of Thessaly, Greece. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, Vienna, EGU2013-10366, European Geosciences Union.*

Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., Aronica, G.T., 2016, *Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach, Natural Hazards.*

Tsakiris, G., Nalbantis, I, Pistrika, A., 2009, *Critical Technical issues on the EU flood directive. Eur Water.*

Tsakiris, G, Bellos, V., 2014, *A numerical model for two-dimensional flood routing in complex terrains. Water Resour. Manag.*