



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

---

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΜΕΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΖΗΜΙΑΣ  
ΣΕ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

---

ΑΙΜΙΛΙΑ Κ. ΠΙΣΤΡΙΚΑ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΤΟΜΟΣ Ι

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

---

---

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΜΕΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΖΗΜΙΑΣ  
ΣΕ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

---

---

ΛΙΜΙΛΙΑ Κ. ΠΙΣΤΡΙΚΑ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΤΟΜΟΣ Ι

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2010





## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	i
Summary.....	i
<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>1-2</b>
<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1-2</b>
Τοποθέτηση του προβλήματος.....	1-2
Διάρθρωση της διατριβής.....	1-2
Πρωτότυπα σημεία - Δημοσιεύσεις.....	1-6
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>2-1</b>
<b>Πλημμυρική ζημιά.....</b>	<b>2-1</b>
Πλημμυρική ζημιά: ορισμός και προσδιορισμοί.....	2-1
Κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς.....	2-3
Άμεση, μη αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά.....	2-6
Έμμεση, αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά.....	2-7
Έμμεση, μη αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά.....	2-8
Παράμετροι ανάλυσης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.....	2-9
Μέτρηση.....	2-10
Τύπος κλίμακας.....	2-10
Κατηγορία πλημμύρας.....	2-11
Στοιχείο δομημένου περιβάλλοντος.....	2-12
Κλίμακα χωρικής ανάλυσης.....	2-12
Μονάδα μέτρησης.....	2-15
Δομική και μη δομική άμεση πλημμυρική ζημιά.....	2-15
Ελληνική πραγματικότητα.....	2-16
Διεθνής χώρος.....	2-17
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>2-1</b>
<b>Πλημμυρική διακινδύνευση.....</b>	<b>2-1</b>

Κίνδυνος, διακινδύνευση, τρωτότητα λόγω πλημμύρας .....	2-2
Ορισμοί.....	2-2
Σχέση μεταξύ τρωτότητας και πλημμυρικής ζημιάς.....	2-7
Σχέση μεταξύ τρωτότητας και αντίληψης της πλημμυρικής διακινδύνευσης .....	2-8
Αποσαφήνιση όρων σχετικών με την πλημμυρική διακινδύνευση.....	2-8
Μεθοδολογία ανάλυσης πλημμυρικής διακινδύνευσης.....	2-10
Κρίσιμα σημεία στην εφαρμογή της μεθοδολογίας.....	2-12
Αβεβαιότητα στην ανάλυση της διακινδύνευσης.....	2-13
Κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ.....	2-15
Αδυναμίες στην εφαρμογή της νέας Οδηγίας.....	2-16
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>2-1</b>
<b>Βιβλιογραφική επισκόπηση στις μεθόδους εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον</b> .....	<b>2-1</b>
Επισκόπηση βιβλιογραφίας.....	2-2
Μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς .....	2-8
Περιγραφή της μεθόδου καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς .....	2-9
Ακρίβεια αποτελεσμάτων .....	2-13
Καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς.....	2-15
Μέθοδοι ποιοτικής εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον .....	2-17
Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	2-18
Κριτήριο ζημιάς κατά Clausen.....	2-22
Λοιπές μέθοδοι εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον .....	2-23
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>5-1</b>
<b>Μηχανισμοί πρόκλησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου .....</b>	<b>5-1</b>
Δράσεις πλημμύρας.....	5-2
Υδροστατικές δράσεις.....	5-2
Υδροδυναμικές δράσεις.....	5-3
Δράση δύναμης άνωσης.....	5-5

Λοιπές δράσεις πλημμύρας .....	5-5
Συνάφεια πλημμυρικών δράσεων στην εκτίμηση άμεσης ζημιάς σε κτήριο .....	5-7
Μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων κτηρίου βάσει πλημμυρικών δράσεων.....	5-8
Αστοχία από ρηγμάτωση ανοίγματος.....	5-9
Αστοχία από ανατροπή δομικού στοιχείου.....	5-10
Αστοχία από επίπλευση κτηρίου .....	5-12
<b>Κεφάλαιο 6.....</b>	<b>6-1</b>
<b>Πλημμυρικό μοντέλο .....</b>	<b>6-1</b>
Πλημμυρικά μεγέθη.....	6-2
Βάθος νερού.....	6-2
Γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής.....	6-3
Ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης.....	6-4
Σενάρια πλημμύρας.....	6-4
Δεδομένα εισόδου .....	6-5
Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).....	6-5
Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης .....	6-6
Μοντέλα προσομοίωσης πλημμύρας.....	6-6
Μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής.....	6-6
Μοντέλα μονοδιάστατης (1D) προσομοίωσης .....	6-8
Μοντέλα μονοδιάστατης/διδιάστατης (1D/2D) προσομοίωσης .....	6-10
Μοντέλο προβολής πλημμυρικής προσομοίωσης σε περιβάλλον ΓΣΠ.....	6-11
Αξιοπιστία αποτελεσμάτων προσομοίωσης πλημμύρας.....	6-11
Μέτρα απόδοσης των μοντέλων πλημμύρας .....	6-13
<b>Κεφάλαιο 7.....</b>	<b>7-1</b>
<b>Μεγέθη πλημμύρας και ζημιάς και ανάλυση της σχέσης μεταξύ τους: Μοντέλο ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.....</b>	<b>7-1</b>
Μοντέλο ζημιάς .....	7-4
Κλίμακα χωρικής ανάλυσης.....	7-5

Μέθοδος σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς.....	7-8
Μέθοδος κριτηρίου ζημιάς .....	7-11
Αποτίμηση δεδομένων άμεσης ζημιάς.....	7-11
Αξία ακινήτου .....	7-11
Ποσοστό ζημιάς.....	7-12
Επεξεργασία δεδομένων .....	7-13
Στατιστική περιγραφή.....	7-13
Πρωτογενής επεξεργασία .....	7-13
Εξομάλυνση δεδομένων .....	7-14
Έλεγχος κανονικότητας δεδομένων .....	7-15
Μέθοδος bootstrapping .....	7-16
Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς.....	7-18
Επιλογή τύπου και προσαρμογή συνάρτησης κατανομής.....	7-18
Έλεγχος καταλληλότητας της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής.....	7-21
Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας αποτελεσμάτων πρόγνωσης.....	7-23
Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ .....	7-24
Υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς σε ΓΣΠ.....	7-25
Μοντέλο ζημιάς στο πλαίσιο εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης .....	7-26
<b>Κεφάλαιο 8.....</b>	<b>8-1</b>
<b>Δεδομένα άμεσης ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Αττική .....</b>	<b>8-1</b>
Γενική πληροφορία.....	8-2
Πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης.....	8-2
Πηγή προέλευσης δεδομένων άμεσης ζημιάς.....	8-3
Δομημένο περιβάλλον.....	8-4
Βάση δεδομένων άμεσης ζημιάς.....	8-7
Αποτίμηση δεδομένων άμεσης ζημιάς .....	8-8
Αξία ακινήτου .....	8-9

Χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου .....	8-13
Ποσοστό ζημιάς.....	8-13
Στατιστική περιγραφή δεδομένων άμεσης ζημιάς .....	8-16
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	8-22
<b>Κεφάλαιο 9.....</b>	<b>9-1</b>
<b>Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Αττική.....</b>	<b>9-1</b>
Δεδομένα πλημμύρας.....	9-2
Κλίμακα χωρικής ανάλυσης.....	9-3
Πρωτογενής επεξεργασία δεδομένων .....	9-3
Ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς .....	9-7
Χρήση κατοικίας .....	9-7
Χρήση επαγγελματικού χώρου.....	9-12
Χρήση αποθήκης.....	9-14
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης.....	9-16
Ανάπτυξη σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς .....	9-16
Χρήση κατοικίας .....	9-17
Χρήση επαγγελματικού χώρου.....	9-18
Χρήση αποθήκης.....	9-19
Σύγκριση σχετικής καμπύλης με αντίστοιχες από τη διεθνή βιβλιογραφία .....	9-20
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	9-23
<b>Κεφάλαιο 10 .....</b>	<b>10-1</b>
<b>Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Ανατολική Αττική .....</b>	<b>10-1</b>
Περιοχή μελέτης.....	10-2
Δομημένο περιβάλλον .....	10-4
Χωρικά Δεδομένα.....	10-5
Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).....	10-5
Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης .....	10-6

Δεδομένα πλημμύρας.....	10-7
Υδρολογικοί υπολογισμοί .....	10-8
Υδραυλικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS.....	10-10
Οικονομικά δεδομένα.....	10-15
Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΠΣ.....	10-16
Καμπύλη πιθανότητας μη υπερβάσης πλημμύρας - ζημιάς.....	10-19
Ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στη σχετική καμπύλη βάθους νερού - ζημιάς.....	10-21
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	10-23
<b>Κεφάλαιο 11 .....</b>	<b>11-1</b>
<b>Δεδομένα άμεσης ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη Νέα Ορλεάνη .....</b>	<b>11-1</b>
Γενική πληροφορία.....	11-2
Τυφώνας Κατρίνα.....	11-3
Συνθήκες πλημμύρας λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης.....	11-4
Δομημένο περιβάλλον.....	11-6
Τύποι κατοικίας.....	11-8
Δεδομένα ζημιάς.....	11-10
Βάση δεδομένων.....	11-12
Αποτίμηση δεδομένων ζημιάς.....	11-13
Ποσοστό ζημιάς.....	11-14
Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς.....	11-17
Στατιστική περιγραφή βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς.....	11-17
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	11-21
<b>Κεφάλαιο 12 .....</b>	<b>12-1</b>
<b>Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη Νέα Ορλεάνη.....</b>	<b>12-1</b>
Δεδομένα πλημμύρας.....	12-2
Γενικά .....	12-3
Μοντελοποίηση συνθηκών πλημμύρας στην Νέα Ορλεάνη.....	12-3

Αποτελέσματα προσομοίωσης πλημμύρας .....	12-7
Χωρική κλίμακα ανάλυσης .....	12-17
Επεξεργασία δεδομένων .....	12-18
Πρωτογενής επεξεργασία .....	12-19
Έλεγχος κανονικότητας δεδομένων .....	12-21
Μεθοδος bootstrapping .....	12-22
Ανάλυση της σχέσης ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και ποσοστού ζημιάς.....	12-23
Ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς .....	12-24
Υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου (γειτονιά «Lower 9th Ward»).....	12-25
Κεντρική υποπεριοχή .....	12-27
Ανατολική υποπεριοχή .....	12-28
Σύνολο της περιοχής μελέτης.....	12-28
Ανάλυση της σχέσης γινομένου $dn$ και ποσοστού ζημιάς .....	12-31
Υποπεριοχή «Αγ. Βερνάρδου» (γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward»).....	12-33
Μη γραμμικός συνδυασμός βάθους νερού και ταχύτητας ροής για την εκτίμηση ποσοστού ζημιάς.....	12-36
Κριτήριο ζημιάς.....	12-39
Εφαρμογή κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward».....	12-39
Εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen.....	12-41
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	12-43
<b>Κεφάλαιο 13 .....</b>	<b>13-1</b>
<b>Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη νήσο Ίο .....</b>	<b>13-1</b>
Γενική πληροφορία.....	13-2
Φράγμα Μυλοπότα.....	13-2
Περιοχή μελέτης.....	13-3
Περιγραφή πλημμυρικού γεγονότος.....	13-4
Δεδομένα πλημμύρας.....	13-6
Υδρολογικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS .....	13-6

Υδραυλικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα DAMBRK .....	13-10
Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	13-13
Δεδομένα άμεσης ζημιάς .....	13-17
Ανάλυση της σχέσης πλημμυρικών μεγεθών και ζημιάς.....	13-19
Ανακεφαλαιωτικά σχόλια .....	13-22
<b>Κεφάλαιο 14 .....</b>	<b>14-1</b>
<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις .....</b>	<b>14-1</b>
Γενικά συμπεράσματα .....	14-1
Σημεία για μελλοντική έρευνα .....	14-4
<b>Απόδοση τεχνικής ορολογίας στην Ελληνική γλώσσα.....</b>	<b>2</b>
<b>Απόδοση ειδικής τεχνικής ορολογίας των ΗΠΑ στην Ελληνική γλώσσα .....</b>	<b>9</b>
<b>Ακρώνυμα .....</b>	<b>11</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>12</b>



## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2-1. Προσέγγιση φόρτισης – αντίστασης με αποτέλεσμα πρόκληση άμεσης ζημιάς μέσω μηχανισμού αστοχίας .....	2-4
Εικόνα 2-2. Ζώνες εκτίμησης απώλειας ανθρώπινης ζωής [Jonkman 2007] .....	2-7
Εικόνα 2-3. Προσδιορισμός παραμέτρων ανάλυσης ζημιάς βάσει διαγράμματος δενδρικού τύπου .....	2-9
Εικόνα 2-4. Παράμετροι ανάλυσης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον .....	2-10
Εικόνα 2-5. Μη δομική πλημμυρική ζημιά σε ισόγειο αστικής περιοχής της Αττικής [Πηγή: λήψη φωτογραφίας Ιούλιος 2002, από Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων, ΥΠΕΧΩΔΕ] .....	2-17
Εικόνα 2-6. Πλημμυρόπληκτη κατοικία της Νέας Ορλεάνης που παρασύρθηκε μερικά μέτρα μακριά από τη θεμελίωσή της [Πηγή: λήψη φωτογραφίας Ιανουάριος 2006 από M. Kok] .....	2-18
Εικόνα 2-7. Δείγμα μη δομικής, πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικία στην Νέα Ορλεάνη, με εκτεταμένη ανάπτυξη μούχλας [Πηγή: FEMA – Mitigation Assessment Team Report 2006].....	2-18
Εικόνα 3-1. Παράδειγμα καμπύλης διακινδύνευσης: καμπύλη FN.....	2-3
Εικόνα 3-2. Σφαίρες ορισμού της έννοιας της τρωτότητας κατά Birkmann (2006) .....	2-5
Εικόνα 3-3. Συνάρτηση τρωτότητας έναντι έντασης φυσικού φαινομένου για αρχική και αυξημένη δυναμική αντιμετώπισης (ή αντίστοιχα μειωμένη ευαλότητα) συστήματος [Tsakiris 2006] .....	2-6
Εικόνα 3-4. Χαρακτηριστικοί δείκτες έκθεσης και ευαλότητας του συστήματος που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της πλημμυρικής τρωτότητας [βασίστηκε σε Messner and Meyer 2006].....	2-7
Εικόνα 3-5. Στάδια ανάλυσης πλημμυρικής διακινδύνευσης βάσει της μεθοδολογίας ANCOLD (2003) .....	2-11
Εικόνα 3-6. Σχηματοποίηση των τύπων αβεβαιότητας [βάσει της δημοσίευσης van Gelder (2000)].....	2-14
Εικόνα 3-7 Αριστερά: καμπύλη διακινδύνευσης απεικονίζει την εγγενή αβεβαιότητα, δεξιά: οικογένεια καμπυλών διακινδύνευσης απεικονίζουν την επίκτητη αβεβαιότητα [βάσει Kaplan and Garrick 1981, Pate Cornell 1996].....	2-14
Εικόνα 4-1. Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης άμεσης ζημιάς λόγω πλημμυρικού γεγονότος [Tsakiris et al. 2007].....	2-8
Εικόνα 4-2. Στάδια ανάλυσης για την οικονομική εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον .....	2-9
Εικόνα 4-3. Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας κτηρίου λόγω φόρτισης από πλημμύρα .....	2-10
Εικόνα 4-4. Υπολογιστικά στάδια για την ανάπτυξη καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς [βασίζεται στη δημοσίευση USACE 1996].....	2-16
Εικόνα 4-5. Κριτήριο πλημμυρικής ζημιάς σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους κατοικίας κατά Black (1975) ....	2-19
Εικόνα 4-6. Κριτήρια ζημιάς κατά Clausen για δομημένο περιβάλλον από οπτοπλινθοδομή [Clausen 1989] ..	2-23

Εικόνα 5-1. Ενδεικτικές περιπτώσεις βαθών νερού και κατανομών υδροστατικών πιέσεων σε ένα άνοιγμα ενός κτηρίου .....	5-3
Εικόνα 5-2. Σκαρίφημα ανοίγματος σε αστοχία από ρηγμάτωση λόγω δράσης πλημμύρας .....	5-9
Εικόνα 5-3. Σκαρίφημα στοιχείου σε αστοχία από ανατροπή λόγω δράσης πλημμύρας.....	5-11
Εικόνα 6-1. Στάδια μοντελοποίησης πλημμυρικών συνθηκών.....	6-2
Εικόνα 7-1. Διαστάσεις μοντέλου ζημιάς .....	7-2
Εικόνα 7-2. Συνδυασμοί μοντέλων πλημμύρας και ζημιάς ως προς το ταίριασμα του βαθμού πολυπλοκότητάς τους .....	7-3
Εικόνα 7-3. Δομή μοντέλου ζημιάς .....	7-4
Εικόνα 7-4. Τέσσερα πρώτα χωρικά επίπεδα υποδιαίρεσης της πόλης της Νέας Ορλεάνης [Maaskant 2007] ....	7-7
Εικόνα 7-5. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο.....	7-8
Εικόνα 7-6. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιάς με τη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς .....	7-10
Εικόνα 7-7. Μέθοδος αναγνώρισης των εξωδειγματικών τιμών ενός συνόλου δεδομένων ζημιάς.....	7-14
Εικόνα 7-8. Γραφική μέθοδος σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας για τον έλεγχο κανονικότητας μεταβλητών .....	7-16
Εικόνα 7-9. Εφαρμογή μεθόδου «bootstrapping» για τη μέση τιμή δείγματος ποσοστού ζημιάς.....	7-18
Εικόνα 7-10. Διάγραμμα ροής εφαρμογής μοντέλου ζημιάς με τη μέθοδο σχετικής καμπύλης σε περιβάλλον ΓΣΠ.....	7-24
Εικόνα 7-11. Συμβολή ενός μοντέλου ζημιάς στην εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης .....	7-27
Εικόνα 8-1. Ζώνες αξίας οικοπέδου εντός των ορίων της πληγείσας περιοχής λόγω της πλημμύρας της 8ης Ιουλίου 2002 .....	8-10
Εικόνα 8-2. Διάγραμμα διασποράς για τιμές ποσοστού ζημιάς με βάση την εμπορική και την αντικειμενική αξία.....	8-15
Εικόνα 8-3. Διάγραμμα διασποράς για τιμές ποσοστού ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου και την αντικειμενική αξία κτίσματος .....	8-16
Εικόνα 8-4. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε τύπο κτηρίου για Δήμο Μοσχάτου ..	8-17
Εικόνα 8-5. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου για Δήμο Μοσχάτου ..	8-18
Εικόνα 8-6. Α. Γράφημα συνδυασμού τύπου και χρήσης κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου και Β. Γράφημα σχέσης βάθους νερού και ειδικής ζημιάς ανά τύπο κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου .....	8-19
Εικόνα 8-7. Γράφημα σε στήλες του υλικού κατασκευής ανά τύπο κτηρίου .....	8-19

Εικόνα 8-8. Γραφήματα σε στήλες του ποσοστού ζημιάς σε σχέση με τις κλάσεις βάρους νερού ανά τύπο και χρήση κτηρίου.....	8-20
Εικόνα 8-9. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για τους Δήμους στην Νομαρχία Ανατολικής Αττικής.....	8-21
Εικόνα 8-10. Γραφήματα ποσοστού ζημιάς σε σχέση με κλάσεις βάρους νερού ανά τύπο κτηρίου και ειδικής ζημιάς .....	8-22
Εικόνα 9-1. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς από την πλημμύρα της 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 για χρήση κατοικίας .....	9-4
Εικόνα 9-2. Αναγνώριση εξωδειγματικών τιμών δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση κατοικίας .....	9-4
Εικόνα 9-3. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς από πλημμύρα 23-24 <sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 για χρήση κατοικίας .....	9-5
Εικόνα 9-4. Αναγνώριση εξωδειγματικών τιμών δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση επαγγελμ. χώρου .....	9-5
Εικόνα 9-5. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση αποθήκης στην αρχική μορφή και στην μορφή δεδομένων “μείωσης” .....	9-6
Εικόνα 9-6. Αναγνώριση εξωδειγματικών τιμών των δεδομένων ζημιάς («δεδομένων μείωσης») από την πλημμύρα 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 για την χρήση αποθήκης .....	9-6
Εικόνα 9-7. Διάγραμμα διασποράς υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή ....	9-8
Εικόνα 9-8. Προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 2 <sup>ου</sup> βαθμού στο σύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων..	9-9
Εικόνα 9-9. Οι δύο καμπύλες προσαρμογής για τα δυο υποσύνολα των εξομαλυσμένων δεδομένων.....	9-9
Εικόνα 9-10. Η επέκταση και τα όρια εμπιστοσύνης της καμπύλης για χρήση κατοικίας .....	9-10
Εικόνα 9-11. Διάγραμμα διασποράς του υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή .....	9-11
Εικόνα 9-12. Υπέρθωση των δυναμoσυναρτήσεων του Δήμου Μοσχάτου στα εξομαλυσμένα δεδομένα της Αν. Αττικής .....	9-11
Εικόνα 9-13. Διάγραμμα διασποράς του υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή .....	9-13
Εικόνα 9-14. Η επέκταση και τα όρια εμπιστοσύνης της καμπύλης για χρήση επαγγελματικού χώρου .....	9-14
Εικόνα 9-15. Διάγραμμα διασποράς υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή ..	9-14
Εικόνα 9-16. Η επέκταση της καμπύλης και τα όρια εμπιστοσύνης για τη χρήση αποθήκης.....	9-15
Εικόνα 9-17. Σύνολο εξομαλυσμένων τιμών ποσοστού ζημιάς σε κατοικίες για το διάστημα $x \in [0, 1]$ .....	9-17

Εικόνα 9-18. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση κατοικίας.....	9-18
Εικόνα 9-19. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση επαγγελματικού χώρου .....	9-19
Εικόνα 9-20. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση αποθήκης.....	9-20
Εικόνα 9-21. Σύγκριση καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς για χρήση κατοικίας στο Παλέρμο και στην Αττική.....	9-21
Εικόνα 9-22. Σύγκριση σχετικών καμπύλων βάθους νερού-ζημιάς για χρήση κατοικίας.....	9-22
Εικόνα 10-1. Περιοχή μελέτης και λειάνη απορροής του ρέματος Ερασίνου στην Ανατολική Αττική.....	10-4
Εικόνα 10-2. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης.....	10-6
Εικόνα 10-3. Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης.....	10-7
Εικόνα 10-4. Υποδιαίρεση της λειάνης απορροής του ρέματος Ερασίνου σε υπολεκάνες.....	10-9
Εικόνα 10-5. Θέσεις διατομών κατά μήκος των ρεμάτων υπό μελέτη.....	10-12
Εικόνα 10-6. Χάρτης περιβάλλουσας βάθους νερού (ή χάρτης πλημμυρικού κινδύνου) για $T=100yr$ .....	10-14
Εικόνα 10-7. Χάρτης αναμενόμενης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας για $T=100yr$ .....	10-19
Εικόνα 10-8. Καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς.....	10-21
Εικόνα 10-9. Ανάλυση ευαισθησίας στην ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς .....	10-22
Εικόνα 11-1. Η γεωγραφική θέση της μητροπολιτικής περιοχής και των τριών υποπεριοχών της Νέας Ορλεάνης .....	11-5
Εικόνα 11-2. Θέσεις κύριων ρηγμάτων και αστοχιών στο δίκτυο αναχωμάτων και τοιχών της πόλης της Νέας Ορλεάνης.....	11-6
Εικόνα 11-3. Η επέκταση της πόλης της Νέας Ορλεάνης στην πρόσφατη ιστορία (Πηγή: FEMA 2006a).....	11-7
Εικόνα 11-4. Τυπική διώροφη μονοκατοικία, υπερυψωμένου ισογείου, αποικιοκρατικής εποχής.....	11-8
Εικόνα 11-5. Τυπική ισόγεια μονοκατοικία, θεμελιωμένη σε πλάκα κατάστρωσης, σύγχρονης εποχής.....	11-9
Εικόνα 11-6. Τυπική ισόγεια κατοικία, υπερυψωμένη ελάχιστα λόγω ημιυπογείου χώρους, σύγχρονης εποχής.....	11-9
Εικόνα 11-7. Τομή σύγχρονης ισόγειας κατοικίας, κατασκευασμένη από ξύλινους τοίχους με επένδυση οπτοπλινθοδομής.....	11-10
Εικόνα 11-8. Χωρική κατανομή των τιμών του ποσοστού ζημιάς που περιέχονται στη βάση δεδομένων.....	11-13
Εικόνα 11-9. Ιστογράμματα του ποσοστού ζημιάς για κάθε υποπεριοχή της Νέας Ορλεάνης (Προσοχή: οι κλίμακες στους κάθετους άξονες διαφέρουν) .....	11-20
Εικόνα 12-1. Θέσεις ρηγμάτων και αστοχιών αναχωμάτων που μοντελοποιήθηκαν στην Νέα Ορλεάνη[de Bruijn 2006].....	12-5

Εικόνα 12-2. Χρονοσειρά βροχόπτωσης για την προσομοίωση πλημμύρας [Kok et al. 2007] .....	12-6
Εικόνα 12-3. Οι μέγιστες τιμές βάθους νερού υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης.....	12-11
Εικόνα 12-4. Οι μέγιστες τιμές ταχύτητας ροής υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης.....	12-13
Εικόνα 12-5. Οι τιμές γινομένου μέγιστου βάθους νερού και μέγιστης ταχύτητας ροής υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης.....	12-15
Εικόνα 12-6. Οι μέγιστες τιμές του ρυθμού ανύψωσης στάθμης για το πρώτο 1.5m υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης.....	12-16
Εικόνα 12-7. Χωρική κατανομή ποσοστού ζημιάς ανηγμένου στην χωρική μονάδα «ομάδα οικοδομικών τετραγώνων».....	12-18
Εικόνα 12-8. Μέθοδος αναγνώρισης εξωδειγματικών τιμών για το σύνολο των τιμών βάθους νερού.....	12-20
Εικόνα 12-9. Απεικόνιση τιμών βάθους νερού που εξαιρέθηκαν από την ανάλυση ζημιάς, ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων.....	12-21
Εικόνα 12-10. Έλεγχος κανονικότητας της μεταβλητής $y$ σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας.....	12-22
Εικόνα 12-11. Ποσοστό ζημιάς έναντι αριθμού πλημμυρόπληκτων κατοικιών.....	12-23
Εικόνα 12-12. Διάγραμμα διασποράς του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και του ποσοστού ζημιάς, ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων.....	12-24
Εικόνα 12-13. Διάγραμμα διασποράς βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για το σύνολο της περιοχής μελέτης 12-30	
Εικόνα 12-14. Δεδομένα ζημιάς ανά πλημμυρόπληκτη κατοικία στη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ.....	12-32
Εικόνα 12-15. Γειτονιά Lower 9 <sup>th</sup> Ward: θέα προς τα ανατολικά από το ανάχωμα στη θέση του ρήγματος του περιμετρικού αναχώματος (Ημερομηνία λήψης: 20 Φεβρουαρίου 2006) .....	12-32
Εικόνα 12-16. Ανάλυση σχέσης γινομένου $dh$ και ποσοστού ζημιάς στη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» .....	12-36
Εικόνα 12-17. : Κλάσεις ζημιάς ως συναρτήσεις του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής στη «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» .....	12-37
Εικόνα 12-18. Απεικόνιση τιμών του γινομένου $dh$ για τη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ.....	12-40
Εικόνα 12-19. Εφαρμογή κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» σε ΓΣΠ .....	12-40
Εικόνα 12-20. Εφαρμογή εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen στη «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» σε ΓΣΠ .....	12-42
Εικόνα 12-21. Εφαρμογή εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen και υπέρθεση τιμών ποσοστού ζημιάς .....	12-42
Εικόνα 12-22. Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων για κάθε ζώνη ζημιάς του εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen.....	12-43

Εικόνα 13-1. Σκαρίφημα τυπικής διατομής φράγματος.....	13-3
Εικόνα 13-2. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης.....	13-4
Εικόνα 13-3. Κατάντη όψη φράγματος μετά το συμβάν και υλικά που διαβρώθηκαν και παρασύρθηκαν .....	13-5
Εικόνα 13-4. Οδοποιία προσπέλασης στο φράγμα Μυλοπότα μετά την πλημμύρα της 27 <sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003..	13-6
Εικόνα 13-5. Γραφική απεικόνιση της όμβριας καμπύλης για διάφορες τιμές της περιόδου επαναφοράς $T$ .....	13-7
Εικόνα 13-6. Αποτελέσματα βροχόπτωσης – απορροής για κάθε υπολεικάνη με την χρήση του HEC-HMS ...	13-8
Εικόνα 13-7. Υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα φράγματος Μυλοπότα .....	13-9
Εικόνα 13-8. Μοντελοποίηση της περιοχής κατάντη του φράγματος Μυλοπότα .....	13-13
Εικόνα 13-9. Γράφημα στάθμης ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα Μυλοπότα σε συνάρτηση με χρόνο ...	13-14
Εικόνα 13-10. Διόδευση της πλημμυρικής αιχμής στην περιοχή κατάντη του φράγματος .....	13-14
Εικόνα 13-11. Υδρογράφημα βάθους νερού για επιλεγμένες διατομές στην περιοχή κατάκλυσης.....	13-15
Εικόνα 13-12. Χάρτης κατάκλυσης πλημμύρας στην περιοχή κατάντη του φράγματος Μυλοπότα.....	13-17

## **Πίνακας Πινάκων**

Πίνακας 2-1. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των κατηγοριών πλημμυρικής ζημιάς.....	2-4
Πίνακας 2-2. Βασικά χαρακτηριστικά χωρικού επιπέδου μακροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μικροκλίμακας...	2-13
Πίνακας 4-1. Βιβλιογραφική επισκόπηση στις μεθόδους εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον .....	2-3
Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις για την ανάλυση και εκτίμηση της φυσικής πλημμυρικής ζημιάς	2-17
Πίνακας 4-3. Κριτήριο ζημιάς κατά Mijala et al. (2001).....	2-20
Πίνακας 6-1. Μέτρα απόδοσης των πλημμυρικών μοντέλων που εξετάζονται .....	6-13
Πίνακας 8-1. Συγκενρωτικός πίνακας πλημμυρόπληκτων κτηρίων για την πλημμύρα της 8 <sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 .....	8-5
Πίνακας 8-2. Συγκενρωτικός πίνακας πλημμυρόπληκτων κτηρίων για την πλημμύρα της 23-24 <sup>ης</sup> Νοέμβριου 2005 .....	8-6
Πίνακας 8-3. Τιμές παραμέτρων για τον προσδιορισμό της αντικειμενικής αξίας ακινήτου στους πληγέντες Δήμους της Αττικής.....	8-11
Πίνακας 8-4. Τιμές πολλαπλασιαστικού συντελεστή αναγωγής της αντικειμενικής σε εμπορική αξία ακινήτου ..	8-14
Πίνακας 8-5. Στατιστικά χαρακτηριστικά του συνόλου δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου .....	8-16

Πίνακας 8-6. Στατιστικά χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε τύπο κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου .....	8-17
Πίνακας 8-7. Στατιστικά χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου .....	8-17
Πίνακας 8-8. Στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων ζημιάς για το Δήμους της Νομαρχίας Ανατολική Αττικής .....	8-20
Πίνακας 8-9. Στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων ζημιάς για τους Δήμους στην Νομαρχία Ανατολικής Αττικής .....	8-21
Πίνακας 8-10. Χρήσεις και τύποι κτηρίου στην περιοχή της Αττικής .....	8-22
Πίνακας 9-1. Τύποι προσαρμογής συνάρτησης για το αρχικό υποσύνολο δεδομένων.....	9-7
Πίνακας 9-2. Συνάρτηση των εξομαλυσμένων δεδομένων για το σύνολο τιμών $x \in [1, 2]$ .....	9-10
Πίνακας 9-3. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	9-10
Πίνακας 9-4. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής του υποσυνόλου δεδομένων στη δυναμοσυνάρτηση PF2..	9-11
Πίνακας 9-5. Συνάρτηση κατανομής των εξομαλυσμένων δεδομένων.....	9-13
Πίνακας 9-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	9-13
Πίνακας 9-7. Συνάρτηση κατανομής των εξομαλυσμένων δεδομένων.....	9-15
Πίνακας 9-8. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	9-15
Πίνακας 9-9. Συγκενρωτικά αποτελέσματα προσαρμογής καμπύλης σε υποσύνολα δεδομένων.....	9-16
Πίνακας 10-1. Αιχμές υδρογραφημάτων άμεσης απορροής των υπολεκανών του ρέματος Αγ. Γεωργίου .....	10-9
Πίνακας 10-2. Αιχμές υδρογραφημάτων άμεσης απορροής των υπολεκανών του ρέματος Ερασίνου .....	10-10
Πίνακας 10-3. Προσαρμοσμένη κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού – ζημιάς για κατοικίες στην Ανατολική Αττική.....	10-16
Πίνακας 10-4. Πίνακας αποτελεσμάτων αναμενόμενης άμεσης ζημιάς σε κατοικίες για όλα τα σενάρια πλημμύρας .....	10-17
Πίνακας 10-5. Προσαρμογή συνάρτησης στα δεδομένα πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας– ζημιάς.....	10-20
Πίνακας 10-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης.....	10-20
Πίνακας 10-7. Αποτελέσματα αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς για την «κατάσταση συστήματος 1» .....	10-21
Πίνακας 10-8. Ανάλυση ευαισθησίας στον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς.....	10-22
Πίνακας 11-1. Σύγκριση μεγέθους συνεπειών μεταξύ των τυφώνων Κατρίνα, Μπέτσι και Καμίλ .....	11-4

Πίνακας 11-2. Κριτήρια εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σύμφωνα με το πρόγραμμα RSDE .....	11-14
Πίνακας 11-3. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων ανά υποπεριοχή της πόλης της Νέας Ορλεάνης .....	11-18
Πίνακας 12-1. Συνδυασμοί πλημμυρικών μεγεθών και χωρικών επιπέδων για την ανάλυση ζημιάς .....	12-18
Πίνακας 12-2. Επιλεγμένες στατιστικές κατανομές για την ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς .....	12-25
Πίνακας 12-3. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για τη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward» .....	12-25
Πίνακας 12-4. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	12-26
Πίνακας 12-5. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για την Κεντρική υποπεριοχή.....	12-27
Πίνακας 12-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	12-27
Πίνακας 12-7. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για το σύνολο της περιοχής μελέτης .....	12-29
Πίνακας 12-8. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	12-29
Πίνακας 12-9. Επιλεγμένες στατιστικές κατανομές για την ανάλυση της σχέσης γινομένου $dh$ και ποσοστού ζημιάς .....	12-33
Πίνακας 12-10. Συνάρτηση βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για τη γειτονιά «Lower 9 <sup>th</sup> Ward».....	12-33
Πίνακας 12-11. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	12-34
Πίνακας 12-12. Προσαρμογή μη γραμμικής συνάρτησης βάθους νερού και ταχύτητας στα δεδομένα ζημιάς .....	12-37
Πίνακας 12-13. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του $R^2$ .....	12-38
Πίνακας 13-1. Κατάλογος καταγραφής θέσεων υλικών ζημιών από πλημμύρα στη νήσο Το.....	13-18
Πίνακας 13-2. Παράλλαξη Α του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για $H=1.20$ m και $b=0.30$ m.....	13-19
Πίνακας 13-3. Παράλλαξη Β του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για $H=1.50$ m και $b=0.30$ m .....	13-19
Πίνακας 13-4. Παράλλαξη Γ του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για $H=1.20$ m και $b=0.40$ m .....	13-20
Πίνακας 13-5. Παράλλαξη Δ του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για $H=1.50$ m και $b=0.40$ m .....	13-20
Πίνακας 13-6. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα αποτελέσματα του μηχανισμού αστοχίας από ανατροπή.....	13-21



# Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διατριβής αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε εκείνους που με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν κατά το χρονικό διάστημα της εκπόνησής της.

Πρώτα θα ήθελα να αναφερθώ στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τα οποία ανέλαβαν την παρακολούθηση αυτής της διατριβής. Ο **Ιωάννης Ναλμπάντης**, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ, παρακολούθησε πολύ στενά την εκπόνηση και συνέβαλε ουσιαστικά στη δομή της εργασίας, ενώ αρκετές φορές μου υπενθύμισε ότι η ιδιότητά μου ως μηχανικός πρέπει να αντικατοπτρίζεται στο περιεχόμενό της. Τον ευχαριστώ από καρδιάς γιατί μου ενέπνευσε τη δική του επιστημονική ανησυχία και με την αναμφισβήτητη επιστημονική του κατάρτιση και εμπειρία με καθοδήγησε με σιγουριά και μεθοδικότητα στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Επίσης, ευχαριστώ τον **Σπύρο Γιακουμάκη**, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ, για τον χρόνο που αφιέρωσε στη μελέτη της διατριβής και για τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές του. Ο **Γεώργιος Τσακίρης**, Καθηγητής ΕΜΠ και επιβλέπων της διατριβής, δημιούργησε και προστάτευσε όλα αυτά τα χρόνια ένα ζωτικό χώρο, μέσα στον οποίο μπόρεσα απερίσπαστη να πραγματοποιήσω επιστημονική έρευνα σε συνθήκες ακαδημαϊκής ελευθερίας και έκφρασης. Η ευρύτατη επιστημονική του γνώση και διαίσθηση και η πραγματικά μεγάλη πείρα του υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην εκπόνηση της διατριβής. Τον ευχαριστώ, επίσης, για την παροχή των υλικών όρων για την υλοποίηση της διατριβής και είμαι ειλικρινά ευγνώμων για την εμπιστοσύνη και την παρότρυνση που έδειξε προς το πρόσωπό μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να αναφερθώ στους επιστήμονες εκείνους που με ενέπνευσαν και με βοήθησαν ουσιαστικά σε πολλά επιστημονικά και τεχνικά ζητήματα. Ο **Čedo Maksimović**, Καθηγητής στο Imperial College London και επιβλέπων της μεταπτυχιακής μου εργασίας εκεί, μου εμφύσησε την ιδέα εκπόνησης διδακτορικής διατριβής στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο και με συμβούλεψε σε σημαντικά θέματα καθόλη τη διάρκεια της διατριβής. Ο **Pieter van Gelder**, Αν. Καθηγητής στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft, Ολλανδία, και επιστημονικός υπεύθυνος της εργασίας μου εκεί, με βοήθησε στην κατανόηση και αξιολόγηση των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Ο Δρ. **Sebastian Jonkman**, Ερευνητής στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft, Ολλανδία, πίστεψε στην ιδέα της διατριβής και με τις εύστοχες και πολύ σημαντικές παρατηρήσεις του με βοήθησε ουσιαστικά στη διερεύνηση της περίπτωσης μελέτης στην πόλη της Νέας Ορλεάνης, ΗΠΑ. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον **Μιχάλη Σακελλαρίου**, Καθηγητής ΕΜΠ, για τις πολύτιμες συμβουλές του και τη διαρκή παρότρυνσή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής και τους **Χαράλαμπο Ιωαννίδη**, Καθηγητής ΕΜΠ και **Σοφία Σοϊλέ**, Ερευνήτρια ΕΜΠ, στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, για την άψογη συνεργασία μας και τις συμπληρωματικές επεξηγήσεις και παρατηρήσεις τους.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τις υπηρεσίες συλλογής υδρομετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων άμεσης πλημμυρικής ζημιάς της ΔΕΗ, του πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ, και του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης, οι οποίες μου επέτρεψαν την πρόσβαση σε αρχεία πρωτογενών μετρήσεων. Συγκεκριμένα ευχαριστώ για τη βοήθεια τους: τις **Αικατερίνη Γραϊκά** και **Μαρία Σπανούδη** (Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων,

πρωην ΥΠΕΧΩΔΕ), τον **Οδυσσέα Καρασαχινίδη** (Δ/νση Μελετών και Κατασκευών, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης), τον **Μιχάλη Στεφασδούρο** (ΔΕΗ/ΔΑΥΕ), το Δήμο Ιητών και το Τμήμα Υδρολογίας, Δ/νση Σχεδιασμού Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Αξιοποίησης Εδαφουδατικών Πόρων, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης. Επίσης, ευχαριστώ τον **Bob Maaskant** (Σύμβουλοι HKV και Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft) and τον **Marinus Aalberts** (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft), οι οποίοι μου παρείχαν τα αποτελέσματα της τεχνικής μελέτης με τίτλο « Προσομοιώσεις πλημμύρας των πληγείσων υποπεριοχών στην ευρύτερη περιοχή της Νέας Ορλεάνης – Τυφώνας Κατρίνα Αύγουστος 2005».

Δε θα πρέπει να παραλείψω το **Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων** που διέθεσε τους χώρους και τον τεχνικό εξοπλισμό για την υλοποίηση της διατριβής και ευχαριστώ θερμά τους συναδέλφους για τη συμπαράσταση και το φιλικό περιβάλλον. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους **Χάρη Βαγγέλη, Διαλεκτή Παγκάλου και Αρετή Μιζάρα**.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω δημοσίως τους γονείς μου, **Κώστα και Πόπη Πιστριά**, στους οποίους η εκφραση ευχαριστηρίων δεν εμπνέεται από τη συνηθισμένη σε αυτές τις περιπτώσεις τυπικότητα αλλά πηγάζει από την αμέριστη υλική και ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα κρίσιμα για εμένα χρόνια, καθώς επίσης και την αδερφή μου, **Ελπίνα Πιστριά**, η οποία με ενθάρρυνε και μου συμπαραστάθηκε ψυχολογικά αλλά και ουσιαστικά όσο κανείς άλλος σε όλη την κρίσιμη περίοδο της συγγραφής της διατριβής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σύντροφο μου, **Νίκο Φαρδή**, για την ανεξάντλητη υπομονή και αμέριστη συμπαράστασή του σε όλη τη διάρκεια της διατριβής.

# Περίληψη

Στην παρούσα διατριβή διερευνήθηκε διεξοδικά η επίδραση επιλεγμένων πλημμυρικών μεγεθών στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη δύο κατηγορίες πλημμύρας: την πλημμύρα με κατάκλυση και την πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα καταγραφής πλημμύρας και άμεσης ζημιάς από τον ελληνικό και διεθνή χώρο για αστικές και περιαστικές δομημένες περιοχές. Ακόμη, διερευνήθηκαν θέματα σχετικά με την χωρική κλίμακα ανάλυσης των δεδομένων και με τη διαδικασία υπολογισμού του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς». Οι διαπιστώσεις που έγιναν με βάση τα ιστορικά δεδομένα, αξιολογήθηκαν και ποσοτικοποιήθηκαν με την εφαρμογή στατιστικών μεθόδων έτσι ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν στη στατιστική πρόγνωση της άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Δεδομένου του μικρού αριθμού ανάλογων εργασιών στη διεθνή βιβλιογραφία, πολλές από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της πρωτοτυπίας τους.

## Θεωρητικό μέρος της διατριβής

Η πληρέστερη προσέγγιση του θέματος επέβαλε αρχικά, στο θεωρητικό μέρος της διατριβής, να αποσαφηνιστούν βασικές εισαγωγικές έννοιες της ζημιάς και να προσδιοριστεί με σαφήνεια το περιεχόμενο της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που αποτελεί το αντικείμενο έρευνας στην παρούσα διατριβή. Επίσης, διακρίθηκαν τρεις κατηγορίες πλημμύρας ανάλογα με τον τύπο πλημμύρας και το πλημμυρικό μέγεθος υπό εξέταση, οι οποίες είναι σε συνάφεια με την πλημμυρική ζημιά. Ακόμη, αποσαφηνίστηκε η σχέση της πλημμυρικής ζημιάς με την πλημμυρική διακινδύνευση και την πλημμυρική τρωτότητα, και επισημάνθηκαν τα αδύναμα σημεία στην εφαρμογή της ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, τα οποία σχετίζονται με την πλημμυρική ζημιά. Τέλος, αναδείχθηκαν κρίσιμα τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με την πλημμυρική ζημιά και θεωρείται ότι θα προκύψουν κατά την εφαρμογή της νέας κοινοτικής Οδηγίας για τις πλημμύρες τόσο από τα κράτη μέλη όσο και από την Ελλάδα.

Στη συνέχεια, η βιβλιογραφική επισκόπηση των διαφόρων προσεγγίσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τη μελέτη, μοντελοποίηση και πρόγνωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, έδειξε ότι κυριαρχεί η αποσπασματική εφαρμογή μεθόδων εκτίμησης ζημιάς με πιο διαδεδομένη τη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η κατανόηση των μηχανισμών πρόκλησης άμεσης ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου λόγω πλημμύρας δεν συνδέεται με την εκτίμηση ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Η διατριβή παρουσίασε το θεωρητικό υπόβαθρο των κυριότερων μηχανισμών αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε στοιχεία κτηρίου λόγω πλημμυρικής δράσης. Επίσης, η διατριβή αναφέρθηκε συνοπτικά στα βασικά σημεία ανάπτυξης ενός πλημμυρικού μοντέλου, το οποίο είναι αναγκαίο για την ανάλυση ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον λαμβάνει υπόψη τις κατηγορίες πλημμύρας και εστιάζει στην χωρική κλίμακα ανάλυσης. Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας, διακρίθηκαν μοντέλα ζημιάς μικροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μακροκλίμακας, στα οποία η

αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους εξαρτάται από το βαθμό πολυπλοκότητας του πλημμυρικού μοντέλου και από την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης. Επίσης, διερευνήθηκαν θεωρητικά δύο μέθοδοι εκτίμησης ζημιάς, η μέθοδος της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς και η μέθοδος κριτηρίου ζημιάς, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα καταγραφής πλημμυρών και άμεσων ζημιών από τον ελληνικό και διεθνή χώρο για αστικές και περιαστικές δομημένες περιοχές. Ακόμη, εξετάστηκαν δύο τρόποι υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς, (α) με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου που καταλήγει σε αποτίμηση της ζημιάς ως το κόστος των εργασιών επισκευής, και (β) με βάση την εμπορική αξία που καταλήγει σε αποτίμηση της ζημιάς ως το ποσοστό απώλειας της αρχικής αξίας της πληγείσας ιδιοκτησίας, λαμβάνοντας υπόψη την χωρική κλίμακα ανάλυσης ζημιάς. Τέλος, στη διατριβή παρουσιάστηκε η ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ για την εκτίμηση ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας με τη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς.

### Περιπτώσεις μελέτης της διατριβής

Στην περίπτωση μελέτης στην Αττική, η στατιστική ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς οδήγησε στην εμπειρική ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για επιλεγμένες χρήσεις δομημένης περιοχής, η οποία είναι η πρώτη που υλοποιήθηκε σε ελληνικό χώρο. Εξετάστηκε η κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση. Τα οικονομικά δεδομένα άμεσης καταγεγραμμένης ζημιάς μετατράπηκαν σε δεδομένα ποσοστού ζημιάς, με βάση την εκτιμώμενη μέση αντικειμενική αξία ακινήτου για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου ανά χρήση κτηρίου. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας με στοιχεία μικροκλίμακας και μακροκλίμακας και οδήγησε σε προσαρμογή θεωρητικών συναρτήσεων τύπου δυναμοσυνάρτησης στα δεδομένα, οι οποίες τελικά αντικαταστάθηκαν από κλιμακωτές συναρτήσεις βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς. Η σύγκριση της κλιμακωτής συνάρτησης βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς για χρήση κατοικίας στην Αττική με αντίστοιχες σχετικές καμπύλες από τη διεθνή βιβλιογραφία επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα της ανάλυσης και ανέδειξε τη σημασία ανάπτυξης τοπικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εκτίμησης της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς. Τέλος, η εισαγωγή των παραπάνω εμπειρικών καμπυλών στο υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ είχε ως αποτέλεσμα την εκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας πλημμυρικής ζημιάς υπό σενάρια πλημμύρας για περιοχή μελέτης στην Ανατολική Αττική.

Στην περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη εξετάστηκε η κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας εστιάζοντας σε επιμέρους χωρικές μονάδες ανάλυσης (διαμέρισμα, ομάδα οικοδομικών τετραγώνων και οικοδομικό τετράγωνο). Τα δεδομένα ποσοστού ζημιάς υπολογίστηκαν ως ποσοστό απώλειας της αρχικής εμπορικής αξίας ακινήτου. Από την ανάλυση στο πιο λεπτομερές χωρικό επίπεδο του οικοδομικού τετραγώνου διαπιστώθηκε η αποδυνάμωση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των πλημμυρικών μεγεθών και του ποσοστού ζημιάς. Γενικά, η στατιστική ανάλυση δεν είχε αποτέλεσμα μια μονοσήμαντη σχέση μεταξύ των επιλεγμένων μεγεθών πλημμύρας (βάθος νερού, γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής, ρυθμός ανύψωσης στάθμης) και του ποσοστού ζημιάς. Έτσι, η ανάλυση προχώρησε στην εναλλακτική προσέγγιση ανάπτυξης ενός κριτηρίου ζημιάς με βάση πλημμυρικά μεγέθη, η οποία οδηγεί σε διάκριση ζωνών ζημιάς. Το προτεινόμενο εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς σε σχέση με τη μέθοδο κατά Clausen διακρίνει τρεις χωρικές ζώνες ζημιάς με βάση το μέγεθος του γινομένου του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Αυτό το κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές κατοικίας που έχουν πληγεί από πλημμύρα λόγω αστοχίας αναχώματος, ενώ η εφαρμογή του θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με επιφυλακτικότητα σε περιπτώσεις ανάλυσης ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας (π.χ. σε μεμονωμένα κτήρια). Ασφαλώς, τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν οδήγησαν σε στατιστική πρόγνωση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς αλλά θεωρούνται κρίσιμα για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων

μοντέλων πλημμυρικής ζημιάς που καλύπτουν περιοχές μεγάλης γεωγραφικής έκτασης.

Τέλος, στην περίπτωση μελέτης στη νήσο Ίο, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της σχέσης δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς για την πρόγνωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον είναι ισχνά λόγω έλλειψης απαιτούμενων δεδομένων. Ωστόσο, η περίπτωση αυτή μελέτης παρατίθεται στη διατριβή για να αναδείξει τη σημασία του ταιριάσματος του βαθμού πολυπλοκότητας ανάμεσα στο μοντέλο ζημιάς και στο μοντέλο πλημμύρας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχθηκε οικονομικά από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την χρονική περίοδο από Νοέμβριο 2005 μέχρι Απρίλιο 2009.

Ορισμένα από τα κυριότερα σημεία της παρούσας διατριβής έχουν παρουσιασθεί σε έγκυρα διεθνή επιστημονικά περιοδικά και διεθνή συνέδρια.



# Summary

The thesis examines the relationship between flood characteristics and the estimation of direct flood damage in built environment considering two flood types: inundation and flood of high velocity. Historic flood and damage data derived from urban and suburban environment in Greece and abroad, are used for analysis purposes. Critical issues about the spatial scale of analysis and the basic principles for 'damage percent' calculation are investigated and discussed. Quantification and assessment of analysis results is based on well-known statistical methods and therefore the results can contribute to a statistical prediction of direct flood damage in built environment. In the first part of the thesis an improved methodological approach for direct flood damage estimation in built environment is proposed. The second part focuses on case studies that implement the approach taken.

## **Theoretical part**

An integrated approach of the subject under study sets the definition of basic notions regarding damage in the very beginning of the thesis, so as the context of direct flood damage in built environment to be clarified as precisely as possible. Three flood categories that consider flood type and flood characteristic under study are discerned with respect to relative importance for flood damage assessment. Furthermore, the relationship of flood damage, vulnerability and risk perception is discussed and the weak points of risk analysis related with flood damage are pointed out. Finally, critical technical issues on the new EU Floods Directive are presented.

The literature review for flood damage modeling concluded that a unified, standard approach for flood damage estimation in built environment is missing. It seems that the most widespread method for direct flood damage estimation is the method of depth-damage curve. Also, it is noted from international bibliography that in most cases the comprehension of physical mechanisms that cause direct flood damage at building elements, is ignored in a methodology followed for flood damage estimation. The thesis presents the theoretical background of failure mechanisms that have been observed repeatedly at elements of flood affected buildings. Also, the thesis summarises the basic rules of flood modeling which constitutes an essential part of flood damage analysis.

The proposed methodology for flood damage estimation in built environment takes into account the aforementioned flood categories and focuses on the spatial scale of analysis. In this context, damage models of micro-scale, meso-scale and macro-scale level have been distinguished where the reliability of results depends on the precision of flood modeling and the choice of a damage estimation method. A theoretical investigation of two damage estimation methods takes place: the method of relative depth-damage curve and the method of damage criterion. The development of these methods is based on historic flood and damage data derived from urban and suburban environment in Greece and abroad. Furthermore, the variable 'damage percent' is calculated considering the spatial scale of analysis in two different ways, based on (a) property's objective value that results in damage evaluation as a replacement

value and (b) property's market value that results in damage evaluation as a percentage loss of property's initial market value. Finally, the thesis presents the development of a supporting tool for direct flood damage estimation within ArcGIS environment using the method of depth-damage curve.

### **Case studies**

In the case study of Attica, a statistical analysis of the relationship between flood depth and damage percent results in the development of empirical relative depth-damage curves for selected uses of built areas, which constitutes the first one ever materialized in Greece. For analysis purposes, inundation events have been examined and observations of flood depth have been collected. Moreover, economic data has been converted to damage percent data based on average property's objective value for every characteristic building type and for every use of selected built areas. The spatial scale of the statistical analysis is determined at a meso-scale level that combines, also, elements of micro-scale and macro-scale level. Although theoretical power functions result as best fits to data, step functions of flood depth and damage percent are finally adjusted to them. The comparison of the developed step functions for residential use in Attica area with respective ones derived from international case studies, verifies the analysis' results. Finally, the developed empirical step functions are entered into the supporting GIS tool in order to demonstrate the estimation of expected annual flood damage under flood scenarios within a suburban study area, located in Eastern Attica Prefecture.

In the case study of New Orleans, the thesis analyzes the direct damage to residential buildings caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina in the year 2005. The relationship between the flood characteristics (flood depth, depth-velocity product and rise-rate) and economic damage to residential buildings has been investigated. A public dataset has been analyzed that contains information on the economic damage levels for approximately 95 000 residential buildings in the flooded area. Damage percent has been calculated as the percentage loss of a property's initial market value. Also, results of hydrodynamic flood simulations have been used. In general, differences in the observed distributions of damage estimates are related to differences in flood conditions. The spatial scale of the statistical analysis is set at meso-scale level that comprises of three spatial units: tracts, blockgroups and blocks. Extensive statistical analysis indicated that there is not any strong one-to-one relationship between the damage percent and the flood depth or the depth-velocity product. This suggests that there is considerable uncertainty associated with depth-damage functions, especially when they are applied to individual structures or smaller clusters of buildings. Based on the data, a more general approach has been proposed that could be used to distinguish different damage zones based on flood depth and flow velocity for an area that is affected by flooding due to breaching of flood defenses.

Finally, in the case study of Ios Island, failure mechanisms of hydrostatic flood actions at building elements are investigated. Flood simulation results (flood depth and flow velocity) have been derived from a 1-D hydrodynamic flood routing after an overtopping flood event of a dam upstream. Empirical damage data that have been collected immediately after the flood event are restricted only to damage observations and descriptions. Although the spatial scale of damage analysis is set at micro-scale level, the precision of flood modeling is considered not appropriate for such level of detail. Consequently, the case study demonstrates the significance of matching the level of detail between the flood model and the damage model.

The research work presented in the PhD thesis was financially supported by the State Scholarship Foundation at the time period of 2005-2009.



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων φυσικών καταστροφών (Emergency Disasters Database – EM-DAT), ο εκτιμώμενος αριθμός πλημμυρών μεγάλης κλίμακας από το 2003 έως το 2007 στην Ευρώπη ξεπερνά τα 120 γεγονότα, τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα συνολική οικονομική ζημιά πάνω από €12 δισεκατομμύρια. Είναι πιθανό η κλίμακα και η συχνότητα των πλημμυρών στο άμεσο μέλλον να αυξηθεί ως άμεση συνέπεια της κλιματικής αλλαγής, της ασυντόνιστης διαχείρισης των λεκανών απορροής και της οικιστικής ανάπτυξης σε περιοχές που έχουν πληγεί επανειλημμένα από πλημμύρες στο πρόσφατο παρελθόν.

Το θεωρητικό εύρος των διαθέσιμων επιλογών στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου είναι μεγάλο και περιλαμβάνει μια ποικιλία πολιτικών και μέτρων, τα οποία διακρίνονται σε κατασκευαστικά μέτρα (π.χ. φράγματα, ταμιευτήρες, αναχώματα κτλ.) και σε μη κατασκευαστικά μέτρα (π.χ. χωροταξικός σχεδιασμός των χρήσεων γης, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμύρας, σχέδια εκκένωσης, ασφάλιση έναντι πλημμύρας κτλ.). Η τυπική προσέγγιση της κατασκευής τεχνικών έργων για αντιπλημμυρική προστασία, συχνά στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής έχει αποδειχθεί ανεπαρκής σε βάθος χρόνου, πολύ ακριβή και περιβαλλοντικά επιβαρύνουσα. Έτσι, η στρατηγική ιεράρχησης των αντιπλημμυρικών μέτρων φαίνεται ότι αλλάζει στην Ευρώπη και η παραδοσιακή προσέγγιση κατασκευής τεχνικών έργων αντικαθίσταται από τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης και τη νοοτροπία της «συμβίωσης με τις πλημμύρες» [Begum and van Gelder 2004].

Αυτή η σημαντική αλλαγή στην πολιτική της Ευρώπης για τη διαχείριση των πλημμυρών επισφραγίζεται επίσης με την έκδοση της νέας κοινοτικής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για τις πλημμύρες. Σύμφωνα με την νέα Οδηγία, τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να αναγνωρίσουν και να χαρτογραφήσουν εκείνες τις περιοχές που γειτνιάζουν με υδάτινα σώματα και βρίσκονται υπό πλημμυρική διακινδύνευση, ώστε να ληφθούν αναγκαία και συντονισμένα μέτρα για τη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Επομένως, στο νέο αυτό πλαίσιο που διαμορφώνεται από τις ανάγκες της σύγχρονης εποχής, η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης και κατ' επείταση της πλημμυρικής ζημιάς αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

Σημαντικός όγκος ερευνητικών εργασιών στη διεθνή βιβλιογραφία αποδεικνύει ότι σήμερα διεξάγεται εκτε-

ταμένη έρευνα στο πεδίο εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι υπάρχει ασυμφωνία στις μεθόδους και στα μοντέλα πρόβλεψης και πρόγνωσης. Κατ' αρχήν διαπιστώνεται σύγχυση στους ορισμούς και προσδιορισμούς της πλημμυρικής ζημιάς. Η κατηγοριοποίηση σε άμεση και έμμεση, ή σε αποτιμώμενη και μη αποτιμώμενη ζημιά έχει πια καθιερωθεί διεθνώς, ωστόσο οι ερμηνείες και οι περιγραφές των κατηγοριών αυτών διαφέρουν [Jonkman et al. 2008]. Επιπλέον, δεν υπάρχει ενιαία προσέγγιση στον τρόπο αποτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς (με οικονομικούς ή με νομισματικούς όρους), και επίσης εντοπίζεται έντονη διαφοροποίηση στην χωρική κλίμακα ανάλυσης της ζημιάς [Messner et al. 2007]. Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση για την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον είναι η μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς, ωστόσο λείπει από τη διεθνή βιβλιογραφία μια ολοκληρωμένη, ενιαία προσέγγιση που να λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω ζητήματα.

Το ερευνητικό έργο «FLOODsite», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το 6<sup>ο</sup> πρόγραμμα - πλαίσιο στήριξης και ολοκληρώθηκε το 2009, αποτελεί την πρώτη, ολοκληρωμένη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση στην Ευρώπη με συμμετοχή σε αυτό πάνω από 250 εξειδικευμένοι ερευνητές. Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου, οι Meyer and Messner (2005) πραγματοποίησαν επισκόπηση των εφαρμοσμένων μεθόδων εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς σε τέσσερα ευρωπαϊκά κράτη (Αγγλία, Ολλανδία, Τσεχία, και Γερμανία) με παρόμοιο πλημμυρικό καθεστώς. Οι ερευνητές διαπίστωσαν βασικές μεθοδολογικές διαφορές στην εκτίμηση ζημιάς, οι οποίες δυσχεραίνουν σε σημαντικό βαθμό την εφαρμογή ενός ενιαίου μοντέλου πρόγνωσης της πλημμυρικής ζημιάς. Συγκεκριμένα, βασικές διαφορές επισημάνθηκαν κυρίως στον σκοπό ανάλυσης της πλημμυρικής ζημιάς (ανάλυση κόστους-οφέλους ή ανάλυση διακινδύνευσης), στις κατηγορίες άμεσης ζημιάς που λαμβάνονται υπόψη, στην χωρική κλίμακα ανάλυσης, στο απαιτούμενο βαθμό αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, στις βασικές αρχές αποτίμησης και στη διαθεσιμότητα των δεδομένων.

Αποτελεί πρόκληση για την έρευνα στο πεδίο αντιμετώπισης και διαχείρισης των πλημμυρών, η διερεύνηση καινοτόμων μεθόδων με στόχο τη βελτίωση των υφιστάμενων προσεγγίσεων για την ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς και τρωτότητας ενός συστήματος έναντι πλημμύρας. Η παρούσα διατριβή έχει σκοπό να συμβάλει στην κατεύθυνση αυτή, προτείνοντας μια μεθοδολογία εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς, που εστιάζει στην χωρική κλίμακα ανάλυσης και στους τρόπους αποτίμησης της ζημιάς και λαμβάνει υπόψη της, εκτός από το βάθος νερού και άλλα πλημμυρικά μεγέθη στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.

## 1.2 Διάρθρωση της διατριβής

Η διατριβή συγκροτείται από δύο Τόμους, το κείμενο της διατριβής (Τόμος I) και το παράρτημα της διατριβής (Τόμος II). Ο Τόμος I περιέχει 14 Κεφάλαια και περιλαμβάνει επιπλέον δύο γλωσσάρια τεχνικής ορολογίας για την απόδοση όρων από την αγγλική στην ελληνική γλώσσα. Το κείμενο της διατριβής (Τόμος I) αποτελείται από την εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), το θεωρητικό μέρος (Κεφάλαιο 2 έως Κεφάλαιο 7), τις περιπτώσεις μελέτης (Κεφάλαιο 8 έως Κεφάλαιο 13), τα συμπεράσματα (Κεφάλαιο 14) και την χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία. Ο Τόμος II περιέχει Παραρτήματα ανά Κεφάλαιο, όπου το παράρτημα θεωρήθηκε αναγκαίο για να παρουσιαστούν αναλυτικά οι υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί της προσομοίωσης μιας πλημμύρας, επιλεγμένο φωτογραφικό υλικό από τις περιοχές μελέτης και γενικά επικουρικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της έρευνας στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής. Ανά Κεφάλαιο, ο Τόμος I της διατριβής δομείται ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2** εισάγονται βασικοί ορισμοί της ζημιάς και προσδιορίζεται η κατηγορία πλημμυρικής ζη-

μιάς, που αποτελεί αντικείμενο έρευνας στην παρούσα διατριβή. Επίσης, περιγράφονται οι λοιπές κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών. Το κεφάλαιο εστιάζει στη διάκριση παραμέτρων, η χρήση των οποίων συμβάλλει στην οργάνωση της διαδικασίας ανάλυσης. Ακόμη, διακρίνονται τρεις κατηγορίες πλημμύρας ανάλογα με τον τύπο πλημμύρας και το υπό εξέταση πλημμυρικό μέγεθος, από τις οποίες η πλημμύρα με κατάκλυση και η πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Τέλος, περιγράφονται η δομική ζημιά και η μη δομική ζημιά ως τύποι άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που συναντώνται επανειλημμένα στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής.

Στο **Κεφάλαιο 3** αποσαφηνίζονται οι βασικές έννοιες του πλημμυρικού κινδύνου, της πλημμυρικής διακινδύνευσης και της τρωτότητας έναντι πλημμύρας, οι οποίες δεν έχουν ακόμη καθιερωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, και ειδικά, στον Ελληνικό χώρο συγχέονται συχνά λόγω λανθασμένης μετάφρασης. Στη συνέχεια, περιγράφεται η σχέση των εννοιών αυτών με την πλημμυρική ζημιά και παρουσιάζεται σε στάδια η μεθοδολογία ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Ακόμη, επισημαίνονται τα κρίσιμα σημεία στην εφαρμογή της ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης που σχετίζονται με την πλημμυρική ζημιά και σχολιάζεται η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της διακινδύνευσης. Τέλος, στο πλαίσιο της αλλαγής της στρατηγικής αντιμετώπισης των πλημμυρών στην Ευρώπη και της έκδοσης νέας κοινοτικής Οδηγίας για τις πλημμύρες, σχολιάζονται τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με την εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς, κατά την εφαρμογή της Οδηγίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** υλοποιείται η βιβλιογραφική επισκόπηση των διαφόρων προσεγγίσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τη μελέτη, μοντελοποίηση και πρόγνωση της πλημμυρικής ζημιάς. Η επισκόπηση είναι συνοπτική δεδομένης της πολυ μεγάλης βιβλιογραφίας, και είναι προσανατολισμένη στην παρουσίαση των εργασιών εκείνων που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, δηλαδή τη μελέτη της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζεται η ταξινόμηση της εκτεταμένης βιβλιογραφίας σε συγκεντρωτικό πίνακα, η οποία υλοποιήθηκε με βάση τις παραμέτρους ανάλυσης ζημιάς που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Από την ταξινόμηση διαπιστώθηκε ότι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την οικονομική εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς είναι η μέθοδος της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος αυτή. Δεδομένου, όμως, ότι το βάθος νερού αποτελεί ένα μόνο από τα μεγέθη πλημμύρας που συμβάλλουν στην πρόκληση άμεσης ζημιάς, παρουσιάζονται, επίσης, συνοπτικά σημαντικές επιστημονικές εργασίες που διερεύνησαν και άλλα μεγέθη πλημμύρας για την εκτίμηση ζημιάς, όπως είναι η ταχύτητα ροής και η διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος.

Στο **Κεφάλαιο 5** αναφέρεται στην κατανόηση των μηχανισμών πρόκλησης άμεσης ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου λόγω πλημμύρας. Αρχικά, το κεφάλαιο παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των κυριότερων πλημμυρικών δράσεων, που επιβάλλονται σε κτήρια κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση φυσικών και χημικών δράσεων πλημμύρας. Στη συνέχεια, το κεφάλαιο αναφέρεται στη συνάφεια των πλημμυρικών δράσεων στην εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς και τέλος, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο τριών τύπων μηχανισμού αστοχίας σε στοιχεία κτηρίου λόγω πλημμυρικής δράσης.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των βασικών σημείων ανάπτυξης ενός πλημμυρικού μοντέλου, το οποίο είναι αναγκαίο για τους σκοπούς ανάλυσης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Το κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά στα πλημμυρικά μεγέθη που εξετάζονται στη διατριβή και στη συνέχεια παρουσιάζει συνοπτικά τα χωρικά δεδομένα εισόδου και τα υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης πλημμύρας που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής. Τέλος, επισημαίνονται

τρόποι ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης πλημμύρας και μέτρα ελεγχού της απόδοσης των μοντέλων πλημμύρας.

Στο **Κεφάλαιο 7** προτείνεται μια βελτιωμένη μεθοδολογία εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η οποία λαμβάνει υπόψη τις κατηγορίες πλημμύρας και εστιάζει στην χωρική κλιμακία ανάλυσης της ζημιάς. Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας εξετάζονται θεωρητικά δύο μέθοδοι εκτίμησης της ζημιάς, η μέθοδος της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς και η μέθοδος κριτηρίου ζημιάς, οι οποίες εφαρμόζονται στις περιπτώσεις μελέτης στη διατριβή. Ακόμη, το κεφάλαιο εστιάζει στη διαδικασία αποτίμησης των δεδομένων άμεσης ζημιάς για τη μετατροπή τους από απόλυτες τιμές σε ποσοστά ζημιάς. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια της στατιστικής επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε κάθε περίπτωση μελέτης. Επίσης, στο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για την εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας με τη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Τέλος, παρουσιάζεται η ενσωμάτωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιάς στο πλαίσιο εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Στο **Κεφάλαιο 8** εξετάζεται η επεξεργασία δύο αρχείων δεδομένων άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που συλλέχθηκαν από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Το αστικό και περιαστικό δομημένο περιβάλλον υπό εξέταση διακρίνεται ανά χρήση και τύπο κτηρίου. Το επίπεδο ανάλυσης ζημιάς προσδιορίζεται σε μεσοκλίμακα με στοιχεία μικροκλίμακας και μακροκλίμακας. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, διαμορφώνονται χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου ανά χρήση και τύπο κτηρίου, οι οποίοι είναι αναγκαίοι για την εκτίμηση της μέσης αντικειμενικής αξίας ακίνητου σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο. Η διαδικασία προσδιορισμού της μέσης αντικειμενικής αξίας και κατ' επέκταση υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο περιγράφεται αναλυτικά. Τέλος, παρουσιάζεται η στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων ζημιάς, στην οποία κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε τιμή ποσοστού ζημιάς για κάθε πλημμυρικό γεγονός.

Στο **Κεφάλαιο 9** εξετάζεται η στατιστική ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς με στόχο την εμπειρική ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για επιλεγμένες χρήσεις δομημένης περιοχής στην περίπτωση μελέτης της Αττικής. Η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς που περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 8. Αρχικά, στο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρωτογενής επεξεργασία των δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί η στατιστική ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται ανά χρήση κτηρίου. Η στατιστική ανάλυση οδηγεί σε προσαρμογή θεωρητικών συναρτήσεων τύπου δυναμοσυνάρτησης στα δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς, οι οποίες τελικά θα αντικατασταθούν από κλιμακωτές συναρτήσεις βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς ανά χρήση δομημένης περιοχής στην Αττική. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται η σύγκριση της κλιμακωτής συνάρτησης βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς για χρήση κατοικίας στην Αττική με αντίστοιχες σχετικές καμπύλες από τη διεθνή βιβλιογραφία για λόγους επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 10** εξετάζεται η αριθμητική εφαρμογή μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με τη μέθοδο της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ για μια περιαστική περιοχή μελέτης στην Ανατολική Αττική, η οποία έχει επανειλημμένα πληγεί από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στο πρόσφατο παρελθόν. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η εκτίμηση της αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένη περιοχή κατοικίας υπό επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας χρησιμοποιώντας την κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς για χρήση κατοικίας στην Αττική, που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 9. Το θεωρητικό υπόβαθρο της εφαρμογής έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 7. Στην αρχή του κεφαλαίου, περι-

γράφονται συνοπτικά τα απαιτούμενα χωρικά, πλημμυρικά και οικονομικά δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή και στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα της εκτίμησης της ζημιάς σε πινακοποιημένη μορφή και μορφή χάρτη αντίστοιχα υπό επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας. Επίσης, η ανάλυση προχωρά στην ανάπτυξη εμπειρικής καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς για το εύρος τιμών συχνότητας εμφάνισης των σεναρίων πλημμύρας με στόχο τον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς για την υφιστάμενη κατάσταση του συστήματος. Τέλος, υλοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς στη σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς, και διαπιστώνεται ότι η ανάπτυξη της τοπικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς παίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα.

Στο **Κεφάλαιο 11** εξετάζεται το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς σε κατοικίες που προκλήθηκε λόγω της πλημμύρας μετά τον τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης το 2005. Η διαθέσιμη πληροφορία στη βάση δεδομένων περιλαμβάνει μόνο τη γεωγραφική θέση της πληγείσας κατοικίας και την αντίστοιχη εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς ανά κατοικία. Στην αρχή του κεφαλαίου, δίνεται γενική πληροφορία για τον τυφώνα Κατρίνα και τις περιοχές που επλήγησαν στην πόλη της Νέας Ορλεάνης και περιγράφονται οι πλημμυρικές συνθήκες που αναπτύχθηκαν στην πόλη. Στη συνέχεια, διακρίνονται ποιοτικά χαρακτηριστικά κατασκευής των τύπων πληγείσας κατοικίας στην πόλη και επίσης, με βάση αυτούς τους τύπους και την χωρική κατανομή της καταγεγραμμένης ζημιάς αναφέρονται πιθανά αίτια πρόκλησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες ανά περίπτωση υποπεριοχής. Ακολουθεί η περιγραφή της αποτίμησης των δεδομένων ζημιάς με οικονομικούς όρους, όπου προσδιορίζεται ο τρόπος υπολογισμού της αρχικής αξίας μιας κατοικίας και του αντίστοιχου μεγέθους «ποσοστό ζημιάς», και σχολιάζεται η ακρίβεια υπολογισμού. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς.

Στο **Κεφάλαιο 12** εξετάζεται η στατιστική ανάλυση της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας λόγω πλημμύρας μετά τον τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα ζημιάς που περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 11 και ως χωρικό επίπεδο ανάλυσης της ζημιάς προσδιορίζεται η μεσοκλίμακα, η οποία διακρίνεται σε τρεις χωρικές μονάδες ανάλυσης, το διαμέρισμα, την ομάδα οικοδομικών τετραγώνων και το οικοδομικό τετράγωνο. Στην αρχή του κεφαλαίου, περιγράφεται συνοπτικά η διδιάστατη προσομοίωση της πλημμύρας στην πόλη και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το βάθος νερού, την ταχύτητα ροής, το γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής και το ρυθμό ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης με τη μορφή χάρτη σε περιβάλλον ΓΣΠ. Στη συνέχεια, ακολουθεί η πρωτογενής επεξεργασία των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς για τους σκοπούς της στατιστικής ανάλυσης, η οποία πραγματοποιείται ανά πληγείσα υποπεριοχή της πόλης. Η στατιστική ανάλυση της σχέσης του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και του ποσοστού ζημιάς δεν καταλήγει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω αδύναμης συσχέτισης των μεταβλητών. Η στατιστική ανάλυση της σχέσης του βάθους νερού και του ποσοστού ζημιάς υλοποιείται σε χωρικές μονάδες ανάλυσης της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και του διαμερίσματος, και τα αποτελέσματά της δεν κρίνονται ικανοποιητικά. Η στατιστική ανάλυση της σχέσης του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής και του ποσοστού ζημιάς υλοποιείται σε χωρικές μονάδες ανάλυσης της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και του οικοδομικού τετραγώνου, και έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κριτηρίου ζημιάς βάσει του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής που οδηγεί στη διάκριση της άμεσης ζημιάς σε ζώνες.

Στο **Κεφάλαιο 13** εξετάζεται η ανάλυση της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και άμεσης ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου που προκλήθηκε λόγω πλημμύρας μετά την υπερπήδηση του φράγματος Μυλοπότα στη νήσο Ίο. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί ο μηχανισμός πρόκλησης άμεσης ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου με βάση τα προσομοιωμένα μεγέθη πλημμύρας, του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Το κεφάλαιο

περιγράφει την ανάλυση της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και άμεσης ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας. Για τα δεδομένα πλημμύρας, υλοποιείται μονοδιάστατη, μη μόνιμη διόδευση πλημμυρικού κύματος στην περιοχή κατάντη του φράγματος Μυλοπότα. Στη συνέχεια, για τα δεδομένα άμεσης ζημιάς, αναλύεται ο μηχανισμός κατάρρευσης ενός προστατευτικού τοιχίου περιφραξής, ο οποίος θεωρείται μηχανισμός αστοχίας από ανατροπή σε στοιχείο κτηρίου υπό την φόρτιση υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων.

Στο **Κεφάλαιο 14** παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα της διατριβής και με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προτείνονται σημεία για μελλοντική έρευνα.

### 1.3 Πρωτότυπα σημεία - Δημοσιεύσεις

Τα κυριότερα σημεία που στοιχειοθετούν την πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής, συνοψίζονται παρακάτω:

- Η ανάπτυξη μιας βελτιωμένης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον είναι πρωτότυπη. Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει την εξέταση των πλημμυρικών μεγεθών του βάθους νερού, του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής και του ρυθμού ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης.
- Η διερεύνηση της συμβολής της χωρικής κλίμακας στο βαθμό συσχέτισης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, είναι πρωτότυπη. Η διερεύνηση αυτή βασίζεται στα χωρικά επίπεδα μακροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μικροκλίμακας και σε επιμέρους χωρικές μονάδες αυτών.
- Η ανάπτυξη ενός εναλλακτικού κριτηρίου ζημιάς σε σχέση με τη μέθοδο Clausen που βασίζεται στο πλημμυρικό μέγεθος του γινομένου του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής και οδηγεί σε διάκριση σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής της άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, είναι πρωτότυπη.
- Η διαδικασία υπολογισμού του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου και λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα την χωρική κλίμακα ανάλυσης της ζημιάς, είναι πρωτότυπη. Η διαδικασία αυτή βασίστηκε σε ιστορικά δεδομένα επιμέτρησης πραγματικής άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον λόγω πλημμύρας, όπου τα δεδομένα αυτά υπήρξαν διαθέσιμα.

Επίσης, στη διατριβή περιλαμβάνεται μια σειρά από στατιστικές αναλύσεις, μεθοδολογίες και εφαρμογές, οι οποίες περιέχουν στοιχεία πρωτοτυπίας. Η ανάπτυξη εμπειρικών σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς ανά χρήση δομημένης περιοχής για την περίπτωση μελέτης στην Αττική είναι η πρώτη που υλοποιήθηκε σε ελληνικό χώρο.

Επιπλέον, η αποσαφήνιση των βασικών εννοιών του πλημμυρικού κινδύνου, της πλημμυρικής διακινδύνευσης και της τρωτότητας έναντι πλημμύρας, καθώς επίσης και της σχέσης τους με την πλημμυρική ζημιά, θεωρήθηκε κρίσιμο σημείο για την αποφυγή σύγχυσης στην απόδοση των εννοιών αυτών και γι' αυτό πραγματοποιήθηκε στην αρχή της διατριβής. Τέλος, στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε ένα υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για την αυτοματοποίηση της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.

Ορισμένα από τα παραπάνω πρωτότυπα σημεία έχουν δημοσιευθεί ή υποβληθεί σε ελληνικά και διεθνή συ-

νέδρια και σε έγκυρα διεθνή περιοδικά του κλάδου.

#### **Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά**

- Pistrika Aim., Jonkman S.N. (2009) Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after Hurricane Katrina. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-009-9476-y.
- Tsakiris G., Nalbantis I., and Pistrika Aim. (2009) Critical Technical Issues on the EU Flood Directive. *European Water*, 25/26: 39-51.
- Pistrika Aim. (2010) Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. *European Water*, accepted (after selection from EWRA 7<sup>th</sup> International Conference, in Limassol 2009).
- Pistrika Aim., Tsakiris G. (2010) Development of the flood depth-damage curve in the built up environment. *Environmental Management*, submitted.

#### **Δημοσιεύσεις σε ελληνικά και διεθνή συνέδρια**

- Pistrika Aim, Tsakiris G. (2007) Flood Risk Estimation: A Methodological Framework. Proceedings of *International Symposium of EWRA "Water Resources Management: New Approaches and Technologies"*, Chania, Greece, 14-16 June 2007, pp. 13-22.
- Tsakiris G., Pistrika Aim., Ioannidis Ch., Soile S., Georgopoulos A. (2008) Development of an information system for flood management of archaeological sites. Proceedings of *6<sup>th</sup> International Conference on Science and Technology in Archaeology and Conservation "Documentation and Risk Management of Cultural Sites"*, Rome, Italy, 08-14 December 2008.
- Πιστρικα Αιμ., Τσακίρης Γ. (2008) Υποθετική θραύση φράγματος: Εκτίμηση απωλειών ζωής για την αποτίμηση της διακινδύνευσης πλημμύρας. Πρακτικά στο 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων (CIGB-ICOLD), Λάρισα, Ελλάδα, 13-15 Νοεμβρίου 2008, Τόμος 2, σελ. 257-268.
- Pistrika Aim. (2009) Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. Proceedings of EWRA 7<sup>th</sup> International Conference "Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Instability", Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009, pp. 419-427.





## Κεφάλαιο 2

# Πλημμυρική Ζημιά

Σε αυτό το κεφάλαιο εισάγονται οι ορισμοί της πλημμυρικής ζημιάς με στόχο να ερμηνευτεί η έννοια της ζημιάς και να προσδιοριστεί το περιεχόμενό της. Οι περισσότεροι ορισμοί που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία δεν είναι σαφείς. Επίσης, συμβαίνει πολλές φορές να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ορισμοί για να εκφράσουν την ίδια έννοια. Στην αρχή του κεφαλαίου διευκρινίζονται οι ορισμοί της ζημιάς, όπως χρησιμοποιούνται στο κείμενο της διατριβής και προσδιορίζεται η κατηγορία πλημμυρικής ζημιάς που θα μελετηθεί. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι λοιπές κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών για τη βέλτιστη κατανόηση τους. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στη διάκριση παραμέτρων, η χρήση των οποίων κρίνεται απαραίτητη στη διαδικασία ανάλυσης της ζημιάς. Οι παράμετροι αυτές προσανατολίζουν την ανάλυση σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ανάλογα με τις απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων, και επομένως διευκολύνουν σημαντικά την επιλογή κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης ζημιάς.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε τέσσερα υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 2.1 αποσαφηνίζεται η σχετική ορολογία που χρησιμοποιείται στη διατριβή για τον προσδιορισμό της ζημιάς που θα διερευνηθεί. Στη συνέχεια, στο υποκεφάλαιο 2.2 περιγράφονται οι κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς που θεωρούνται καθιερωμένες στο διεθνή επιστημονικό χώρο. Στο υποκεφάλαιο 2.3 διακρίνονται οι παράμετροι εκείνες που προσδιορίζουν το πλαίσιο ανάλυσης της ζημιάς. Οι ίδιες παράμετροι χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση πληροφορίας της σχετικής βιβλιογραφίας στο κεφάλαιο 4. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 2.4 γίνεται ειδική αναφορά σε υποκατηγορίες της πλημμυρικής ζημιάς που εξετάζονται στις μελέτες εφαρμογής της διατριβής.

### 2.1 Πλημμυρική Ζημιά: ορισμός και προσδιορισμοί

Γενικά ο όρος πλημμυρική ζημιά (flood damage) αναφέρεται στις αρνητικές συνέπειες που μπορεί να προκύψουν από ένα πλημμυρικό γεγονός. Το πλημμυρικό γεγονός μπορεί να είναι αποτέλεσμα απλής κατάκλισης της πληγείσας περιοχής, όπως συμβαίνει είτε στην περίπτωση ραγδαίας βροχόπτωσης και ταυτόχρονης ανεπάρκειας αποχετευτικού συστήματος ομβρίων είτε στην περίπτωση υπερχειλίσης ρέματος. Αυτός ο τύπος

πλημμύρας είναι και ο πιο συνηθισμένος. Ωστόσο, το πλημμυρικό γεγονός μπορεί να οφείλεται και σε πιο σπάνια φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η δράση παλιρροιακών κυμάτων λόγω τυφώνα, ή ακόμη και σε ανθρωπογενή αίτια, όπως είναι η αστοχία αντιπλημμυρικού αναχώματος και η αστοχία φράγματος. Συνεπώς, οι αρνητικές συνέπειες που απορρέουν από ένα πλημμυρικό γεγονός ποικίλλουν ανάλογα με την ένταση του φαινομένου και μπορεί να περιλαμβάνουν βλαβερές επιπτώσεις για τον άνθρωπο και την ιδιοκτησία του, τη δημόσια υποδομή, την πολιτιστική κληρονομιά, το φυσικό περιβάλλον, τη βιομηχανική παραγωγή και την ανάπτυξη της οικονομίας.

Η έννοια πλημμυρική ζημιά θεωρητικά περιλαμβάνει όλα τα παραπάνω. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία με διττή σημασία, αυτή της υλικής φθοράς σε κατασκευή από το φυσικό φαινόμενο της πλημμύρας και αυτή της οικονομικής απώλειας, είτε λόγω υλικής φθοράς, είτε λόγω δυσλειτουργιών της αγοράς που μπορεί να έχει αποτέλεσμα μία πλημμύρα. Η διττή ερμηνεία του όρου χρησιμοποιείται συνήθως χωρίς γλωσσολογική διάκριση. Ωστόσο σημειώνονται αρκετές επιστημονικές εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία, στις οποίες γίνεται εξαρχής σαφής γλωσσολογικός διαχωρισμός για τον όρο. Οι Penning-Rowsell και Green (2000) και πιο πρόσφατα η Carol Friedland (2009) προσδιορίζουν ότι η υλική φθορά μιας πληγείσας ιδιοκτησίας από το φυσικό φαινόμενο της πλημμύρας ορίζεται ως πλημμυρική ζημιά (flood damage), ενώ η οικονομική απώλεια λόγω της υλικής φθοράς μιας πλημμυρόπληκτης κατοικίας ορίζεται ως πλημμυρική απώλεια (flood loss).

Στη συγκεκριμένη διατριβή θεωρήθηκε προτιμότερο να μην ακολουθηθεί η παραπάνω γλωσσολογική διάκριση για τον όρο πλημμυρική ζημιά, εφόσον στην ελληνική νομοθεσία δεν έχει υιοθετηθεί ο παραπάνω διαχωρισμός. Με το ίδιο σκεπτικό έγινε γλωσσολογική διάκριση μόνον σε ό,τι αφορά τον τύπο υλικής φθοράς που μπορεί να προκληθεί σε μία πληγείσα ιδιοκτησία από το φυσικό φαινόμενο της πλημμύρας. Έτσι στο κείμενο της διατριβής, η υλική φθορά λόγω πλημμύρας που δεν επηρεάζει δομικά στοιχεία μιας πλημμυρόπληκτης ιδιοκτησίας, ορίστηκε ως πλημμυρική ζημιά. Στην περίπτωση όμως, όπου η υλική φθορά αφορά και δομικά στοιχεία μιας πλημμυρόπληκτης ιδιοκτησίας και πιθανόν επηρεάζει τη γενικότερη ευστάθεια της κατασκευής, η πλημμυρική ζημιά ορίστηκε ως πλημμυρική βλάβη.

Επίσης, από τη διερεύνηση της σχετικής βιβλιογραφίας για τις μεθόδους αποτίμησης, δηλαδή της εκτίμησης με οικονομικούς όρους των πλημμυρικών συνεπειών [Penning-Rowsell and Green 2000], διαπιστώνεται μια πρόσθετη διάκριση στον προσδιορισμό της πλημμυρικής ζημιάς. Η αποτίμηση της ζημιάς σε απόλυτες τιμές υλοποιείται είτε με όρους νομισματικούς (financial) είτε με όρους οικονομικούς (economic). Στην πρώτη περίπτωση, η αποτίμηση βασίζεται στο κόστος υλικών και εργασιών αποκατάστασης ή αντικατάστασης μιας πληγείσας ιδιοκτησίας σε τιμές αγοράς, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η αποτίμηση αντανάκλα την απώλεια της αξίας (πριν την πλημμύρα) μιας πληγείσας ιδιοκτησίας σε τιμές προσαρμοσμένες στην χρονική περίοδο όπου συνέβη το πλημμυρικό γεγονός. Η διαφορά στους δύο τρόπους αποτίμησης τεκμηριώνεται από μελέτη του πανεπιστημίου του Dundee [Black and Evans 1999], σύμφωνα με την οποία η αποτίμηση πλημμυρικής ζημιάς με νομισματικούς όρους είχε ως αποτέλεσμα πολύ υψηλότερες τιμές ζημιάς σε σύγκριση με την αντίστοιχη αποτίμηση με οικονομικούς όρους.

Στη διατριβή χρησιμοποιούνται και οι δύο τρόποι αποτίμησης ανάλογα με τη διαθεσιμότητα οικονομικών στοιχείων ζημιάς στην εκάστοτε περίπτωση μελέτης. Επίσης, οι δύο τρόποι αποτίμησης δεν διακρίνονται γλωσσολογικά και επομένως η έκφραση «αποτίμηση ή εκτίμηση με οικονομικούς όρους» υποδηλώνει ποσοτικοποίηση είτε με νομισματικούς είτε με οικονομικούς όρους. Ειδική αναφορά στην ανάλυση των οικονομικών στοιχείων της πλημμυρικής ζημιάς γίνεται στο υποκεφάλαιο 7.2.

Από τη σχετική βιβλιογραφία διαπιστώνεται ακόμη ότι η αποτιμώμενη πλημμυρική ζημιά διακρίνεται σε

πραγματική (actual damage) και σε δυνητική ζημιά (damage potential). Σύμφωνα με τους Messner and Meyer (2006), η πραγματική ζημιά αναφέρεται στην εκ των υστέρων εκτίμηση, που πραγματοποιείται αμέσως μετά την πλημμύρα για την αποζημίωση των πληγέντων. Οι εκτιμήσεις πραγματικής ζημιάς προϋποθέτουν επιτόπια έρευνα πεδίου και συνεπώς είναι πολύ λεπτομερείς και προσανατολισμένες στις τοπικές ιδιαιτερότητες της πληγείσας περιοχής. Η δυνητική ζημιά οριοθετημένης περιοχής αναφέρεται στο μέγιστο μέγεθος ζημιάς που μπορεί να προκύψει λόγω πλημμύρας. Επομένως, η εκτίμησή της απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία πραγματικών, εκ των υστέρων, πλημμυρικών ζημιών.

Η διαφορά μεταξύ πραγματικής και δυνητικής πλημμυρικής ζημιάς ποικίλλει από μηδενική έως σημαντική. Για παράδειγμα σε μια κοινότητα που κατ' επανάληψη έχει πληγεί από πλημμύρες, η διαφορά αναμένεται σημαντική, διότι αναμένεται ότι οι κάτοικοι συνειδητοποιούν τον πλημμυρικό κίνδυνο και αντιδρούν άμεσα σε μια προειδοποίηση επικείμενης πλημμύρας. Σύμφωνα με μια έρευνα που έγινε στη περιοχή της πόλης του Lismore (Αυστραλία) για τη σύγκριση μεταξύ πραγματικής και δυνητικής πλημμυρικής ζημιάς σε 140 κατοικίες [Smith 1981], η πραγματική ζημιά εκτιμήθηκε μόνο 52.4% της δυνητικής ζημιάς. Με αυτό τον τρόπο αντανakλάται ο υψηλός βαθμός ετοιμότητας του τοπικού πληθυσμού στον πλημμυρικό κίνδυνο. Ο ορισμός της δυνητικής πλημμυρικής ζημιάς δείχνει ότι αναφέρεται σε ζημιά που μπορεί να αποφευχθεί εάν ληφθούν μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας στην εν δυνάμει πληγείσα περιοχή. Η εκτίμηση της δυνητικής ζημιάς θεωρείται ότι συνεισφέρει στην αξιολόγηση εναλλακτικών μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας και κατά συνέπεια ότι στηρίζει τη λήψη ανάλογων ορθολογικών πολιτικών αποφάσεων.

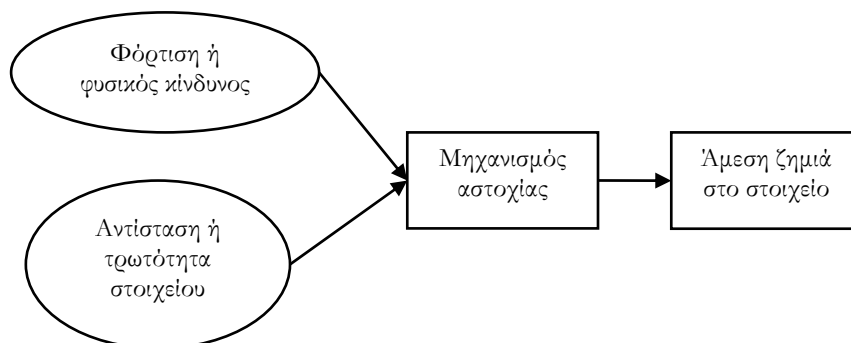
Στην πράξη, η εκτίμηση της δυνητικής ζημιάς υλοποιείται υπό σενάρια πλημμύρας με την εκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας πλημμυρικής ζημιάς. Η ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο εκτίμησης της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς και περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 της βιβλιογραφικής επισκόπησης. Γενικά, η εκτίμηση της αναμενόμενης ζημιάς (expected damage) λαμβάνει χώρα εκ των προτέρων (πριν συμβεί ένα πλημμυρικό γεγονός) και υλοποιείται υπό ένα σενάριο πλημμύρας.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η πλημμυρική ζημιά στη διατριβή μπορεί να αναφέρεται είτε σε υλική φθορά της πληγείσας κατασκευής από την άμεση επαφή πλημμυρικών νερών είτε σε οικονομική απώλεια της αξίας της πληγείσας κατασκευής. Η πρώτη ερμηνεία διακρίνεται περαιτέρω σε πλημμυρική ζημιά και σε πλημμυρική βλάβη. Στη δεύτερη περίπτωση ερμηνείας η αποτίμηση μπορεί να υλοποιηθεί είτε με νομισματικούς είτε με οικονομικούς όρους. Τέλος, η πλημμυρική ζημιά διακρίνεται σε πραγματική και σε δυνητική, ανάλογα με το εάν αναφέρεται σε ζημιά αμέσως μετά (ex post) ή πριν (ex ante) συμβεί ένα πλημμυρικό γεγονός αντίστοιχα. Όλοι οι παραπάνω ορισμοί της πλημμυρικής ζημιάς συναντώνται στο κείμενο της διατριβής.

## 2.2 Κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς

Η πιο διαδεδομένη διεθνώς κατηγοριοποίηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από ένα πλημμυρικό γεγονός, είναι η διάκριση σε άμεση (direct) και έμμεση (indirect) πλημμυρική ζημιά και σε αποτιμώμενη (tangible) και μη αποτιμώμενη (intangible) πλημμυρική ζημιά. Η άμεση πλημμυρική ζημιά αφορά σε όλους τους τύπους συνεπειών λόγω πλημμύρας που σχετίζουν τη φυσική επαφή των πλημμυρικών νερών με τον άνθρωπο, την ιδιοκτησία και το περιβάλλον [Messner and Meyer 2006]. Επομένως η άμεση πλημμυρική ζημιά, είναι το αποτέλεσμα της άμεσης έκθεσης ενός πληγέντος στοιχείου στο φυσικό φαινόμενο ενός πλημμυρικού γεγονότος. Η πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς μπορεί να μοντελοποιηθεί με την προσέγγιση φόρτισης – αντίστασης, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1. Εάν η φόρτιση από επίδραση ενός φυσικού

φαινομένου υπερβεί την αντίσταση ενός πληγέντος στοιχείου, τότε θα προκληθεί άμεση ζημιά στο στοιχείο μέσω μηχανισμού αστοχίας. Τέλος, σημειώνεται ότι η χωρική εμβέλεια της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς περιορίζεται εντός των ορίων της κατακλυσμένης περιοχής.



Εικόνα 2-1. Προσέγγιση φόρτισης – αντίστασης με αποτέλεσμα πρόκληση άμεσης ζημιάς μέσω μηχανισμού αστοχίας

Η έμμεση πλημμυρική ζημιά αναφέρεται στη ζημιά που χρονικά ακολουθεί μετά το πέρας του πλημμυρικού γεγονότος και μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργίες στην οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα της περιοχής. Αυτή η κατηγορία ζημιάς καλύπτει και περιοχές εκτός των ορίων της κατακλυσμένης περιοχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα άμεσης και έμμεσης πλημμυρικής ζημιάς παρουσιάζονται στον Πίνακας 2-1. Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακας 2-1, η άμεση και έμμεση πλημμυρική ζημιά διακρίνονται αντίστοιχα σε αποτιμώμενη ζημιά και μη. Η αποτιμώμενη ζημιά μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά με οικονομικούς όρους σε αντίθεση με τη μη αποτιμώμενη ζημιά, η οποία είναι πολύ δύσκολο ή ανέφικτο να αποτιμηθεί με οικονομικούς όρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μη αποτιμώμενης, άμεσης πλημμυρικής ζημιάς είναι η απώλεια ανθρώπινης ζωής ή η επιφάνεια οικισμού που ρυπάνθηκε.

Παρά το γεγονός ότι η κατηγοριοποίηση πλημμυρικής ζημιάς σε άμεση και έμμεση, και σε αποτιμώμενη και μη αποτιμώμενη ζημιά είναι ευρέως αποδεκτή, στη βιβλιογραφία συχνά υπάρχουν διαφορετικές ερμηνείες ή παραλλαγές του ορισμού των κατηγοριών αυτών. Για παράδειγμα, οι Jonkman et al. (2008) ορίζουν την άμεση ζημιά ως τη ζημιά που συμβαίνει εντός των ορίων κατάκλυσης, και την έμμεση ζημιά ως τη ζημιά που συμβαίνει εκτός των ορίων κατάκλυσης. Οι Penning-Rowsell και Green (2000) διακρίνουν για την έμμεση ζημιά δύο επιπλέον υποκατηγορίες ανάλογα με το εάν η ζημιά εντοπίζεται εντός ή εκτός κατακλυσμένης περιοχής και αναφέρονται σε (α) έμμεση πλημμυρική ζημιά, η οποία σχετίζεται με τις απώλειες στην παραγωγή οικονομικών αγαθών της πληγείσας περιοχής και με τα έξοδα εικένωσης των πληγέντων κατοίκων και (β) σε δευτερεύουσα έμμεση πλημμυρική ζημιά, η οποία σχετίζεται με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει ένα πλημμυρικό γεγονός στην οικονομική ανάπτυξη εκτός των ορίων της πληγείσας περιοχής.

Πίνακας 2-1. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των κατηγοριών πλημμυρικής ζημιάς

	Αποτιμώμενη	Μη αποτιμώμενη
Άμεση	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Κατοικίες</li> <li>▪ Κτήρια εμπορικής και βιομηχανικής χρήσεως</li> <li>▪ Έργα δημόσιας υποδομής (δρόμοι, γέφυρες, αναχώματα κτλ)</li> <li>▪ Οχήματα</li> <li>▪ Αγροτική γη</li> <li>▪ Πανίδα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Απώλεια ανθρώπινης ζωής</li> <li>▪ Τραυματισμός</li> <li>▪ Απώλειες πολιτιστικής κληρονομιάς</li> <li>▪ Ρύπανση / μόλυνση οικοσυστημάτων</li> </ul>
Έμμεση	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Έξοδα εκκένωσης και προσωρινής στέγασης των πληγέντων</li> <li>▪ Έξοδα καθαρισμού των συντριμμίων</li> <li>▪ Απώλεια οικονομικής παραγωγής λόγω κατεστραμμένων εγκαταστάσεων</li> <li>▪ Έλλειψη αποθεμάτων ενέργειας και τηλεπικοινωνίας</li> <li>▪ Διαταραχή των κτηματομεσιτικών αγορών π.χ. μείωση τιμών αξίας γης</li> <li>▪ Μείωση ανταγωνιστικότητας συγκεκριμένων τομέων οικονομίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Απώλεια χρόνου λόγω κυκλοφοριακής δυσλειτουργίας</li> <li>▪ Κοινωνική δυσλειτουργία</li> <li>▪ Έλλειψη εμπιστοσύνης στην αποτελεσματικότητα των κρατικών λειτουργιών</li> <li>▪ Ψυχική / ψυχολογική βλάβη</li> <li>▪ Ανεργία</li> <li>▪ Μείωση παραγωγικότητας</li> </ul>

Μέχρι σήμερα σημαντικός αριθμός δημοσιευμάτων αποδεικνύει την εκτενή ειδίκευση στο πεδίο εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς. Ωστόσο μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την εκτίμηση όλων των κατηγοριών πλημμυρικής ζημιάς λείπει από τη βιβλιογραφία. Οι ειδικοί επιστήμονες και οι ακαδημαϊκοί διαφωνούν ως προς τις μεθόδους εκτίμησης και τα μοντέλα που εφαρμόζονται. Ακόμη, σημειώνονται σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την χωρική και τη χρονική κλίμακα ανάλυσης [Messner and Meyer 2006], που εφαρμόζεται για τη μοντελοποίηση της ζημιάς, και επίσης τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων ζημιάς μπορεί να σχετίζονται με σημαντική αβεβαιότητα [Merz et al. 2004]. Σημειώνουμε ακόμη μεμονωμένες προσεγγίσεις που επικεντρώνονται στις επιπτώσεις της πλημμυρικής ζημιάς στο φυσικό περιβάλλον [Stuyt et al. 2003], στην απώλεια ανθρώπινης ζωής [Jonkman and Kelman 2005, Jonkman 2007], στη δημόσια υγεία [Ahern et al. 2005, Penning-Rowsell and Green 2000], και στη μείωση της ανάπτυξης της τοπικής οικονομίας [van der Veen et al. 2005]. Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις ανήκουν στις κατηγορίες είτε της άμεσης, μη αποτιμώμενης ζημιάς είτε της έμμεσης αποτιμώμενης και μη αποτιμώμενης ζημιάς.

Η υποκατηγορία ζημιάς που συγκεντρώνει τη συντριπτική πλειοψηφία του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας είναι η άμεση, αποτιμώμενη πλημμυρική ζημιά. Επειδή αυτή η υποκατηγορία ζημιάς θα εξεταστεί στην παρούσα διατριβή, οι μέθοδοι εκτίμησης περιγράφονται αναλυτικά σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν, παρουσιάζονται συνοπτικά χαρακτηριστικά παραδείγματα των υπόλοιπων υποκατηγοριών πλημμυρικής ζημιάς.

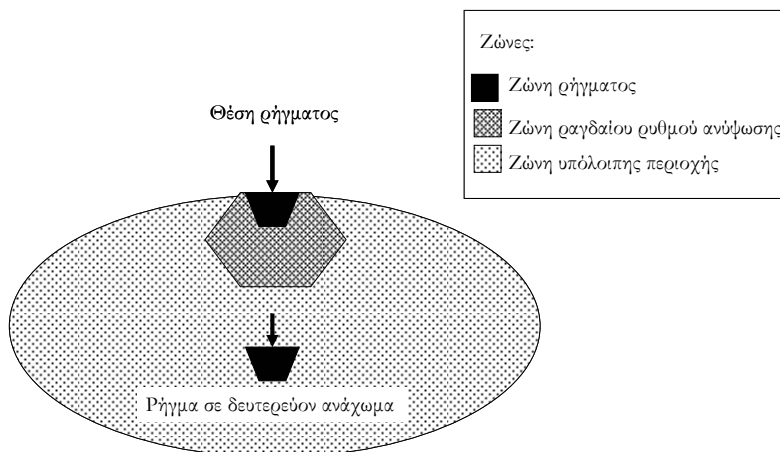
## 2.2.1 Άμεση, μη αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά

Αρκετές οικονομικές μελέτες για την αποτίμηση των άμεσων επιπτώσεων λόγω πλημμύρας στην υγεία των πληγέντων [Johnson et al. 2000, Liu et al. 2000, Sendi et al. 2002] και στο φυσικό περιβάλλον [Bateman et al. 1999, Garrod and Willis 1999] έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία και το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της υποκατηγορίας ζημιάς είναι η απώλεια ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας. Οι Jonkman et al. (2003) αναφέρονται σε αξιοσημείωτες μεθόδους αποτίμησης της ανθρώπινης ζωής που εντοπίζονται σε βιβλιογραφία σχετική με τη διαχείριση διακινδύνευσης και ασφάλειας. Ωστόσο, η αποτίμηση της ανθρώπινης ζωής θεωρείται από πολλούς πράξη με ηθικά διλήμματα και κατά συνέπεια αυτή αποτελεί αμφιλεγόμενο πεδίο επιστημονικής έρευνας.

Αντίθετα, η εκτίμηση του πλήθους απωλειών ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας είναι αποδεκτή και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Εκτεταμένη και πρωτοποριακή έρευνα στον τομέα αυτό διεξάχθηκε από τον W. J. Graham (1999), ο οποίος ασχολήθηκε με την εκτίμηση του δυνητικού αριθμού απωλειών ζωής μετά από υποθετική θραύση φράγματος. Ο Graham στήριξε την ανάλυση του σε ιστορικά στοιχεία αστοχιών φραγμάτων που συνέβησαν στις ΗΠΑ μετά το 1960, βάσει των οποίων ανέπτυξε εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της ανθρώπινης ζωής. Εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου κατά Graham στο ελληνικό φράγμα του Σμοκόβου (Νομός Καρδίτσας), υλοποιήθηκε από τους Πιστρίκα και Τσακίρης (2008).

Η πιο πρόσφατη και ολοκληρωμένη έρευνα για την εκτίμηση του αριθμού απωλειών ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας πραγματοποιήθηκε το 2007 από τον S. N. Jonkman, ως αντικείμενο έρευνας της διδακτορικής του διατριβής [Jonkman 2007]. Ο Jonkman, ερευνητής στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft, κατέληξε ότι το πλήθος απωλειών ζωής λόγω πλημμύρας μπορεί να εκτιμηθεί με βάση: (α) τα μεγέθη πλημμύρας, (β) τον εκτεθειμένο πληθυσμό και την πιθανότητα εκκένωσης και (γ) τη θνησιμότητα του εκτεθειμένου πληθυσμού. Η πληροφορία για τα πλημμυρικά μεγέθη λαμβάνεται από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων πλημμύρας χρησιμοποιώντας υδροδυναμικά μοντέλα. Πλημμυρικά μεγέθη που σχετίζονται με την απώλεια ανθρώπινης ζωής είναι το βάθος νερού, ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και η ταχύτητα ροής. Ο εκτεθειμένος πληθυσμός ισούται με τον αριθμό κατοίκων στην εν δυνάμει πληγείσα περιοχή μείον τον πληθυσμό που μπορεί να εκκενώσει την περιοχή ή να βρει καταφύγιο μέσα σε αυτή. Για τη μοντελοποίηση της εκκένωσης χρησιμοποιεί το μοντέλο που ανέπτυξαν οι van Zuilekom et al. (2005). Τέλος, η θνησιμότητα του εκτεθειμένου πληθυσμού ισούται με τον αριθμό των απωλειών ανθρώπινης ζωής προς τον εκτεθειμένο πληθυσμό και προσδιορίζεται από τις συναρτήσεις θνησιμότητας, οι οποίες συνδέουν τις παρατηρημένες τιμές θνησιμότητας με τα πλημμυρικά μεγέθη.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ο Jonkman διέκρινε τρεις ζώνες (βλέπε Εικόνα 2-2) που έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά χαρακτηριστικά πλημμύρας και διαφορετικές τιμές θνησιμότητας για: (α) τη ζώνη ρήγματος, όπου το αντιπλημμυρικό ανάχωμα αστοχεί, (β) τη ζώνη ραγδαίου ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικών νερών και (γ) τη ζώνη της υπόλοιπης περιοχής. Η ζώνη ρήγματος χαρακτηρίζεται από κατάρρευση κτηρίων και υψηλές τιμές θνησιμότητας λόγω της μέγιστης ορμής πλημμυρικών νερών ακριβώς κατάντη του αναχώματος και η ζώνη ραγδαίου ρυθμού ανύψωσης νερού χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλές τιμές θνησιμότητας, διότι συνήθως οι πληγέντες δεν έχουν αρκετό χρόνο να φτάσουν σε καταφύγιο. Για κάθε ζώνη, η συνάρτηση θνησιμότητας αναπτύχθηκε με βάση παρατηρημένες τιμές από ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα που περιλαμβάνουν την καταστροφική πλημμύρα το 1953 στην Ολλανδία και την καταστρεπτική πλημμύρα το 2005 στη Νέα Ορλεάνη λόγω του τυφώνα Κατρίνα. Με την παραπάνω μέθοδο, η απώλεια ανθρώπινης ζωής μπορεί να εκτιμηθεί σε αριθμό υπό συγκεκριμένο σενάριο πλημμύρας.



Εικόνα 2-2. Ζώνες εκτίμησης απώλειας ανθρώπινης ζωής [Jonkman 2007]

### 2.2.2 Έμμεση, αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά

Η κατηγορία της έμμεσης ζημιάς συνήθως δεν περιλαμβάνεται στο αντικείμενο έρευνας των αναλυτών που ασχολούνται με τη διερεύνηση της πλημμυρικής ζημιάς. Ωστόσο από τη βιβλιογραφική επισκόπηση διαπιστώνεται ότι η εκτίμηση της έμμεσης, αποτιμώμενης πλημμυρικής ζημιάς συγκεντρώνει όλο και πιο αυξημένο επιστημονικό ενδιαφέρον.

Οι οικονομικές ζημιές που συνδέονται με δυσλειτουργία αγοράς και μείωση της οικονομικής ανάπτυξης, διακρίνονται σε εκείνες που οφείλονται σε δυσλειτουργία της τοπικής αγοράς εντός της κατακλυσμένης περιοχής και σε εκείνες που συνδέονται με την απώλεια επικοινωνίας με το ευρύτερο οικονομικό δίκτυο, π.χ. της περιφέρειας ή της χώρας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τελευταίες συχνά προσδιορίζονται ως δευτερεύουσες έμμεσες πλημμυρικές ζημιές [Penning-Rowsell and Green 2000]. Συνεπώς, όταν η οικονομική δραστηριότητα της πληγείσας περιοχής παγώσει, το γεγονός αυτό δεν σημαίνει μόνο απώλεια της τοπικής παραγωγής, αλλά και μείωση στην προμήθεια αγαθών στους καταναλωτές εντός των ορίων της πληγείσας περιοχής. Αυτή η κατάσταση μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε δυσμενείς επιπτώσεις για άλλους τομείς της οικονομίας, που είναι στενά συνδεδεμένοι με την ενδιάμεση παραγωγή προϊόντων, το εμπόριο και τις υπηρεσίες, όπως είναι οι τηλεπικοινωνίες και οι συναλλαγές των επιχειρήσεων. Ειδικά στις περιπτώσεις των διαδικασιών παραγωγής εξαγωγίμων αγαθών ή των τομέων της οικονομίας που είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένοι, πιθανόν να μην υπάρχει η δυνατότητα να μεταφερθεί η ζημιωμένη παραγωγή σε άλλους εθνικούς κατασκευαστές. Είναι πιθανόν, λοιπόν, ένα μέρος της παραγωγής να χαθεί και να επηρεαστούν αρνητικά οι εξαγωγές των συγκεκριμένων προϊόντων.

Συνήθως, η έμμεση οικονομική ζημιά με τη μορφή απώλειας παραγωγής και πωλήσεων στην πληγείσα περιοχή συμπεριλαμβάνεται στην αποτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς εφαρμόζοντας σταθερούς πολλαπλασιαστές στις εκτιμήσεις της άμεσης ζημιάς. Αντίθετα, η δευτερεύουσα έμμεση οικονομική ζημιά που αφορά τις επιπτώσεις της πλημμύρας έξω από την πληγείσα περιοχή, συχνά αγνοείται λόγω έλλειψης ιστορικών στοιχείων [Penning-Rowsell et al. 2003]. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ένα πλαίσιο μοντελοποίησης που να καλύπτει τη λειτουργία του οικονομικού συστήματος, καθώς επίσης και τις τυχόν δυσλειτουργίες του. Οι αναλυτικές μέθοδοι για την εκτίμηση αυτού του τύπου έμμεσης οικονομικής ζημιάς έχουν διερευνηθεί και περιλαμβάνουν παραλλαγές των γενικών ισορροπημένων μοντέλων (General Equilibrium Models) [Rose 2004], τα μοντέλα εισόδου-εξόδου (input – output ή I- O) [Cole 2004, van der Veen et al. 2003], τα μακρο-μοντέλα (macro-models) [Freeman et al. 2004, Mechler 2004] και τον γραμμικό προγραμματισμό. Η

πιο διαδεδομένη προσέγγιση στην ακαδημαϊκή κοινότητα είναι τα μοντέλα I–O [Cole 2004, van der Veen et al. 2003], γνωστά για την απλή δομή τους η οποία αντανακλά τη δομή της οικονομίας με τη μορφή συναλλαγών μεταξύ των παραγωγικών τομέων εξόδου, των απαιτήσεων της ζήτησης και των πρωτευόντων δεδομένων εισόδου.

### 2.2.3 Έμμεση, μη αποτιμώμενη, πλημμυρική ζημιά

Παρά το γεγονός ότι οι οικονομικές μέθοδοι για την αποτίμηση των μη αποτιμώμενων πλημμυρικών ζημιών έχουν δημοσιευτεί εδώ και πολλά χρόνια στη βιβλιογραφία των οικονομικών μελετών [Hanley and Spash 1993] δεν εφαρμόζονται στο πλαίσιο ανάλυσης πλημμυρικής ζημιάς. Ένας προφανής λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι εκτιμήσεις πλημμυρικής ζημιάς υλοποιούνται συνήθως από μηχανικούς ή υδρολόγους με θεωρητικό υπόβαθρο βασικών εφαρμοσμένων γνώσεων των οικονομικών. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, οι οικονομικές μέθοδοι που σχετίζονται με τις επιδράσεις της κοινωνικής ευημερίας στο σύνολο της οικονομίας μπορεί να μην είναι εύκολο να αναγνωριστούν και να εφαρμοστούν. Επίσης, μερικοί αναλυτές υποστηρίζουν ότι οι επιπτώσεις της έμμεσης, μη αποτιμώμενης πλημμυρικής ζημιάς είναι αμελητέες σε σύγκριση με την άμεση, αποτιμώμενη πλημμυρική ζημιά, αλλά όσο αυτή η άποψη δεν έχει εξεταστεί και τεκμηριωθεί, θεωρείται αυθαίρετη υπόθεση χωρίς επιστημονική βάση.

Αξιοσημείωτη προσπάθεια να αποτιμηθεί αυτού του τύπου η πλημμυρική ζημιά, αποτελεί μια πειραματική ανάλυση από τους Green και Penning-Rowsell (1989), η οποία έλαβε χώρα σε παραθαλάσσιες περιοχές στην Αγγλία. Η ανάλυση αυτή συσχέτισε τις γνωστές άμεσες αποτιμώμενες ζημιές (σε περίβλημα και περιεχόμενο κτηρίου) με τις μη αποτιμώμενες έμμεσες ζημιές, χρησιμοποιώντας ισοδύναμες αξίες των τελευταίων. Η προσέγγιση αυτή υλοποιήθηκε μέσω ευρείας κοινωνικής έρευνας σε θύματα πλημμύρας. Οι ερευνητές ζήτησαν από τους ερωτηθέντες να βαθμολογήσουν τον αντίκτυπο μη αποτιμώμενης, έμμεσης ζημιάς, όπως είναι η απώλεια μνήμης και ο φόβος για τον κίνδυνο μελλοντικής πλημμύρας, σε μία κλίμακα από 1 μέχρι 10. Στη συνέχεια, η υποκειμενική αυτή εκτίμηση σχετίστηκε μέσω συνάρτησης παλινδρόμησης, με μία από τις γνωστές άμεσες, αποτιμώμενες ζημιές. Σύμφωνα με τους Green και Penning-Rowsell (1989) τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι τα οικονομικά ισοδύναμα των εμμέσων, μη αποτιμώμενων πλημμυρικών ζημιών προέκυψαν σχεδόν διπλάσια από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις των άμεσων αποτιμώμενων ζημιών.

Ανακεφαλαιώνοντας φαίνεται ότι η εκτίμηση των πλημμυρικών ζημιών στο σύνολο τους δεν πρέπει να υλοποιείται μόνον με βάση τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης κόστους – οφέλους. Ωστόσο, ακόμη και εάν αναπτυχθούν νέες μέθοδοι εκτίμησης μη αποτιμώμενων ζημιών, θα υπάρχει πάντα ένας αριθμός ζημιών, ο οποίος είτε δεν θα είναι εφικτό είτε δεν θα είναι ηθικά αποδεκτό να ποσοτικοποιηθεί με οικονομικούς όρους. Τέτοια παραδείγματα ζημιών αποτελούν η απώλεια πολύτιμων συναισθηματικά αντικειμένων και η απώλεια πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι πιο πρόσφατες προσεγγίσεις στην έρευνα για την εκτίμηση πλημμυρικής ζημιάς δεν λαμβάνουν υπόψη τους την έμμεση, μη αποτιμώμενη πλημμυρική ζημιά, αν και εμπειρικές έρευνες έχουν δείξει ότι πολλές φορές ο αντίκτυπος αυτού του τύπου ζημιάς είναι μεγαλύτερος από οποιαδήποτε άλλη [Green et al. 1994]. Σήμερα, η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων στο πλαίσιο ανάλυσης της πλημμυρικής ζημιάς αποτελεί αντικείμενο έρευνας με στόχο η μη αποτιμώμενη, έμμεση πλημμυρική ζημιά να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης.



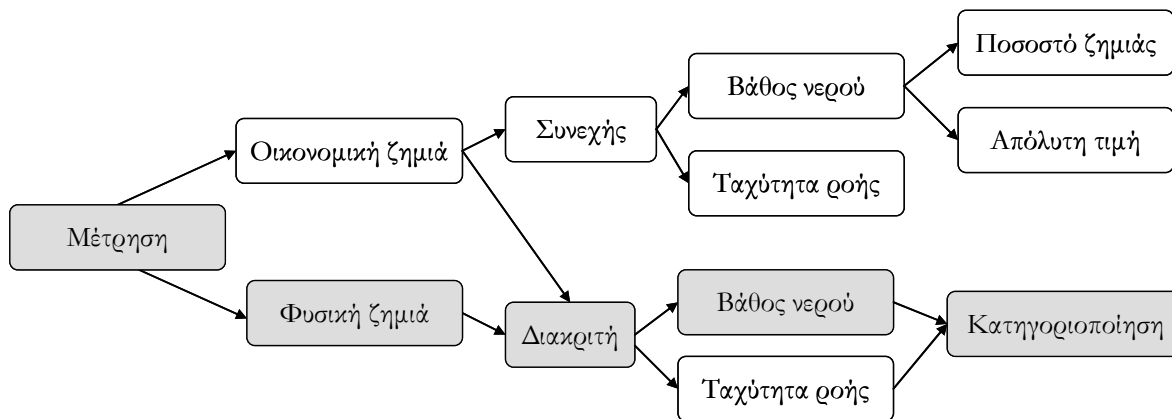
## 2.3 Παράμετροι ανάλυσης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

Η ανάλυση άμεσης ζημιάς λόγω πλημμύρας σε δομημένο περιβάλλον απαιτεί τον προσδιορισμό πολλών διαφορετικών παραμέτρων. Η παράμετρος της μέτρησης που διακρίνει τη ζημιά σε ποιοτική και ποσοτική, έχει ήδη συζητηθεί σε προηγούμενα υποκεφάλαια. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες παράμετροι, που συμμετέχουν στο πλαίσιο ανάλυσης και θεωρούνται αναγκαίες στην εφαρμογή της γενικής μεθοδολογίας εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Αυτές περιλαμβάνουν:

- την μέτρηση
- τον τύπο κλίμακας (π.χ. συνεχείς ή διακριτές τιμές)
- την κατηγορία πλημμύρας
- το στοιχείο δομημένου περιβάλλοντος (π.χ. περίβλημα κτηρίου, περιεχόμενο, και τα δύο)
- την χωρική κλίμακα ανάλυσης (π.χ. ανά κτήριο, ανά διαμέρισμα, ανά πληγείσα περιοχή)
- τη μονάδα μέτρησης (π.χ. ποσοστό, απόλυτη τιμή)

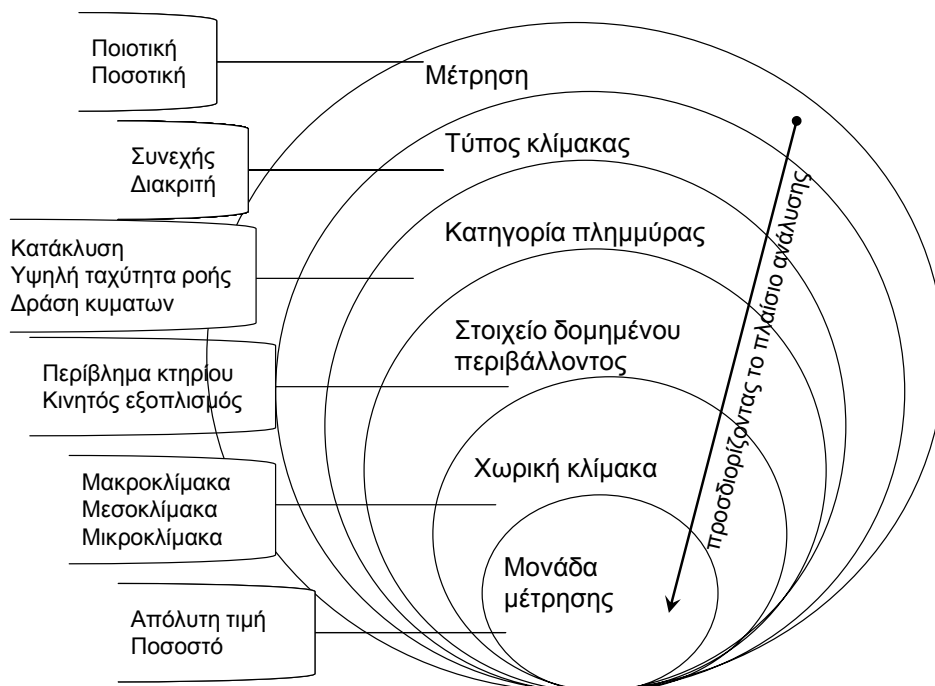
Οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν επίσης στην ανάλυση πλημμυρικής ζημιάς λόγω τυφώνα στην ερευνητική εργασία της Carol Friedland (2009).

Ανάλογα με την περίπτωση εκτίμησης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, οι παράμετροι αυτές προσαρμόζονται ώστε να εκφράζουν κάθε φορά τις ανάγκες και απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων. Ένα απλοποιημένο παράδειγμα προσδιορισμού παραμέτρων ανάλυσης ζημιάς δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα δενδρικού τύπου, στο οποίο έχουν τονιστεί οι παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για μια μέτρηση ζημιάς που δεν υλοποιείται μέσω αποτίμησης με οικονομικούς όρους αλλά μέσω κατηγοριοποίησής της με βάση κλάσεις βάθους νερού.



Εικόνα 2-3. Προσδιορισμός παραμέτρων ανάλυσης ζημιάς βάσει διαγράμματος δενδρικού τύπου

Στα εδάφια που ακολουθούν περιγράφεται συνοπτικά η κάθε παράμετρος, όπως προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις της διατριβής. Η Εικόνα 2-4 απεικονίζει γραφικά τη συνήθη χρονική ακολουθία διερεύνησης των παραμέτρων στην προσπάθεια οριοθέτησης του πλαισίου εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Επίσης, στην Εικόνα 2-4 απεικονίζονται για κάθε παράμετρο ενδεικτικά παραδείγματα των τιμών της.



Εικόνα 2-4. Παράμετροι ανάλυσης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

### 2.3.1 Μέτρηση

Οι τεχνικές μέτρησης της πλημμυρικής ζημιάς περιορίζονται γενικά σε αποτίμηση ή σε ενδείξεις φυσικής ζημιάς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.1, η αποτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς μπορεί να υλοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας το κόστος αντικατάστασης / αποκατάστασης, την υποτιμημένη αξία του πληγέντος κτηρίου ή συνδυασμό και των δύο παραπάνω. Οι μετρήσεις της φυσικής ζημιάς περιλαμβάνουν άμεσες, επιτόπιες παρατηρήσεις και καταγραφές (π.χ. της μέγιστης πλημμυρικής στάθμης) και έμμεσες μετρήσεις (π.χ. της διάρκειας παραμονής πλημμυρικών νερών και του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης). Οι παρατηρημένες τιμές φυσικής ζημιάς μετριοούνται είτε ποιοτικά όταν καταλήγουν σε κατηγοριοποίηση ζημιάς (π.χ. σε ελάχιστη, μέτρια, μεγάλη, πολύ μεγάλη και κατάρρευση [Schwarz and Maiwald 2008]) είτε ποσοτικά όταν βάσει των ενδείξεων υλικής φθοράς εκτιμάται το κόστος των εργασιών αποκατάστασης ζημιάς.

### 2.3.2 Τύπος κλίμακας

Η αποτίμηση ή ποιοτική βαθμονόμηση ζημιάς υλοποιείται χρησιμοποιώντας συνεχείς ή διακριτές κλίμακες μέτρησης. Οι συνεχείς κλίμακες μέτρησης είναι οι συνηθέστερες και χρησιμοποιούνται σε συναρτήσεις παλινδρόμησης για να εκφράσουν μέσες τιμές ή αναμενόμενες τιμές ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων. Οι διακριτές κλίμακες μέτρησης χαρακτηρίζονται από σημεία καμπής (breakpoints) που οριοθετούν συγκεκριμένες καταστάσεις ζημιάς. Συνήθως διακριτές κλίμακες μέτρησης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση φυσικής ζημιάς λόγω πλημμύρας και εφαρμόζονται σε επιτόπιες έρευνες καταγραφής της πλημμυρικής ζημιάς λόγω ευκολίας στην χρήση τους.

Γενικά είναι ελάχιστες οι διακριτές κλίμακες μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ζημιάς και ίσως η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι αυτή που εφαρμόζεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα «Εκτιμητής

ουσιαστικής ζημιάς σε κατοικίες» (Residential Substantial Damage Estimator - RSDE) [FEMA 2001]. Το πρόγραμμα RSDE αναπτύχθηκε από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Έκτακτων Αναγκών των ΗΠΑ για την επιθεώρηση κατοικιών που έχουν υποστεί βλάβη από πλημμύρα και χρησιμοποιεί κλάσεις βάθους νερού για προκαταρκτική οικονομική εκτίμηση της άμεσης ζημιάς σε κατοικίες.

### 2.3.3 Κατηγορία πλημμύρας

Η παράμετρος «κατηγορία πλημμύρας» αφορά στον τύπο πλημμυρικού κινδύνου που προκαλεί την άμεση ζημιά σε δομημένο περιβάλλον. Γενικά, στη διεθνή βιβλιογραφία [Jonkman 2007] διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι πλημμύρας ανάλογα με την πηγή προέλευση τους:

- **Παράκτια πλημμύρα:** είναι εκείνη που συμβαίνει κατά μήκος παραθαλάσσιας ακτογραμμής ή παραλίμνιας ακτογραμμής. Συγκεκριμένα, τυφώνες ή κυκλώνες σε συνδυασμό με χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση προκαλούν απότομη άνοδο της στάθμης της θάλασσας ή της λίμνης, πλημμυρίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις παράκτιες περιοχές.
- **Ταχείας απόκρισης πλημμύρα:** είναι εκείνη που προκαλείται αμέσως μετά το πέρας μίας τοπικής καταιγίδας υψηλής έντασης, συνήθως σε εδάφη με απότομη κλίση (ορεινές περιοχές). Αυτός ο τύπος πλημμύρας χαρακτηρίζεται από υψηλό ρυθμό ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης, και μικρό χρόνο ειδοποίησης.
- **Ποτάμια πλημμύρα:** είναι εκείνη που συμβαίνει λόγω υπερχείλισης ενός ποταμού. Τα αίτια υπερχείλισης ενός ποταμού μπορεί να είναι μεγάλα ύψη βροχόπτωσης, το λιώσιμο του χιονιού και η μείωση της παροχετευτικότητας του ποταμού λόγω στένωσης ή μπάζωματος των διατομών ή η αστοχία αντιπλημμυρικών αναχωμάτων κατά μήκος του ποταμού.
- **Πλημμύρα από σεισμικά θαλάσσια κύματα ή τσουνάμι (tsounamis).** Στη περίπτωση αυτή, μία διαδοχή από κύματα μεγάλου όγκου, τα οποία προκλήθηκαν από υποθαλάσσιο σεισμό ή κατολίσθηση ή έκρηξη ηφαιστείου, διανύει πολύ μεγάλες αποστάσεις και φτάνει στην ακτή με τη μορφή ενός τεράστιου παλιρροιακού κύματος.
- **Πλημμύρα από θραύση μεγάλου φράγματος:** είναι εκείνη που επηρεάζει την περιοχή αμέσως κατά την ενός φράγματος. Αυτός ο τύπος πλημμύρας έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία διόδευση ενός πλημμυρικού κύματος μέσα από την εκτεθειμένη περιοχή.
- **Πλημμύρα από ανεπάρκεια αποχετευτικού συστήματος όμβριων υδάτων.** Αυτός ο τύπος πλημμύρας προκαλείται από μεγάλα ύψη βροχόπτωσης που υπερβαίνουν την παροχή σχεδιασμού του υφιστάμενου δικτύου ομβρίων.

Η ανάλυση όμως, της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον δημιούργησε την ανάγκη ομαδοποίησης των παραπάνω τύπων πλημμύρας σε τρεις βασικές κατηγορίες με βάση τα κοινά χαρακτηριστικά πλημμυρικά μεγέθη που τίθενται κάθε φορά υπό εξέταση:

- **Πλημμύρα με κατάκλυση,** που μπορεί να οφείλεται σε υπερχείλιση ποταμού ή σε ανεπάρκεια ενός αποχετευτικού συστήματος όμβριων υδάτων. Σε αυτή την κατηγορία πλημμύρας κυρίαρχες πλημμυρικές δράσεις αποτελούν η άμεση επαφή πλημμυρικού νερού με στοιχεία κτηρίου και η υδροστατική πίεση λόγω υψομετρικής διαφοράς του βάθους νερού μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας ενός κτηρίου.

- **Πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής**, που μπορεί να οφείλεται σε αστοχία αντιπλημμυρικών αναχωμάτων ή σε πλημμύρα ταχείας απόκρισης. Πρόκειται για ένα φαινόμενο στο οποίο οι τοπικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης ζημιάς. Κυρίαρχα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτού του τύπου πλημμύρας μπορεί να είναι η υψηλή ταχύτητα ροής, η τυρβώδης ροή, η εκδήλωση κυματισμών, η μεταφορά φερτών υλικών και η δύναμη της άνωσης.
- **Πλημμύρα με δράση μεγάλων κυμάτων**, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε παράκτια πλημμύρα με την εκδήλωση παλιρροιακών κυμάτων που προέρχονται από τσουνάμι, είτε σε θραύση μεγάλου φράγματος. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο, στο οποίο μπορεί να παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση ζημιάς και αλλά φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η επίδραση του ανέμου. Κυρίαρχα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτού του τύπου πλημμύρας μπορεί να είναι η δράση κυμάτων, η υψηλή ταχύτητα ροής, ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης, η ιζηματοπόθεση και η δύναμη της άνωσης.

Οι παραπάνω κατηγορίες πλημμύρας προκύπτουν από την επισκόπηση των πλημμυρικών δράσεων, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Η κατηγοριοποίηση αυτή τονίζει την αναγκαιότητα να συμπεριληφθούν στην ανάλυση της ζημιάς περισσότερες πλημμυρικές δράσεις πέρα από τη βαθμιαία ανύψωση του βάρους νερού.

### 2.3.4 Στοιχείο δομημένου περιβάλλοντος

Η παράμετρος αυτή προσδιορίζει την έννοια «δομημένο περιβάλλον» και αναφέρεται ή στο περίβλημα των πληγέντων κτηρίων ή στον κινητό εξοπλισμό τους ή και στα δύο μαζί. Η παράμετρος αυτή λαμβάνεται υπόψη στην αποτίμηση της άμεσης ζημιάς, καθώς μπορεί να διαφοροποιήσει σημαντικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας αποτίμησης.

Η άμεση ζημιά λόγω πλημμύρας με κατάκλυση σε δομημένο περιβάλλον, συνήθως εκδηλώνεται με φθορά σε επιχρίσματα των εξωτερικών και εσωτερικών χώρων, σε μόνωση, δάπεδα, κουφώματα, μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. Πέρα από τη ζημιά στο περίβλημα του πληγέντος κτηρίου, τις περισσότερες φορές καταγράφεται και αποτιμάται η εκτεταμένη ζημιά ή η καταστροφή στον κινητό εξοπλισμό, δηλαδή στο περιεχόμενο του κτηρίου. Αντίθετα, στην περίπτωση πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και ενδεχόμενη δράση πλημμυρικού κύματος, η άμεση ζημιά σε δομημένο περιβάλλον εκδηλώνεται με ρηγματώσεις, καταρρεύσεις τοίχων, και διάβρωση θεμελίωσης. Σε αυτή την περίπτωση η αποτίμηση της ζημιάς, συνήθως δεν περιλαμβάνει την ζημιά στον κινητό εξοπλισμό του κτηρίου. Όταν η άμεση ζημιά αναφέρεται μόνο στο περίβλημα διακρίνεται ανάλογα με τη σφοδρότητά της σε δομική και μη δομική ζημιά. Ειδική αναφορά σε αυτούς τους τύπους ζημιάς γίνεται στο υποκεφάλαιο 2.4.

### 2.3.5 Κλίμακα χωρικής ανάλυσης

Η κλίμακα χωρικής ανάλυσης αποτελεί καθοριστικής σημασίας παράμετρος για την εφαρμογή της μεθοδολογίας εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Η ανάλυση της ζημιάς συνήθως υλοποιείται και εφαρμόζεται σε χωρικό επίπεδο συνόλων κτηρίων (aggregation levels), τα οποία περιλαμβάνουν διαφοροποιήσεις μιας δομημένης περιοχής ανάλογα με την χρήση, τον τύπο κτηρίου και τα λοιπά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τους Gewalt et al. 1996 (όπως αναφέρεται στο Messner and Meyer, 2006), η μακροκλίμακα, μεσοκλίμακα και μικροκλίμακα προσδιορίζει το χωρικό επίπεδο ανάλυσης της ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον ως εξής:

- Η ανάλυση σε μακροκλίμακα (macro-scale analysis) αφορά σε ανάλυση ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεγέθους δήμων ή και μεγαλύτερο και θεωρείται δεδομένη η ομοιόμορφη κατανομή ζημιάς στην περιοχή υπό εξέταση. Ο βαθμός λεπτομέρειας σε αυτό το χωρικό επίπεδο ανάλυσης είναι μικρός και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική ανακρίβεια σε περίπτωση αναγωγής των αποτελεσμάτων σε μεμονωμένα κτήρια. Ωστόσο αυτού του χωρικού επιπέδου η ανάλυση είναι μια χρήσιμη προσέγγιση για αδρομερή προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εξαιρετικά εκτεταμένες γεωγραφικά ερευνητικές εργασίες, όπως είναι η έρευνα για την άνοδο της επιφάνειας της θάλασσας.
- Η ανάλυση σε μεσοκλίμακα (meso-scale analysis) βασίζεται σε χωρικά σύνολα κτηρίων, τα οποία διαφοροποιούνται με βάση την χρήση των κτηρίων, σε κατοικίες, επαγγελματικές στέγες, αποθήκες και κτήρια βιομηχανικών χρήσεων. Συνήθως πρακτική σε αυτή την κλίμακα χωρικής ανάλυσης είναι η ανάπτυξη σχετικών καμπύλων βάθους νερού – ζημιάς, οι οποίες εφαρμόζονται σε υπολογιστικό περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με στόχο την οικονομική εκτίμηση της ζημιάς σε διαφορετικά βάθη νερού για την περιοχή υπό εξέταση.
- Η ανάλυση σε μικροκλίμακα (micro-scale analysis) συνίσταται στην εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς για ένα συγκεκριμένο τύπο κτηρίου. Η ανάλυση αυτού του χωρικού επιπέδου απαιτεί γνώση της αξίας των μεμονωμένων κτηρίων ή πρόσθετη διαφοροποίηση σε υποκατηγορίες των γενικών κατηγοριών χρήσεων κτηρίου, όπως συνέβη στην ερευνητική εργασία των Penning-Rowsell and Chatterton (1977) (βλέπε εδάφιο 4.2.1).

Συμφωνα με τους Messner and Meyer (2006), ο Πίνακας 2-2 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της μακροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μικροκλίμακας για τον προσδιορισμό του χωρικού επιπέδου ανάλυσης ζημιάς.

Πίνακας 2-2. Βασικά χαρακτηριστικά του χωρικού επιπέδου μακροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μικροκλίμακας

Κλίμακα	Μέγεθος εξεταζόμενης περιοχής	Επίπεδο διαχείρισης	Απαιτήσεις ακρίβειας	Απαιτούμενη ποσότητα στοιχείων εισόδου
Μακροκλίμακα	Εθνικό	Πολιτικές μετριασμού πλημμυρικών επιπτώσεων	Χαμηλή	Χαμηλή
Μεσοκλίμακα	Περιφερειακό	Μεγάλης κλίμακας στρατηγικός σχεδιασμός μετριασμού πλημμυρικών επιπτώσεων	Μέτρια	Μέτρια
Μικροκλίμακα	Τοπικό	Μεμονωμένα μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας	Υψηλή	Υψηλή

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση διαπιστώθηκε ότι ελάχιστες είναι οι αναλύσεις ζημιάς σε μακροκλίμακα [Friedland 2009]. Ακόμη, διαπιστώθηκε ένα κενό μεταξύ αναλύσεων ζημιάς σε μεσοκλίμακα και μικροκλίμακα, δηλαδή συνήθως παρατηρείται να υλοποιούνται υποδιαιρέσεις των γενικών κατηγοριών χρήσεων κτηρίου, χωρίς όμως την απαιτούμενη λεπτομέρεια της μικροκλίμακας.

Με το σκεπτικό του εναλλακτικού προσδιορισμού των παραπάνω ορισμών χωρικής κλίμακας, έτσι ώστε να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις της διατριβής, προτείνονται για την κατηγοριοποίηση της κλίμακας χωρι-

κής ανάλυσης οι προσδιορισμοί «πληγείσα περιοχή», «διαμέρισμα» και «ανά κτήριο». Η εναλλακτική αυτή κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται γενικά στο κεφάλαιο 7 και υπο συγκεκριμένη μορφή εφαρμογής στα κεφάλαια 8 και 11. Οι ορισμοί των εναλλακτικών επιπέδων χωρικής κλίμακας δίνονται ακολούθως:

- **Πληγείσα περιοχή.** Στην κλίμακα αυτή δεν επιχειρείται κάποιος διαχωρισμός των πληγέντων κτηρίων εντός της περιοχής υπό εξέταση βάσει κατασκευαστικών λεπτομερειών. Το δομημένο περιβάλλον και η επακόλουθη πλημμυρική ζημιά του εξετάζονται ως μία ενότητα. Στην ελληνική πραγματικότητα η οριοθέτηση της πληγείσας περιοχής συνήθως συμπίπτει με την κατακλυσμένη περιοχή.
- **Διαμέρισμα.** Στην κλίμακα αυτή το δομημένο περιβάλλον διακρίνεται σε γενικές κατηγορίες συνόλων κτηρίων με βάση την χρήση (κατοικία, επαγγελματική στέγη, αποθήκη) και τον τύπο κτηρίου (ισόγειο, υπόγειο, ισόγειο με υπόγειο). Χωρικά η έκταση του χωρικού επιπέδου ανάλυσης ποικίλλει σε μέγεθος συνοικίας, ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και οικοδομικού τετραγώνου.
- **Ανά κτήριο.** Η κλίμακα αυτή χαρακτηρίζεται από διαφοροποιήσεις συνόλων κτηρίων βάσει του αριθμού ορόφων, του μεγέθους επιφάνειας κτηρίου, του υλικού κατασκευής, της παλαιότητας κτηρίου και της αξίας οικοπέδου. Προϋποθέτει εμβάθυνση σε μεγάλη λεπτομέρεια της σύνθεσης του δομημένου περιβάλλοντος και διαθεσιμότητα πολλών διαφορετικών δεδομένων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η αναλυτική επιμέτρηση πραγματικής άμεσης ζημιάς σε πληγέντα στοιχεία κτηρίου βάσει καταγεγραμμένων παρατηρήσεων ανά κτήριο.

### 2.3.6 Μονάδα μέτρησης

Η συνεχής και διακριτή μέτρηση της άμεσης ζημιάς υλοποιείται χρησιμοποιώντας σχετικές ή απόλυτες τιμές. Η άμεση ζημιά σε δομημένο περιβάλλον περιγράφεται χρησιμοποιώντας πολλαπλές μονάδες μέτρησης, όπως είναι οι απόλυτες νομισματικές τιμές, το ποσοστό ζημιάς υπολογισμένο βάσει του κόστους επισκευής ή αντικατάστασης προς την ολική αξία της πληγείσας ιδιοκτησίας, το κλάσμα ζημιάς κυμαινόμενο από 0 έως 1, οι κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν κλάσεις οικονομικής απώλειας και οι μακροκλίμακες ζημιάς, όπου οι παρατηρημένες τιμές φυσικής ζημιάς καθορίζουν την κατηγοριοποίηση.

## 2.4 Δομική και μη δομική άμεση πλημμυρική ζημιά

Δομημένο περιβάλλον (building stock) ορίζεται περιοχή φυσικού τοπίου, στην οποία έχουν κατασκευαστεί κτήρια σε αραιό ή πυκνό ιστό. Σε ένα δομημένο περιβάλλον διακρίνονται ενότητες κτηρίων με ομοιογενή τοπικά χαρακτηριστικά ως προς τον τύπο κτηρίου (υλικά κατασκευής, αριθμός ορόφων, ύπαρξη ή όχι υπογείου) και ως προς την χρήση κτηρίου (κατοικία, επαγγελματική στέγη, αποθήκη, βιοτεχνία-βιομηχανία). Η κάθε ενότητα εξετάζεται στο σύνολο της. Το δομημένο περιβάλλον αναφέρεται εξίσου σε αστικές και περιαστικές περιοχές. Ως περιαστικές περιοχές θεωρούνται οι περιοχές με αποδυναμωμένο αστικό χαρακτήρα που προσδιορίζονται από μικρότερη πυκνότητα δόμησης σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές. Εξ ορισμού οι περιαστικές (ημιαστικές) περιοχές αναπτύσσονται στα όρια των αστικών περιοχών.

Συνεπώς, ο όρος δομημένο περιβάλλον δεν αναφέρεται σε χωρικό επίπεδο ανάλυσης ανά κτήριο αλλά σε σύνολα κτηρίων με ομοιογενή χαρακτηριστικά. Το μέγεθος των συνόλων αυτών μπορεί να ποικίλλει από οικοδομικό τετράγωνο, συνοικία, δημοτικό διαμέρισμα, οικισμό ή καμία φορά και σε μικρού μεγέθους πόλη. Επομένως ο όρος «δομημένο περιβάλλον» χρησιμοποιείται για να περιγράψει ανάλυση ζημιάς που προσεγγίζει επίπεδο μεσο-κλίμακας. Σε διαφορετική περίπτωση αυτό αναφέρεται ρητά. Για παράδειγμα, η ανάλυση

δομημένου περιβάλλοντος σε μικροκλίμακα προσδιορίζεται συνήθως ως ανάλυση ανά κτήριο. Επίσης, ο όρος «δομημένο περιβάλλον» αναφέρεται αποκλειστικά στο περιβάλλον (σικλετός και τοίχοι πλήρωσης) ενός κτηρίου και δεν περιλαμβάνει το περιεχόμενο κτηρίου εκτός εάν διευκρινίζεται διαφορετικά.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, αναφερόμαστε σε δύο κυρίαρχους τύπους άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που συναντά κανείς επανειλημμένα τόσο σε περιπτώσεις στο διεθνή χώρο όσο και στην ελληνική πραγματικότητα. Πρόκειται για τη δομική (structural) ζημιά και τη μη δομική (non structural) ζημιά.

### **Δομική Ζημιά**

Ως «δομική ζημιά ή βλάβη» ορίζεται η άμεση ζημιά στο φέροντα οργανισμό που επηρεάζει τη γενική ευστάθεια ενός κτηρίου, όπως είναι οι βλάβες στα υποστυλώματα ή στη θεμελίωση. Επίσης, ο όρος «δομική ζημιά» χρησιμοποιείται για να περιγράψει την άμεση ζημιά στην περίπτωση που απαιτείται μεγάλης κλίμακας επισκευή για την αποκατάστασή της, όπως συμβαίνει στην περίπτωση βλάβης σε τοιχοποιία πλήρωσης.

Συνηθισμένος μηχανισμός πρόκλησης δομικής ζημιάς αποτελεί η αστοχία ενός αντιπλημμυρικού αναχώματος, η οποία προκαλεί υψηλές ταχύτητες ροής, μεγάλα βάθη νερού και ραγδαίο ρυθμό ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να προκληθούν ισχυρές υδροδυναμικές πιέσεις στις εξωτερικές επιφάνειες ενός κτηρίου [Kelman and Spencer 2004]. Επίσης, δομική ζημιά μπορεί να προκληθεί με τη δράση υδροστατικών πιέσεων που προκύπτουν από την υψομετρική διαφορά του βάρους νερού μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού χώρου ενός πληγέντος κτηρίου. Τότε ο κυρίαρχος τύπος κατανομής υδροστατικών πιέσεων, είναι συνήθως εκείνος στον οποίο η στάθμη πλημμύρας καλύπτει ολόκληρο το άνοιγμα από την εξωτερική πλευρά ενός κτηρίου και μερικώς από την εσωτερική πλευρά του. Η διαπίστωση αυτή οφείλεται στη μικρή ταχύτητα ροής που έχουν οι πλημμύρες σε αστικό περιβάλλον, η οποία μειώνει σημαντικά ή σχεδόν μηδενίζει τις επιδράσεις των υδροδυναμικών δυνάμεων σε κτήρια και σε κάθε είδους ανοίγματα, όπως είναι τα ημιυπόγεια, οι χώροι αερισμού θεμελίωσης, οι γκαραζόπορτες, τα παράθυρα, που επιτρέπουν ψευδοστατικές πιέσεις που ασκούνται στον εσωτερικό χώρο να εξισωθούν μερικώς με εκείνες που ασκούνται στο εξωτερικό ενός κτηρίου καθώς η πλημμυρική στάθμη εκεί ανυψώνεται σταδιακά. Το φαινόμενο αυτό μειώνει σημαντικά την ενεργή υδροστατική πίεση που ασκείται τελικά στο εξωτερικό ενός πληγέντος κτηρίου. Αναλυτικά, οι μηχανισμοί πρόκλησης δομικής ζημιάς λόγω υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων περιγράφονται στο κεφάλαιο 5.

### **Μη δομική ζημιά**

Ως «μη δομική ζημιά» ορίζεται η άμεση ζημιά σε μη φέροντα στοιχεία ενός πληγέντος κτηρίου που δεν επηρεάζει τη γενική ευστάθεια του κτηρίου και απαιτεί συνήθως επισκευή μικρής κλίμακας. Τυπικές ενδείξεις αυτού του τύπου ζημιάς είναι η ζημιά σε μόνωση, δάπεδα, επιχρίσματα, κουφώματα κ.α., καθώς και στον οικιακό εξοπλισμό. Συνηθισμένος τρόπος πρόκλησης της μη δομικής ζημιάς αποτελεί η παραμονή πλημμυρικών νερών στο εσωτερικό ενός κτηρίου. Η ανάπτυξη μούχλας ποικίλλει από μικρή έως εκτεταμένη ανάλογα με το βάθος του νερού που εισχώρησε στο εσωτερικό της κατοικίας, τον τύπο επιχρίσματος και το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μετά την άντληση των νερών, και αποτελεί συνηθισμένη ένδειξη μη δομικής ζημιάς. Επιπρόσθετα, το νερό πλημμύρας που εισχωρεί στο εσωτερικό των πληγέντων κτηρίων, μπορεί να προκαλέσει χημικές και βακτηριακές μολύνσεις σε πορώδη υλικά κατασκευής. Αναλυτικά, οι μηχανισμοί πρόκλησης μη δομικής ζημιάς περιγράφονται στο κεφάλαιο 5.

### 2.4.1 Ελληνική πραγματικότητα

Στην περίπτωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η ελληνική νομοθεσία αναφέρεται σε κτήρια με φέροντα οργανισμό κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε κείμενα της ελληνικής νομοθεσίας (κοινές υπουργικές αποφάσεις και προεδρικά διατάγματα) η άμεση πλημμυρική ζημιά χαρακτηρίζεται ως βλάβη σε ένα κτήριο ανεξάρτητα του μεγέθους και της έντασης της ζημιάς [ΚΥΑ 2002, 2006]. Στην ελληνική νομοθεσία το πληγέν κτίσμα αξιολογείται από μηχανικούς της αρμόδιας υπηρεσίας είτε ως επισκευάσιμο κτίσμα προκειμένου να εκδοθεί άδεια επισκευής είτε ως κατεδαφιστέο κτίσμα προκειμένου να εκδοθεί βεβαίωση για ανακατασκευή ή αυτοστέγαση ή αποπεράτωση.

Στην περίπτωση ενός επισκευάσιμου κτίσματος, η άδεια επισκευής εκδίδεται για εργασίες αποκατάστασης των στοιχείων που έχουν πληγεί. Στην περίπτωση αυτή οι βλάβες διακρίνονται σε: (α) βλάβες που δεν επηρεάζουν τη γενική ευστάθεια του κτηρίου και απαιτούν επισκευή μικρής κλίμακας, όπως είναι οι βλάβες σε επιχρίσματα, χρωματισμούς, δάπεδα, επενδύσεις, μονώσεις, κουφώματα, σωληνώσεις, σιδηρουργικά, τζάμια και θέρμανση (πλήρης εγκατάσταση), και (β) βλάβες σε φέροντα στοιχεία που είτε επηρεάζουν τη γενική ευστάθεια του κτηρίου είτε απαιτούν μεγάλης κλίμακας επισκευή. Τέτοιες είναι οι βλάβες στο φέροντα οργανισμό του κτηρίου, στη θεμελίωση και στην τοιχοποιία πλήρωσης.

Στην περίπτωση ενός κατεδαφιστέου κτίσματος ανήκουν κτήρια που κατέρρευσαν, ή κρίνονται κατεδαφιστέα, ή με υπέρμετρη δαπάνη επισκευής (ασύμφορα), ή δομημένα από ευτελή υλικά (πλίνθους ή μη διαμορφωμένους λίθους μικρής διατομής με συνδετικό υλικό αργιλώδες) στα οποία οι ζημιές που προκλήθηκαν δεν επιδέχονται ουσιαστική αποκατάσταση σύμφωνα με την κρίση της αρμόδιας υπηρεσίας [ΚΥΑ 2002].

Αναλυτική πληροφορία σχετικά με τη διαδικασία αποτίμησης των εργασιών αποκατάστασης των στοιχείων που έχουν πληγεί από την αρμόδια υπηρεσία για τη χορήγηση κρατικής αποζημίωσης στην Αττική δίνεται στο εδάφιο 8.1.2. Στα κείμενα της ελληνικής νομοθεσίας δεν υφίσταται κατ' αρχήν γλωσσολογικός διαχωρισμός μεταξύ των όρων ζημιάς ↔ βλάβης. Επίσης, δεν χρησιμοποιούνται ρητά οι όροι «δομική» και «μη δομική» ζημιά, οι οποίοι υπονοούνται όμως και περιγράφονται περιφραστικά μέσω των χαρακτηρισμών ενός πληγέντος κτίσματος.

Στην Εικόνα 2-5 φαίνεται φωτογραφία τυπικής, μη δομικής ζημιάς σε ισόγειο πλημμυρόπληκτης κατοικίας σε αστική περιοχή της Αττικής. Ο τύπος αυτός άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον συναντάται πολύ συχνά σε αστικές περιοχές στην Ελλάδα μετά από επιφανειακές πλημμύρες λόγω ραγδαίας βροχόπτωσης και ταυτόχρονης είτε ανεπάρκειας στην αποχέτευση όμβριων υδάτων είτε υπερχείλισης χειμάρρων και ρεμάτων.



Εικόνα 2-5. Μη δομική πλημμυρική ζημιά σε ισόγειο αστικής περιοχής της Αττικής [Πηγή: λήψη φωτογραφίας Ιούλιος 2002, από Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων, ΥΠΕΧΩΔΕ]



## 2.4.2 Διεθνής χώρος

Γενικά, οι όροι «δομική» και «μη δομική» ζημιά χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία με το ίδιο περιεχόμενο που ορίστηκαν στην αρχή του υποκεφαλαίου 2.4. Ενδεικτικά αναφέρουμε το παράδειγμα των πλημμυρικών κατοικιών στην πόλη της Νέας Ορλεάνης λόγω της πλημμύρας που προκλήθηκε από τον τυφώνα Κατρίνα, όπου παρατηρήθηκε περιορισμένη δομική ζημιά και εκτεταμένη μη δομική ζημιά. Η δομική ζημιά που παρατηρήθηκε σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες στη Νέα Ορλεάνη εμφανίστηκε κυρίως σε τρεις περιπτώσεις [FEMA 2006]. Αρχικά, παρατηρήθηκε κατάντη εκτεταμένων ρηγμάτων σε αντιπλημμυρικά αναχώματα, όπου καταγράφηκαν εκτεταμένες βλάβες στις περισσότερες κατοικίες. Σημειώνουμε ότι ειδικά οι κατοικίες που βρίσκονταν αμέσως κατάντη των ρηγμάτων υπέστησαν ολική καταστροφή, δηλαδή είτε είχαν μετακινηθεί τελείως από τα θεμέλια τους και παρασύρθηκαν μερικά μέτρα είτε είχαν καταρρεύσει από τη σφοδρότητα των πλημμυρικών κυμάτων (βλέπε Εικόνα 2-6). Επίσης, δομική ζημιά παρατηρήθηκε κατάντη ρηγμάτων σε αντιπλημμυρικούς προστατευτικούς τοίχους, όπου καταγράφηκαν σοβαρές δομικές ζημιές, όπως είναι η εκτεταμένη διάβρωση κοιτόστρωσης θεμελίωσης λόγω ισχυρών υδροδυναμικών δυνάμεων. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η ζημιά δεν ήταν τόσο εκτεταμένη, αφού η ένταση των υδροδυναμικών δυνάμεων διατηρήθηκε υψηλή σε ακτίνα λίγων δεκάδων μέτρων από το ρήγμα. Τέλος, παρατηρήθηκε σοβαρή βλάβη και σε κατοικίες που βρίσκονταν θεμελιωμένες σε σαθρά εδάφη, όπου παρατηρήθηκαν «βουλιαγμένα» δάπεδα ως αποτέλεσμα μερικής καθίζησης κορεσμένων εδαφών που υποστήριζαν τα βόθρα ή τις πλάκες θεμελίωσης των κατοικιών αυτών.



Εικόνα 2-6. Πλημμυρόπληκτη κατοικία της Νέας Ορλεάνης που παρασύρθηκε μερικά μέτρα μακριά από τη θεμελίωσή της [Πηγή: λήψη φωτογραφίας Ιανουάριος 2006 από M. Kok]

Η εκτεταμένη μη δομική ζημιά παρατηρήθηκε σε περιοχές της πόλης της Νέας Ορλεάνης που παρέμειναν για μεγάλη διάρκεια κάτω από το νερό. Οι περιοχές της πόλης που βρίσκονταν εντός του περιμετρικού δικτύου των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων δεν ήταν προσβάσιμες στους κατοίκους για περίπου τρεις εβδομάδες λόγω της καθυστέρησης στην άντληση των πλημμυρικών νερών. Συνεπώς, οι κατοικίες αυτές εμφάνισαν στη συντριπτική πλειοψηφία τους εκτενή ανάπτυξη μούχλας στο εσωτερικό τους (βλέπε Εικόνα 2-7). Επιπρόσθετα, το νερό πλημμύρας που εισχώρησε στο εσωτερικό των πληγέντων κτηρίων, προκάλεσε χημικές και βακτηριακές επιδράσεις στα πορώδη υλικά κατασκευής.



Εικόνα 2-7. Δείγμα μη δομικής, πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικία στην Νέα Ορλεάνη, με εκτεταμένη ανάπτυξη μούχλας [Πηγή: FEMA – Mitigation Assessment Team Report 2006]

## Κεφάλαιο 3

# Πλημμυρική διακινδύνευση

Θεωρητικά το εύρος των διαθέσιμων επιλογών για τη διαχείριση του φυσικού κινδύνου μιας πλημμύρας είναι μεγάλο και περιλαμβάνει ποικιλία μέτρων και έργων αντιπλημμυρικής προστασίας που μπορούν να ληφθούν από τοπικό ή /και κεντρικό διοικητικό επίπεδο. Τα μέτρα (έργα) διακρίνονται σε κατασκευαστικά, όπως είναι τα φράγματα, οι ταμιευτήρες, τα αναχώματα κ.α., και σε μη κατασκευαστικά, όπως είναι ο χωροταξικός σχεδιασμός χρήσεων γης, τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, τα σχέδια εκκένωσης, η ασφάλιση έναντι πλημμύρας κ.α. Η καθιερωμένη προσέγγιση της κατασκευής αποσπασματικών τεχνικών έργων αντιπλημμυρικής προστασίας στα κατάντη μιας λεκάνης απορροής έχει αποδειχθεί ανεπαρκής σε βάθος χρόνου, πολύ ακριβή και περιβαλλοντικά επιβαρύνουσα. Επομένως, επιβάλλεται επιτακτικά ο επανασχεδιασμός της αντιπλημμυρικής προστασίας όχι μόνο τοπικά αλλά σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής. Γι' αυτό σήμερα κερδίζει συνεχώς έδαφος η νοοτροπία διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου και της πλημμυρικής διακινδύνευσης, η οποία οδηγεί στην ιεράρχηση των αντιπλημμυρικών μέτρων ανάλογα με την αποδοτικότητά τους.

Γίνεται φανερό ότι έννοιες, όπως είναι ο πλημμυρικός κίνδυνος, η πλημμυρική διακινδύνευση και η τρωτότητα έναντι πλημμύρας, χρησιμοποιούνται πλέον συχνά προκειμένου να περιγράψουν και να προσδιορίσουν την απειλή ενός συστήματος από πλημμύρα. Επιπλέον, οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της επάρκειας των κατασκευαστικών και μη κατασκευαστικών μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας. Παρόλ' αυτά δεν έχει ακόμη καθιερωθεί στο διεθνές στερέωμα η σχετική τεχνική ορολογία, με αποτέλεσμα η σύγχυση στη χρήση των όρων αυτών να παραμένει. Επιπρόσθετα, η σχέση μεταξύ πλημμυρικής ζημιάς, τρωτότητας και αντίληψης περί διακινδύνευσης, είναι περιορισμένα αναγνωρισμένη και η σημασία της πλημμυρικής ζημιάς στη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, δεν έχει ακόμη ευρέως αναδειχθεί. Στόχος λοιπόν αυτού του κεφαλαίου είναι να «τοποθετήσει» την πλημμυρική ζημιά στο πλαίσιο της πλημμυρικής διακινδύνευσης και, στη συνέχεια, να αναδείξει τον καθοριστικό ρόλο που παίζει η πλημμυρική ζημιά στην ανάλυση της διακινδύνευσης.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε τέσσερα υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 3.1 εισάγονται οι βασικές έννοιες του κινδύνου, της τρωτότητας και της πλημμυρικής διακινδύνευσης και διευκρινίζεται η σχέση μεταξύ τους και η

σχέση τους με την πλημμυρική ζημιά. Στο υποκεφάλαιο 3.2 αναφέρονται όροι σχετικοί με την πλημμυρική διακινδύνευση που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία της ανάλυσής της. Στο υποκεφάλαιο 3.3 αναφέρεται η μεθοδολογία ανάλυσης της διακινδύνευσης σε στάδια και στη συνέχεια επισημαίνονται οι βασικές αδυναμίες στην εφαρμογή της. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 3.4 γίνεται ειδική αναφορά στο περιεχόμενο της σχετικής κατευθυντήριας Οδηγίας της Ε.Ε., στις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής της και στους πιθανούς τρόπους εφαρμογής της Οδηγίας για τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην Ελλάδα.

## 3.1 Κίνδυνος, διακινδύνευση, τρωτότητα λόγω πλημμύρας

### 3.1.1 Ορισμοί

#### Κίνδυνος (Hazard)

Ως κίνδυνος (hazard) μπορεί να οριστεί μια απειλή ή κατάσταση με τη δυναμική να προκαλέσει απώλεια ανθρώπινης ζωής ή μια οποιαδήποτε αστοχία σε φυσικό ή ανθρωπογενές σύστημα. Η πηγή πρόκλησης ενός κινδύνου μπορεί να είναι είτε εξωγενής (π.χ. σεισμός, πλημμύρα) είτε ενδογενής (π.χ. ελαττωματικό στοιχείο συστήματος όπως ένα ρήγμα σε ανάχωμα) με τη δυναμική της εκκίνησης ενός μηχανισμού αστοχίας. Ο κίνδυνος διακρίνεται σε φυσικό κίνδυνο (natural hazard) όταν προέρχεται από ένα φυσικό φαινόμενο (π.χ. οι ραγδαίες βροχοπτώσεις) και σε ανθρωπογενή κίνδυνο (man-made hazard) όταν οφείλεται σε ανθρωπογενή αίτια (π.χ. αποδάσωση, τρομοκρατική ενέργεια) [Pistrika and Tsakiris 2007]. Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τον φυσικό κίνδυνο της πλημμύρας που νοείται ως η πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου μιας πλημμύρας ορισμένης ή μεγαλύτερης έντασης που αναμένεται ότι θα συμβεί σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο και σε χωρικά ορισμένη περιοχή.

#### Διακινδύνευση (Risk)

Οι ορισμοί της διακινδύνευσης στην εφαρμοσμένη έρευνα των φυσικών κινδύνων συγκλίνουν σε έναν ορισμό που περιλαμβάνει την έννοια του φυσικού κινδύνου και την έννοια της τρωτότητας του υπό απειλή συστήματος [ISDR 2004]. Γενικά η διακινδύνευση  $R$ , ενός συστήματος εκφράζεται ως συνάρτηση του φυσικού κινδύνου  $H$ , και της τρωτότητας συστήματος  $V$ , από την εξίσωση:

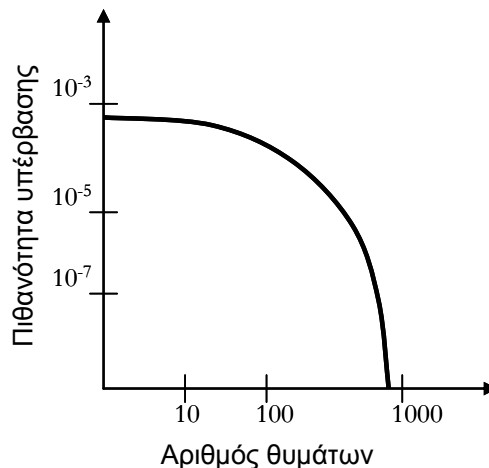
$$R = f(H, V) \quad (3.1)$$

Ως φυσικός κίνδυνος νοείται η πιθανότητα εκδήλωσης ενός ανεπιθύμητου φυσικού φαινομένου και η τρωτότητα ενός συστήματος σχετίζεται με τη δυνητική ζημιά που μπορεί να προκληθεί στο υπό απειλή σύστημα υπό συνθήκες εκδήλωσης ενός φυσικού κινδύνου. Ο επικρατέστερος ορισμός της διακινδύνευσης είναι το γινόμενο της ανεξάρτητης πιθανότητας εκδήλωσης ενός γεγονότος με το μέγεθος της επακόλουθης ζημιάς. Ωστόσο, η στενή αυτή προσέγγιση του ορισμού διακινδύνευσης εξαιρεί τη δυνατότητα να μοντελοποιηθεί η διακινδύνευση ως μία κατανομή συνεπειών. Γι' αυτό το λόγο, ο ορισμός διακινδύνευσης που υιοθετείται στην παρούσα διατριβή είναι ο ακόλουθος:

**Διακινδύνευση είναι μια συνάρτηση των πιθανότητων και των ζημιών που προκύπτουν από ένα σύνολο ανεπιθύμητων γεγονότων ενός ορισμένου φυσικού κινδύνου.**

Είναι δυνατόν οι πιθανότητες και οι επακόλουθες ζημιές γεγονότων να ποσοτικοποιηθούν και να συνδυαστούν για την ανάπτυξη ενός δείκτη διακινδύνευσης ή ενός γραφήματος καμπύλης διακινδύνευσης, το οποίο είναι γνωστό ως μέτρο διακινδύνευσης και αποτελεί τη βάση για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης

τέτοιων γεγονότων. Ένα γράφημα καμπύλης διακινδύνευσης απεικονίζει την πιθανότητα υπέρβασης ενός ορισμένου επιπέδου ζημιών και ένα ενδεικτικό παράδειγμα της καμπύλης αυτής αποτελεί η καμπύλη FN (βλέπε Εικόνα 3-1). Η καμπύλη FN απεικονίζει την πιθανότητα υπέρβασης ενός αριθμού  $N$  θυμάτων και συνήθως αναπτύσσεται σε διπλό λογαριθμικό χαρτί. Η ανάπτυξη της ξεκίνησε από τη βιομηχανία πυρηνικών αποβλήτων [Kendall et al. 1977] και σήμερα εφαρμόζεται επίσης ευρύτατα στο πεδίο ανάλυσης αστοχίας φραγμάτων από την Εθνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων της Αυστραλίας [Australian National Commission on Large Dams, ANCOLD 2000].



Εικόνα 3-1. Παράδειγμα καμπύλης διακινδύνευσης: καμπύλη FN

### Πλημμυρική διακινδύνευση (flood risk)

Ως πλημμυρική διακινδύνευση μπορεί να οριστεί το μέτρο των αναμενόμενων ζημιών (κοινωνικών και οικονομικών) σε ένα χωροχρονικά ορισμένο σύστημα λόγω της πιθανότητας εκδήλωσης μιας πλημμύρας ορισμένης έντασης. Επομένως, οι μονάδες μέτρησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης μπορεί να είναι νομισματικοί όροι, ή απώλειες ανθρώπινης ζωής όταν οι ζημιές είναι μετρήσιμες, ή ποιοτικοί όροι (π.χ. κλάσεις) όταν οι ζημιές δεν είναι μετρήσιμες. Πριν προχωρήσουμε στον ορισμό της τρωτότητας ενός συστήματος λόγω πλημμύρας, κρίνεται κρίσιμο να επισημανθεί η σημασία του προσδιορισμού των συνιστωσών του χώρου και του χρόνου σε ένα σύστημα υπό εξέταση.

Ο καθορισμός χωρικών ορίων στο εκάστοτε υπό εξέταση σύστημα, είναι απαραίτητος για να προσδιοριστούν η ποσότητα και η συγκέντρωση των στοιχείων υπό απειλή (elements at risk), δηλαδή όλες οι κοινωνικές, οικονομικές ή οικολογικές μονάδες του συστήματος που μπορεί να επηρεαστούν από την επίδραση ενός φυσικού κινδύνου στην χωρικά οριοθετημένη περιοχή. Στοιχεία υπό απειλή μπορεί να είναι άνθρωποι, κατοικίες, ιδιωτικά και δημόσια κτήρια, έργα υποδομής, οικονομική παραγωγή, πολιτιστική κληρονομιά και οικολογικά είδη και τοπία που είτε βρίσκονται εντός της χωρικά οριοθετημένης περιοχής είτε συνδέονται με αυτήν. Στην παρούσα διατριβή στοιχείο υπό απειλή αποτελεί το δομημένο περιβάλλον που βρίσκεται εντός των ορίων της εκάστοτε χωρικά οριοθετημένης περιοχής υπό απειλή πλημμύρας.

Ο καθορισμός χρονικών ορίων σε ένα υπό εξέταση σύστημα αφορά στον προσδιορισμό της χρονικής περιόδου για την οποία υλοποιείται η ανάλυση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η πιθανότητα εκδήλωσης ενός φυσικού φαινομένου αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς και συνεπώς καλύπτει μια ορισμένη περίοδο. Σημειώνεται τέλος, ότι ο καθορισμός της τρωτότητας ενός συστήματος έναντι ενός

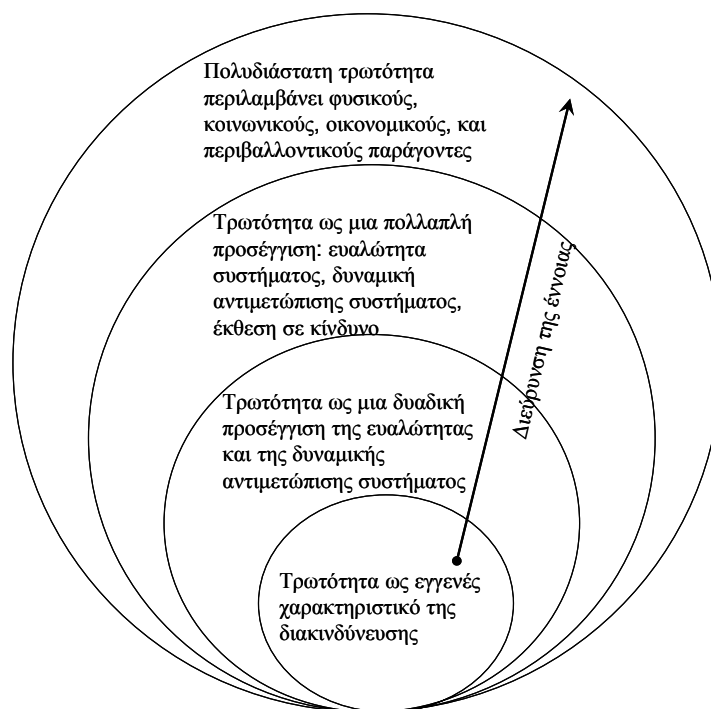
φυσικού κινδύνου ισχύει για μια ορισμένη χρονική περίοδο, καθώς η τρωτότητα αποτελεί μία έννοια που μεταβάλλεται με τον χρόνο.

### **Τρωτότητα (Vulnerability)**

Ένας από τους πιο αποδεκτούς ορισμούς τρωτότητας προτάθηκε από τον οργανισμό «Διεθνής Στρατηγική για τη Μείωση των Καταστροφών» [ISDR 2004] και σύμφωνα με αυτόν η τρωτότητα ορίζεται ως «ένα σύνολο συνθηκών και διαδικασιών που προέρχονται από φυσικούς, κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι αυξάνουν την ευαλότητα (susceptibility) μιας κοινότητας στην επίδραση των φυσικών κινδύνων». Γενικά, η έννοια της τρωτότητας χρησιμοποιείται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους στη διεθνή βιβλιογραφία και μπορούμε να διακρίνουμε τρεις σχολές διαφορετικής αντίληψης για την τρωτότητα. Η πρώτη σχολή εστιάζει στην έκθεση του συστήματος σε φυσικούς κινδύνους [Alexander 2000]. Η δεύτερη σχετίζει την τρωτότητα με τη δυναμική μιας κοινότητας στην αντιμετώπιση φυσικών κινδύνων (coping capacity), δηλαδή με την κοινωνική της ανθεκτικότητα (resilience) και αντίσταση (resistance) [Bohle 2001]. Όσο μειώνεται η δυναμική αντιμετώπισης ενός συστήματος στην αντιμετώπιση φυσικών κινδύνων τόσο αυξάνει η ευαλότητά του συστήματος. Επομένως, η δυναμική αντιμετώπισης και η ευαλότητα ενός συστήματος αποτελούν έννοιες αλληλοεξαρτώμενες.

Η τρίτη σχολή συνδυάζει τις δύο παραπάνω προσεγγίσεις και φαίνεται να είναι η επικρατέστερη αντίληψη περί τρωτότητας που κερδίζει συνεχώς έδαφος στην επιστημονική κοινότητα. Η βασική συναίνεση που έχει γενικά επιτευχθεί, αφορά στη διπλή υπόσταση της έννοιας της τρωτότητας, η οποία αποτελείται από την «εξωτερική» πλευρά (έκθεση σε φυσικό κίνδυνο) και από την «εσωτερική» πλευρά (ευαλότητα / δυναμική αντιμετώπισης του συστήματος) [Bohle 2001]. Επίσης, η τρωτότητα σύμφωνα με τον Pelling (2003), φέρει τρία βασικά χαρακτηριστικά: (α) είναι μία πολυδιάστατη έννοια και διαφοροποιείται στο φυσικό χώρο και μεταξύ των κοινωνικών ομάδων, (β) εξαρτάται από την κλίμακα ανάλυσης (π.χ. ατομικά, ανά νοικοκυριό, περιοχή, σύστημα) και (γ) είναι δυναμικά μεταβλητή, δηλαδή τα χαρακτηριστικά της μεταβάλλονται με τον χρόνο και προφανώς η αλλαγή αυτή υπερβαίνει την περίοδο εκδήλωσης του φυσικού γεγονότος.

Η μέτρηση της τρωτότητας ενός συστήματος προϋποθέτει τον ακριβή ορισμό της έννοιας ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης. Σύμφωνα με τον Brinkmann (2006), η έννοια της τρωτότητας μπορεί να περιοριστεί σε ένα πολύ συγκεκριμένο πλαίσιο περιγράφοντας ένα μόνο εγγενές χαρακτηριστικό του συστήματος ή να διευρυνθεί στο πολύ πιο ανοιχτό πλαίσιο της πολυδιάστατης τρωτότητας, η οποία πέρα από τον φυσικό κίνδυνο εξαρτάται και από την κοινωνική, περιβαλλοντική και διοικητική δομή του συστήματος. Η Εικόνα 3-2 δείχνει τα στάδια διεύρυνσης της έννοιας της τρωτότητας κατά Brinkmann (2006).



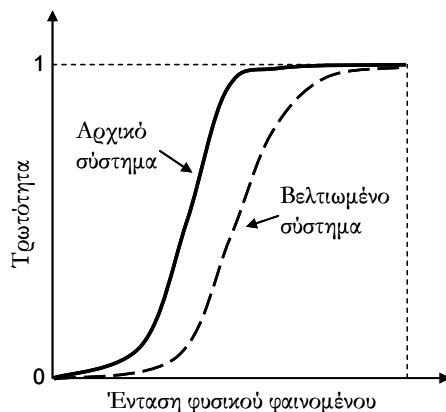
Εικόνα 3-2. Σφαίρες ορισμού της έννοιας της τρωτότητας κατά Birkmann (2006)

Ανάλογα με το βαθμό διεύρυνσης της έννοιας της τρωτότητας η ποσοτικοποίησή της μπορεί να επιτευχθεί είτε με ανάπτυξη ποιοτικών κλάσεων τρωτότητας είτε με χρήση απλών δεικτών (indicators) είτε αθροίσματος ζυγισμένων δεικτών για την παραγωγή σύνθετων δεικτών (composite indices). Ένα παράδειγμα ανάπτυξης κλάσεων τρωτότητας αποτελεί η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα (EMS-98) [Grünthal 1998], η οποία διακρίνει έξι κλάσεις φυσικής τρωτότητας κτηρίου έναντι σεισμού βάσει διαφορετικών υλικών κατασκευής (ξύλο, μέταλλο, οπλισμένο σκυρόδεμα και πέτρα) και διαφορετικών τύπων κατασκευής (μονός τοίχος, μπατικός τοίχος, οπλισμένη ή μη τοιχοποιία κ.α.). Η έννοια της τρωτότητας στην περίπτωση αυτή, περιλαμβάνει μόνο την έκθεση ενός στοιχείου σε έναν φυσικό κίνδυνο και συγκεκριμένα αντιπροσωπεύει το μέτρο της αντίστασης ενός κτηρίου στην επίδραση της σεισμικής έντασης. Συνεπώς η τρωτότητα σχετίζεται με τις διαφορές σε βλάβες κτηρίου υπό συνθήκες σεισμικής έντασης. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και στην περίπτωση ανάπτυξης κλάσεων φυσικής τρωτότητας κατοικιών έναντι πλημμύρας από τους Schwarz and Maiwald (2008) (βλέπε εδάφιο 4.4.1).

Όσο η έννοια της τρωτότητας διευρύνεται, τόσο αυτή λαμβάνει υπόψη της και δείκτες κοινωνικού περιεχομένου του συστήματος με αποτέλεσμα η ποσοτικοποίησή της να γίνεται πιο πολύπλοκη και συνήθως να υλοποιείται με τη σύνθεση δεικτών (indices). Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μιας ένδειξης, διαφοροποιούνται ανάλογα με το σκοπό και την κλίμακα της ανάλυσης. Για παράδειγμα ο οργανισμός UNDP-BCPR (United Nations Development Programme-Bureau of Crisis Prevention and Recovery) ανέπτυξε έναν δείκτη τρωτότητας που εκφράζει τη μέτρηση της ανθρώπινης έκθεσης σε φυσικούς κινδύνους σε επίπεδο κρατών. Ο δείκτης για κάθε κράτος υπολογίζεται διαιρώντας το μέσο αριθμό θυμάτων κάθε χρόνο εξαιτίας ενός φυσικού κινδύνου προς τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται εκτεθειμένοι στον κίνδυνο αυτό. Με τη χρήση αυτού του δείκτη επιτυγχάνεται σύγκριση τρωτότητας (έναντι ορισμένου φυσικού κινδύνου) μεταξύ κρατών, αλλά και σύγκριση τρωτότητας ενός κράτους έναντι πολλαπλών φυσικών κινδύνων. Ακόμη αρκετά διαδεδομένη σε επίπεδο κρατών, είναι η ανάπτυξη σύνθετων δεικτών τρωτότητας οι οποίες απαρτίζονται από το άθροισμα ζυγισμένων οικονομικών και κοινωνικών δεικτών, όπως είναι το

ακαθάριστο εθνικό προϊόν, η πληθυσμιακή σύνθεση κ.α.

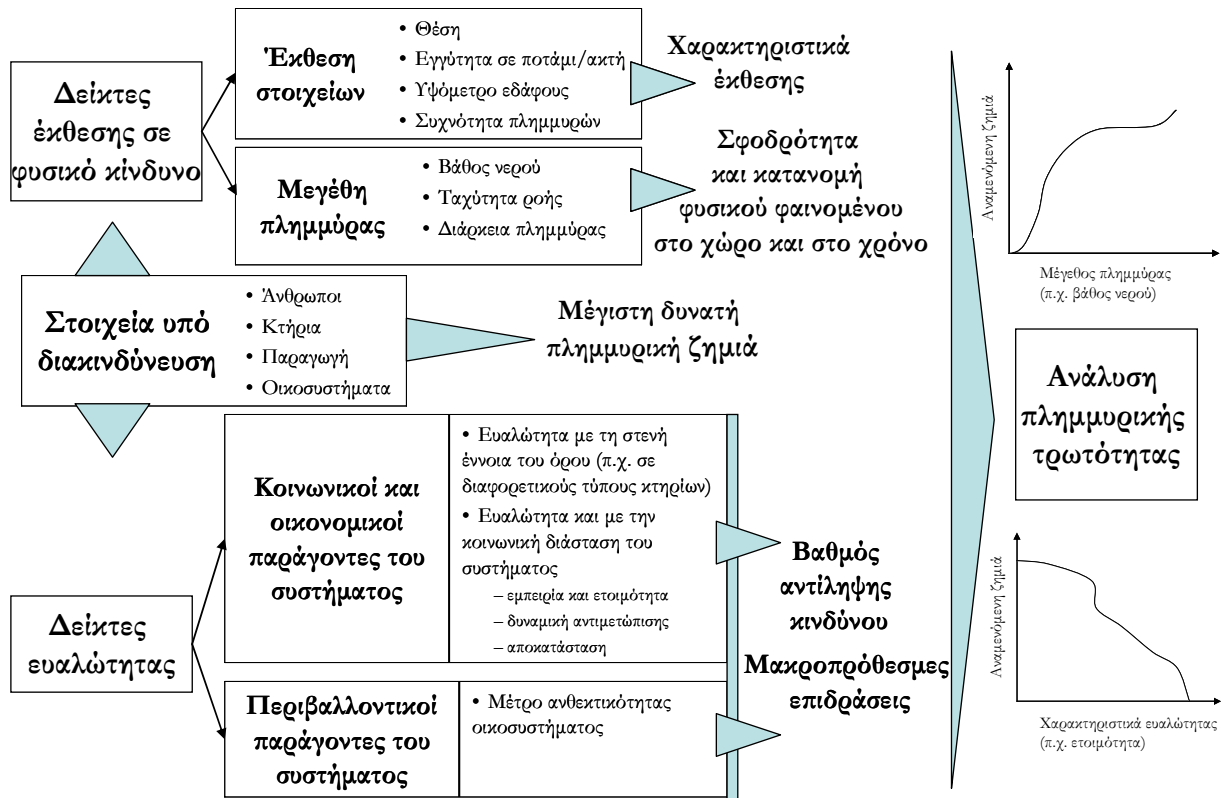
Με τη χρήση δεικτών μπορεί να προκύψει συνάρτηση της τρωτότητας με την ένταση ενός φυσικού φαινομένου, η οποία με κανονικοποίηση των δεικτών δίνει αποτελέσματα μεταξύ 0 και 1, όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί σε μηδενικές απώλειες του συστήματος από την επίδραση του φυσικού κινδύνου και η τιμή 1 αντιστοιχεί σε ολικές απώλειες στο σύστημα. Η Εικόνα 3-3 απεικονίζει μια απλοποιητική προσέγγιση της συνάρτησης τρωτότητας έναντι της έντασης ενός φυσικού κινδύνου. Στην Εικόνα 3-3 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η βελτίωση στη δυναμική αντιμετώπισης του συστήματος σχηματικά αντιπροσωπεύεται από μια μετατόπιση της καμπύλης τρωτότητας προς τα δεξιά [Tsakiris 2006].



Εικόνα 3-3. Συνάρτηση τρωτότητας έναντι έντασης φυσικού φαινομένου για αρχική και αυξημένη δυναμική αντιμετώπισης (ή αντίστοιχα μειωμένη ευαλότητα) συστήματος [Tsakiris 2006]

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, ένα στοιχείο υπό την απειλή να πάθει ζημιά είναι τόσο πιο τρωτό, όσο πιο εκτεθειμένο βρίσκεται σε έναν φυσικό κίνδυνο και όσο πιο ευάλωτο είναι στην επίδραση του κινδύνου. Συνεπώς, κάθε ανάλυση τρωτότητας έναντι πλημμύρας απαιτεί πληροφορία για την ανάπτυξη των κατάλληλων δεικτών έκθεσης σε κίνδυνο και ευαλότητας του συστήματος. Το σχήμα της Εικόνας 3-4 δίνει χαρακτηριστικά παραδείγματα δεικτών έκθεσης και ευαλότητας που απαιτούνται για την ανάλυση της πλημμυρικής τρωτότητας και περιγράφει τη ροή της πληροφορίας στην ανάλυση αυτή. Καθοριστικό σημείο της ανάλυσης αποτελεί ο προσδιορισμός των στοιχείων υπό απειλή πλημμύρας με τελικό στόχο την εκτίμηση της μέγιστης δυνατής πλημμυρικής ζημιάς (δυνητική ζημιά). Και επειδή κάθε στοιχείο υπό απειλή είναι λίγο έως πολύ εκτεθειμένο σε πλημμυρικά γεγονότα και λίγο έως πολύ ευάλωτο σε αυτά, οι δείκτες έκθεσης και ευαλότητας αναμένεται να συνδέονται πάντα με τα στοιχεία υπό απειλή και να συνεισφέρουν σημαντικά στην ανάλυση της πλημμυρικής τρωτότητας. Τα τυπικά αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρατίθενται στο δεξί μέρος του σχήματος της Εικόνας 3-4 και είναι η ανάπτυξη καμπυλών που συνδέουν την αναμενόμενη πλημμυρική ζημιά σε στοιχείο υπό απειλή με δείκτες της έκθεσης και ευαλότητας του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο η τρωτότητα του συστήματος προσδιορίζεται ρητά.





Εικόνα 3-4. Χαρακτηριστικοί δείκτες έκθεσης και ευαλότητας του συστήματος που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της πλημμυρικής τρωτότητας [βασίστηκε σε Messner and Meyer 2006]

Με αφορμή το παραπάνω σχήμα δύο βασικές παρατηρήσεις που αφορούν τις σχέσεις μεταξύ τρωτότητας και πλημμυρικής ζημιάς και μεταξύ τρωτότητας και αντίληψης πλημμυρικής διακινδύνευσης, περιγράφονται στα ακόλουθα εδάφια.

### 3.1.2 Σχέση μεταξύ τρωτότητας και πλημμυρικής ζημιάς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάλυση πλημμυρικής ζημιάς στοχεύει στην ποσοτικοποίηση της ζημιάς που προκύπτει σε ένα ετεροχρονικά ορισμένο σύστημα υπό σενάρια πλημμύρας, έτσι ώστε να αποτιμηθούν τα οφέλη από τη λήψη μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας εις των πρότερων. Με αυτό το σκεπτικό η μέγιστη δυνατή πλημμυρική ζημιά ή η δυνητική ζημιά αποτελεί καθοριστικής σημασίας μέγεθος. Όταν σε τέτοιου είδους αναλύσεις λαμβάνεται υπόψη η τρωτότητα του υπό εξέταση συστήματος σε πλημμύρα, τότε μπορεί να εκτιμηθεί το ποσοστό της δυνητικής ζημιάς που τελικά θα υποστεί το σύστημα. Συνήθως, αναγνωρίζεται ένας μόνο παράγοντας ως ο πιο σημαντικός δείκτης τρωτότητας του συστήματος, ο οποίος θεωρείται ότι έχει καθοριστική επίδραση στο βαθμό ζημιάς που μπορεί να προκληθεί από ένα πλημμυρικό γεγονός. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επιλογή του παράγοντα αυτού προκύπτει από τη γνώση εξειδικευμένων επιστημόνων και βάσει εμπειρικών στοιχείων πλημμυρικής ζημιάς. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να εκφραστεί σε κλίμακα μέτρησης από 0 (μηδενική απώλεια) έως 1 (ολική απώλεια) και αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση της μείωσης της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς για διάφορες κατηγορίες στοιχείων υπό απειλή. Όπως τονίζεται στο επόμενο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ανάλυσης της πλημμυρικής ζημιάς, ο παράγοντας που επιλέγεται ως ο πιο αντιπροσωπευτικός δείκτης τρωτότητας του στοιχείου υπό απειλή (κτήριο) είναι η χρήση κτηρίου.

### 3.1.3 Σχέση μεταξύ τρωτότητας και αντίληψης της πλημμυρικής διακινδύνευσης

Σε ό,τι αφορά τους δείκτες κοινωνικού περιεχομένου της τρωτότητας, η έννοια της αντίληψης της διακινδύνευσης είναι κρίσιμη. Όπως φαίνεται και στο σχήμα της Εικόνας 3-4, οι δείκτες κοινωνικού περιεχομένου της τρωτότητας περιλαμβάνουν την ετοιμότητα και την πείρα του υπό απειλή συστήματος. Εάν η μέση αντίληψη της πλημμυρικής διακινδύνευσης είναι χαμηλή σε μια περιοχή (ίσως επειδή τα πλημμυρικά γεγονότα που έπληξαν την περιοχή στο πρόσφατο παρελθόν ήταν σπάνια ή ίσως επειδή τα αντιπλημμυρικά αναχώματα της περιοχής είναι υψηλά), τότε πολλοί κάτοικοι ή γενικά κοινωνικοί εταίροι της περιοχής μπορεί να θεωρήσουν ότι είναι ασφαλείς έναντι του φυσικού κινδύνου μιας πλημμύρας. Άμεση συνέπεια αυτής της νοοτροπίας είναι να μη λαμβάνονται μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας και οι κάτοικοι να μην είναι προετοιμασμένοι για το ενδεχόμενο μιας πλημμύρας. Ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχει σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμυρικό κίνδυνο, πιθανότατα οι κάτοικοι είτε να μην πιστεύουν την άφιξη πλημμυρικού κύματος είτε να μην γνωρίζουν πως πρέπει να πράξουν για να αντιμετωπίσουν την επικείμενη πλημμύρα. Συνεπώς, η χαμηλή αντίληψη της πλημμυρικής διακινδύνευσης μπορεί να οδηγήσει σε μικρό βαθμό ετοιμότητας έναντι πλημμυρικού κινδύνου (δηλαδή μεγάλη ευαλότητα συστήματος) και κατά συνέπεια σε αυξημένη πλημμυρική τρωτότητα του υπό εξέταση συστήματος.

Αντίθετα, εάν οι εν δυνάμει πληττόμενοι κάτοικοι έχουν πλήρη αντίληψη της πλημμυρικής διακινδύνευσης της περιοχής όπου κατοικούν (ίσως επειδή επανειλημμένα έχουν πληγεί από πλημμύρες), τότε τείνουν να είναι καλύτερα ενημερωμένοι και πιο καλά προετοιμασμένοι για το ενδεχόμενο μιας πλημμύρας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επιβεβαίωσης της σχέσης τρωτότητας και αντίληψης διακινδύνευσης αποτελούν οι πρόσφατες πλημμύρες στη Γερμανία το 2002 και το 2005 εξαιτίας της υπερχειλίσις του ποταμού Έλβα. Η πλημμύρα στην πόλη της Δρέσδης το 2002, προκάλεσε πολύ μεγαλύτερη πλημμυρική ζημιά στις κατοικίες τόσο σε ένταση όσο και σε έκταση σε σύγκριση με το 2005, κυρίως λόγω του χαμηλού επιπέδου πλημμυρικής ετοιμότητας των κατοίκων το 2002 σε σύγκριση με το 2005 [Thieken et al. 2005].

## 3.2 Αποσαφήνιση όρων σχετικών με την πλημμυρική διακινδύνευση

### Αντίληψη περί διακινδύνευσης (risk perception) και αποστροφή προς διακινδύνευση (risk aversion)

Η έννοια της αντίληψης περί διακινδύνευσης μπορεί να χαρακτηριστεί «ως υποκειμενική, προσωπική αντιπροσώπευση μιας αποδεκτής πραγματικότητας ή ερεθίσματος» [Pidgeon 1992]. Οι διαστάσεις που υποκινούν την αντίληψη περί διακινδύνευσης μπορεί να σχετίζονται, είτε με τις συνέπειες των γεγονότων (π.χ. φυσική και κοινωνική έκταση της ζημιάς), είτε με την πιθανότητα εκδήλωσης του γεγονότος, είτε με την ίδια τη φύση της διακινδυνευμένης δραστηριότητας και όχι τόσο με την ίδια την διακινδύνευση (π.χ. την πείρα σε παρόμοια γεγονότα, την ελευθερία επιλογής της έκθεσης στον κίνδυνο, τη σαφήνεια στην σπουδαιότητα των αναμενόμενων συνεπειών κ.α.). Σύμφωνα με τον Slovic (1987), η συμπεριφορά προς τη διακινδύνευση εξαρτάται από τον φόβο της διακινδύνευσης (συμπεριλαμβάνοντας παράγοντες, όπως η συνειδητή έλλειψη ελέγχου, ο φόβος, η άνιση κατανομή διακινδύνευσης και οφελών) και από την άγνωστη διακινδύνευση (χαρακτηρίζεται από μη παρατηρημένους, νέους κινδύνους).

Η αποστροφή προς την έννοια της διακινδύνευσης σχετίζεται επίσης, με την αντίληψη περί διακινδύνευσης. Η αποστροφή συναντάται για παράδειγμα σε ατύχημα με μεγάλο αριθμό θυμάτων, διότι αυτά προκαλούν μεγάλη κοινωνική αναταραχή. Γενικά, η αποστροφή αφορά σε μία συμπεριφορά που εξαρτάται από την αντίληψη περί διακινδύνευσης. Ένα ατύχημα με 100 θύματα γίνεται λιγότερο αποδεκτό από την κοινωνία σε

σύγκριση με 100 ατυχήματα με ένα θύμα. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, σε ορισμένες χώρες τα ποσοτικά όρια της αποδεκτής διακινδύνευσης αντανακλούν την αποστροφή της κοινωνίας προς τη διακινδύνευση, όπως για παράδειγμα όταν παίρνουν μέτρα αποτροπής ατυχημάτων με πολλά θύματα, αν και αυτά έχουν πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Γενικά, η αποστροφή προς τη διακινδύνευση παρατηρείται σε γεγονότα με συνέπειες μεγάλου μεγέθους, π.χ. με μεγάλη οικονομική ζημιά.

Συνδυάζοντας διαθέσιμη πληροφορία από τις δημοσιεύσεις του UNU-EHS και της ANCOLD πρόεκυψαν οι ακόλουθοι ορισμοί της αποδεκτής και ανεκτής διακινδύνευσης.

### **Αποδεκτή διακινδύνευση**

Ως «αποδεκτή» διακινδύνευση ορίζεται εκείνο το επίπεδο απώλειας που η τοπική κοινωνία θεωρεί αποδεκτό βάσει των οικονομικών, κοινωνικών, πολιτικών και περιβαλλοντικών δεδομένων, με την προϋπόθεση ότι δε θα συμβεί καμία αλλαγή στα μέτρα ελέγχου διακινδύνευσης. Η αποδεκτή διακινδύνευση θεωρείται ασήμαντη και ικανοποιητικά ελεγχόμενη. Δράση για περαιτέρω μείωση διακινδύνευσης δεν απαιτείται, εκτός και εάν πρακτικά μέτρα είναι διαθέσιμα με μικρός κόστος σε χρήμα, χρόνο και προσπάθεια [ANCOLD 2003]. Από καθαρά οικονομική άποψη η διακινδύνευση είναι αποδεκτή, όταν το κόστος περαιτέρω μείωσης της διακινδύνευσης, υπερβαίνει το κόστος της ζημιάς που θα αποφευχθεί. Καθοριστική σημασία για τον προσδιορισμό της διακινδύνευσης ως αποδεκτής, έχει ο κοινωνικός εταίρος που την προσδιορίζει. Επίσης ο προσδιορισμός προϋποθέτει μία συνειδητή απόφαση που βασίζεται σε όλη τη διαθέσιμη πληροφορία.

Η έννοια της αποδεκτής διακινδύνευσης χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει κατασκευαστικά και μη κατασκευαστικά μέτρα που λήφθηκαν για να μειώσουν τη δυνητική ζημιά σε ένα επίπεδο, το οποίο συμφωνεί με αποδεκτές πρακτικές από την τοπική κοινωνία και βασίζεται σε γνωστή πιθανότητα υπέρβασης φυσικού κινδύνου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται από τον Smith (1996), σύμφωνα με τον οποίο «οι πλημμύρες του 1993 στη λειάνη απορροής του άνω ρου του Μισισιπή είχαν εκτιμημένη περίοδο επαναφοράς ίση με 200 έτη, ωστόσο ορισμένοι από τους πληγέντες κατοίκους της κατακλυσμένης περιοχής θεώρησαν ότι αυτό το πλημμυρικό γεγονός έπρεπε να θεωρηθεί ως μη αποδεκτή διακινδύνευση. Τέτοιες αντιρρήσεις προφανώς αγνοούσαν τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη που προέρχονται από τη θέση των κοινοτήτων στην κατακλυσμένη περιοχή και επιπλέον το δυσβάσταχτο κόστος που θα έπρεπε να υποστεί ο φορολογούμενος για να προστατευτεί η περιοχή από πλημμύρα αντίστοιχου μεγέθους με αυτή του 1993».

### **Ανεκτή διακινδύνευση**

Ως «ανεκτή» διακινδύνευση θεωρείται εκείνο το επίπεδο διακινδύνευσης με το οποίο η κοινωνία υπό απειλή μπορεί να συμφιλιωθεί ώστε να εξασφαλίσει συγκεκριμένα όρια ασφαλείας έναντι φυσικού κινδύνου. Αυτό το επίπεδο διακινδύνευσης δεν μπορεί να αγνοηθεί και να θεωρηθεί ασήμαντο. Αντιπροσωπεύει μια τιμή διακινδύνευσης, η οποία τελεί υπό επιτήρηση και θα πρέπει να μειωθεί εάν αυτό καταστεί δυνατόν [ANCOLD 2003].

### **Μικρή τιμή διακινδύνευσης όσο πρακτικά επιτρεπτό (ALARP- As Low As Reasonably Practicable)**

Αυτός ο προσδιορισμός αντιπροσωπεύει ένα εύρος τιμών πιο μικρών από την τιμή της ανεκτής διακινδύνευσης και αυτό συμβαίνει επειδή η περαιτέρω μείωση της διακινδύνευσης είναι μη πρακτική ή ασύμφορη, δηλαδή το κόστος είναι δυσανάλογα μεγάλο με τη βελτίωση που θα κερδηθεί. Η αρχή αυτή αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Αγγλία το 1995 από τον Οργανισμό Υγείας και Ασφαλείας (Health and Safety Executive) για την εκτίμηση της διακινδύνευσης έναντι βιομηχανικών κινδύνων.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, οι τιμές της διακινδύνευσης εμφανίζουν τα ακόλουθα όρια:

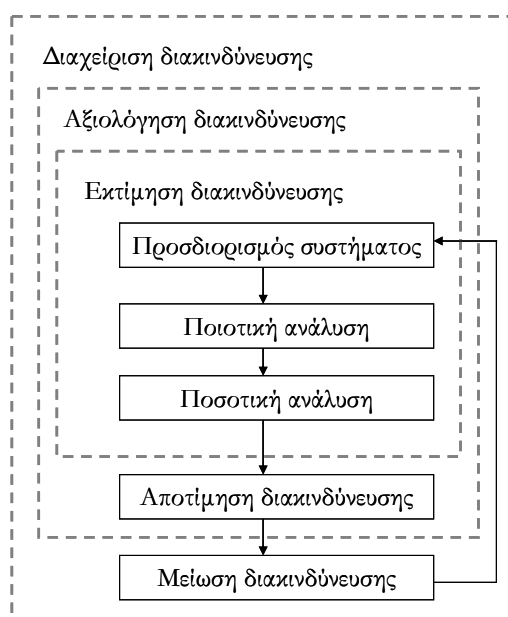
Εάν η διακινδύνευση > ανεκτή διακινδύνευση → μη αποδεκτή περιοχή, ανάγκη μείωσης διακινδύνευσης

Εάν η διακινδύνευση < ανεκτή διακινδύνευση → ο έλεγχος “ALARP” θα πρέπει να ικανοποιείται

### 3.3 Μεθοδολογία ανάλυσης πλημμυρικής διακινδύνευσης

Η αξιολόγηση (assessment) της διακινδύνευσης περιλαμβάνει τα στάδια της αναγνώρισης (identification), της εκτίμησης (estimation) και της αποτίμησης (evaluation) της διακινδύνευσης, και αναφέρεται σε ένα ορισμένο σύστημα. Ο στόχος της αξιολόγησης είναι τα εμπλεκόμενα μέρη (μηχανικοί, διαχειριστές και πολιτικοί) να συγκρίνουν την εκτιμώμενη διακινδύνευση με το αποδεκτό όριο, αφού προσδιορίσουν πρώτα ποιο θα πρέπει να είναι το αποδεκτό επίπεδο. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της διακινδύνευσης συνεισφέρουν στη λήψη αποφάσεων για τα απαιτούμενα επίπεδα ασφαλείας νέων έργων υποδομής (π.χ. αναχωμάτων, σηράγγων κτλ) και επίσης στηρίζουν τελεσεσμένες αποφάσεις για την ορθότητα επιπέδων ασφαλείας και την χρήση νέων μέτρων προστασίας σε υφιστάμενα συστήματα (π.χ. αντιπλημμυρικά έργα). Παραδείγματα αξιολόγησης διακινδύνευσης εντοπίζονται κυρίως σε έργα πολιτικού μηχανικού, όπως είναι η επιλογή του ύψους αντιπλημμυρικού αναχώματος ή της αντισεισμικής ικανότητας ενός κτηρίου. Όταν λάβει κανείς μέτρα μείωσης της διακινδύνευσης ενός συστήματος με βάση την αξιολόγηση της διακινδύνευσης, τότε η ανάλυση έχει προχωρήσει στο στάδιο της διαχείρισης.

Η ανάλυση σε στάδια της διακινδύνευσης αναπτύχθηκε με συστηματικό τρόπο στο επιστημονικό πεδίο της πιθανοτικής ανάλυσης της αστοχίας μεγάλων φραγμάτων. Η Διεθνής Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (International Commission on Large Dams) και η αντίστοιχη ANCOLD έχουν δημοσιεύσει μια σειρά εκθέσεων και εγχειριδίων κατευθυντήριων οδηγιών (guidelines) σχετικά με τη μεθοδολογία ανάλυσης της αστοχίας μεγάλων φραγμάτων συμπεριλαμβανοντας και τον φυσικό κίνδυνο της πλημμύρας. Σε αυτό το πλαίσιο, η ANCOLD δημοσίευσε προτεινόμενη μεθοδολογία πιθανοτικής ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης λόγω αστοχίας φράγματος [ANCOLD 2003]. Βάσει αυτής της μεθοδολογίας, προτείνουμε τα ακόλουθα στάδια ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, που παρατίθενται στο σχήμα της Εικόνας 3-5.



Εικόνα 3-5. Στάδια ανάλυσης πλημμυρικής διακινδύνευσης βάσει της μεθοδολογίας ANCOLD (2003)

Σύμφωνα με το σχήμα, η «εκτίμηση διακινδύνευσης» περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Προσδιορισμός συστήματος: χωροχρονική οριοθέτηση και περιγραφή του συστήματος υπό εξέταση, αναγνώριση των στοιχείων υπό απειλή και προσδιορισμός με σαφήνεια του σκοπού και των στόχων της ανάλυσης
- Ποιοτική ανάλυση: αναγνώριση των φυσικών κινδύνων και των μηχανισμών αστοχίας και δόμηση σεναρίων
- Ποσοτική ανάλυση: εκτίμηση πιθανοτήτων και ζημιών από την εκδήλωση συγκεκριμένων γεγονότων. Η διακινδύνευση μπορεί να εκτιμηθεί ως αναμενόμενη ζημιά ή ως συνάρτηση των πιθανοτήτων και των ζημιών με την ανάπτυξη γραφήματος καμπύλης διακινδύνευσης

Ακολουθεί το στάδιο της αποτίμησης διακινδύνευσης στο οποίο καθορίζεται το επίπεδο της αποδεκτής διακινδύνευσης από τα εμπλεκόμενα μέρη λαμβάνοντας υπόψη όλη τη διαθέσιμη πληροφορία. Η «αποτίμηση της διακινδύνευσης» περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Προσδιορισμός των ανεκτών ορίων διακινδύνευσης
- Αναγνώριση της σημασίας των συνεπειών και της εκτιμώμενης διακινδύνευσης ενός πλημμυρικού γεγονότος από την πλευρά της τοπικής κοινωνίας
- Αναγνώριση της αντίληψης περί διακινδύνευσης και της αποστροφής προς την έννοια της διακινδύνευσης. Θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό να συμπεριληφθεί η αντίληψη περί διακινδύνευσης στη διαδικασία αποτίμησης, διότι η πρόθεση της τοπικής κοινωνίας να λάβει μέτρα μείωσης της διακινδύνευσης εξαρτάται κυρίως από την αντίληψη προς τη διακινδύνευση και όχι τόσο από την εκτιμώμενη (πραγματική) διακινδύνευση.

Στο στάδιο «αξιολόγηση διακινδύνευσης», η διακινδύνευση αξιολογείται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της

εκτίμησης της διακινδύνευσης με το επίπεδο αποδεκτής διακινδύνευσης που προσδιορίστηκε στο στάδιο της αποτίμησης. Επομένως, στο στάδιο αξιολόγησης αποφασίζεται εάν η εκτιμώμενη διακινδύνευση είναι αποδεκτή ή όχι. Η αξιολόγηση της διακινδύνευσης υλοποιείται με αιτιοκρατική ή πιθανοτική προσέγγιση.

Το στάδιο «μείωση και έλεγχος διακινδύνευσης», εξαρτάται από το αποτέλεσμα της αξιολόγησης της διακινδύνευσης. Εάν, δηλαδή η εκτιμώμενη διακινδύνευση αξιολογηθεί μικρότερη από την αποδεκτή διακινδύνευση, τότε θεωρείται ασήμαντη και δεν χρειάζεται να ληφθούν μέτρα. Στην αντίθετη περίπτωση, η λήψη μέτρων μείωσης της διακινδύνευσης είναι αναγκαία, έτσι ώστε να τεθεί υπό έλεγχο η διακινδύνευση και να φτάσει το επίπεδο της αποδεκτής διακινδύνευσης. Παραδείγματα μέτρων μείωσης και ελέγχου διακινδύνευσης είναι η παρακολούθηση, η επιθεώρηση και η συντήρηση του συστήματος.

Τέλος, το στάδιο «διαχείριση διακινδύνευσης» αφορά στην επανεξέταση της διακινδύνευσης του συστήματος μετά τη λήψη των μέτρων μείωσης και ελέγχου, προκειμένου να ελεγχθεί εάν το σύστημα έχει φτάσει στο επίπεδο της αποδεκτής διακινδύνευσης.

### 3.3.1 Κρίσιμα σημεία στην εφαρμογή της μεθοδολογίας

Στο εδάφιο αυτό σημειώνονται τα κρίσιμα σημεία που δυσχεραίνουν την εφαρμογή της μεθοδολογίας στην πράξη για την ανάλυση της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Αρχικά, στο στάδιο της εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης εντοπίζονται δυσκολίες στην ποσοτικοποίηση των πλημμυρικών συνεπειών. Μόνο για την κατηγορία της οικονομικής εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σημειώνονται σημαντικές διαφορές στη μεθοδολογία από κράτος σε κράτος, που περιπλέκουν την ανάδειξη μιας κοινής μεθοδολογίας εκτίμησης. Η διαφοροποίηση στο πλημμυρικό καθεστώς της κάθε χώρας αποτελεί βασικό αίτιο των διαφορών αυτών. Οι Meyer και Messner (2005) στην επισκόπηση και σύγκριση μεθόδων εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς που υλοποίησαν για τέσσερις ευρωπαϊκές χώρες (Μ. Βρετανία, Ολλανδία, Γερμανία και Τσεχία) εντόπισαν διαφορές που σχετίζονται: (α) με τις κατηγορίες ζημιάς που λαμβάνονται υπόψη, (β) το βαθμό λεπτομέρειας, (γ) την χωρική κλίμακα ανάλυσης και (δ) τις βασικές αρχές αποτίμησης. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η έλλειψη δεδομένων, μετρήσεων και παρατηρήσεων ζημιάς αυξάνει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς και κατά συνέπεια της διακινδύνευσης.

Επίσης, η αξιολόγηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης αποτελεί μια διαδικασία σύνθετη, που συνήθως στερείται τυποποιημένης προσέγγισης. Τα επίπεδα πλημμυρικής διακινδύνευσης αξιολογούνται είτε προσδιορίζοντας ένα μέγιστο αποδεκτό αριθμό θυμάτων είτε ένα μέγιστο αποδεκτό ολικό κόστος συμπεριλαμβάνοντας την αναμενόμενη πλημμυρική ζημιά. Ωστόσο, στη διαδικασία αξιολόγησης κρίσιμο σημείο αποτελεί η αναγνώριση της αιτίας πρόκλησης ενός πλημμυρικού γεγονότος, δεδομένου ότι διαφορετικά αίτια πρόκλησης πλημμύρας μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά επίπεδα ασφαλείας αντιπλημμυρικών έργων (safety standards) ή άλλων μέτρων μείωσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η πιθανότητα εμφάνισης ενός πλημμυρικού γεγονότος δεν είναι ίση με το επίπεδο ασφαλείας ενός έργου προστασίας αλλά πολύ πιο μικρή. Αυτό οφείλεται στο ότι το επίπεδο ασφαλείας υπολογίζεται βάσει της πιθανότητας υπέρβασης μιας ορισμένης στάθμης πλημμύρας στο αντιπλημμυρικό ανάχωμα. Εξαιτίας του περιθωρίου ασφαλείας (freeboard), δεν συμβαίνει άμεση αστοχία του αντιπλημμυρικού αναχώματος σε περίπτωση που το βάθος νερού ξεπεράσει την ορισμένη στάθμη. Άλλωστε, εκτός από την υπερπήδηση και άλλοι μηχανισμοί μπορεί να είναι υπεύθυνοι για την αστοχία ενός αναχώματος, όπως είναι η διασωλήνωση και η στατική αστάθεια του αναχώματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτίμησης και αξιολόγησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης σε εθνικό επίπεδο, στο οποίο προσδιορίζονται τα επίπεδα ασφαλείας των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων με βάση το κύριο αίτιο πλημμύρας, είναι το παράδειγμα της Ολλανδίας. Η Ολλανδία είναι μια χώρα που βρίσκεται στο δέλτα τεσσάρων ποταμών και ένα μεγάλο μέρος της χώρας βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με άμεση συνέπεια η πλημμυρική διακινδύνευση να οφείλεται στη δράση παλιρροιακών κυμάτων, σε υπερχειλίσεις ποταμών ή σε εξαιρετικής εντάσεως βροχοπτώσεις. Αυτό οδήγησε από νωρίς την χώρα στην ανάπτυξη διαφορετικών επιπέδων ασφαλείας ανάλογα με το αίτιο πλημμύρας, τα οποία εφαρμόστηκαν με εθνικό νόμο και κατευθυντήριες οδηγίες. Για παράδειγμα, το επίπεδο ασφαλείας των πρωτευόντων αναχωμάτων προστασίας από την επίδραση της θάλασσας έχει υπολογιστεί με πιθανότητα υπέρβασης 1/10 000. Ακόμη, τα επίπεδα ασφαλείας για τα περιφερειακά αντιπλημμυρικά αναχώματα προσδιορίστηκαν βάσει ορισμένου κανονισμού [ΠΟ 1996] ανάλογα με το εύρος της οικονομικής εκτίμησης της αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Έτσι, για παράδειγμα για πλημμυρική ζημιά που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 8 Μ€, το αντίστοιχο επίπεδο ασφαλείας προσδιορίζεται ίσο με 1/10.

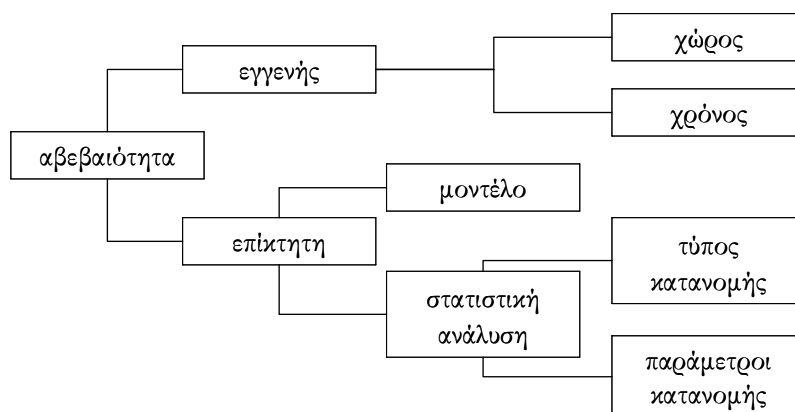
Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά αίτια πλημμύρας στον καθορισμό των επιπέδων ασφαλείας, διευκολύνεται η αποσαφήνιση του τρόπου εκτίμησης της πιθανότητας εκδήλωσης ενός πλημμυρικού γεγονότος με συνεπή και συστηματικό τρόπο. Σε αυτό το πλαίσιο η εκτίμηση και η αξιολόγηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης μπορεί να υπολογιστούν με συνεπή τρόπο και κατά συνέπεια γίνεται πιο αποτελεσματική η διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε για παράδειγμα, να αναγνωριστεί και χαρτογραφηθεί πιο εύκολα η επιρροή των μελλοντικών αλλαγών στις χρήσεις γης ή στην υποδομή στο επίπεδο της αποδεκτής και της προβλεπόμενης πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Τέλος, σε ό,τι αφορά το στάδιο της διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης η αβεβαιότητα γενικά αυξάνει, όταν εξετάζεται η λήψη μέτρων μετριασμού της πλημμυρικής διακινδύνευσης σε επίπεδο σχεδιασμού έργων σε σύγκριση με την περίπτωση υφιστάμενων έργων, αφού στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει προηγούμενο ιστορικών στοιχείων.

### 3.3.2 Αβεβαιότητα στην ανάλυση της διακινδύνευσης

Γενικά διακρίνονται δύο βασικοί τύποι αβεβαιότητας, η εγγενής και η επίκτητη αβεβαιότητα. Η εγγενής αβεβαιότητα προέρχεται από την εκ φύσεως μεταβλητότητα ή τυχαιότητα των ιδιοτήτων ενός συστήματος. Για παράδειγμα, η θεωρητική πιθανότητα εμφάνισης κάθε αποτελέσματος της ρίψης ενός ζαριού είναι ίση με το 1/6, αλλά το αποτέλεσμα μιας ζαριάς δεν είναι ποτέ βέβαιο. Η επίκτητη αβεβαιότητα προέρχεται από την έλλειψη γνώσης. Η εκτιμώμενη πιθανότητα μπορεί να βασίζεται σε περιορισμένο πλήθος δεδομένων ή το μοντέλο μπορεί να μην προσομοιώνει πλήρως τις φυσικές διαδικασίες, με αβέβαιο αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις. Η επίκτητη αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί και ιδανικά να εξαλειφθεί μέσω μετρήσεων, διότι η βεβαιότητα των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται μέσω της παρατήρησης [Bedford και Cooke 2002]. Αντίθετα η εγγενής αβεβαιότητα αντιπροσωπεύει την τυχαιότητα της φύσης και δεν μπορεί να μειωθεί.

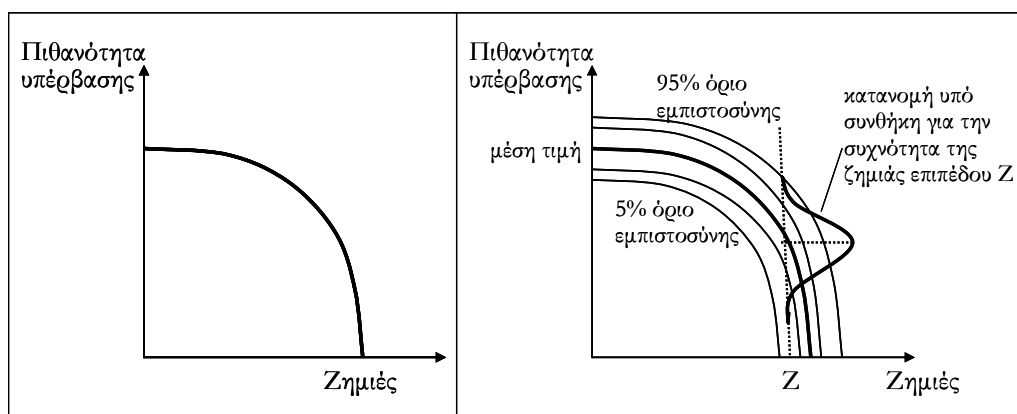
Ο Van Gelder (2000) και ο Jonkman (2007) προτείνουν την κατηγοριοποίηση τύπων αβεβαιότητας που απεικονίζεται στην Εικόνα 3-6. Η εγγενής αβεβαιότητα εμφανίζεται στο χώρο και στον χρόνο. Η επίκτητη αβεβαιότητα μπορεί να οφείλεται στη μοντελοποίηση ή στη στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Η αβεβαιότητα στη στατιστική ανάλυση προέρχεται από το εάν η στατιστική συνάρτηση περιγράφει επαρκώς το φαινόμενο. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, αυτή διακρίνεται σε αβεβαιότητα στην επιλογή του τύπου κατανομής και σε αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των παραμέτρων της κατανομής.



Εικόνα 3-6. Σχηματοποίηση των τύπων αβεβαιότητας [βάσει της δημοσίευσης van Gelder (2000)]

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι τα όρια των υποκατηγοριών του σχήματος στην Εικόνα 3-6 δεν είναι απολύτως διακριτά. Για παράδειγμα, οι εγγενείς διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες του εδάφους μπορεί να μειωθούν με πειραματικές μετρήσεις. Ωστόσο, η παραπάνω διάκριση είναι πολύ χρήσιμη στην ανάλυση της διακινδύνευσης, διότι διευκρινίζει με σαφήνεια τους τύπους αβεβαιότητας και κατά συνέπεια τον ενδεχόμενο χειρισμό τους στην ανάλυση.

Στην παρούσα διατριβή θεωρήθηκε προτιμότερο η εγγενής και η επίκτητη αβεβαιότητα να προσεγγιστούν ξεχωριστά. Η εγγενής αβεβαιότητα εκφράζεται μέσω της πιθανότητας συχνότητας ενός ορισμένου γεγονότος και της επακόλουθης ζημιάς (βλέπε αριστερό μέρος της Εικόνας 3-7). Η επίκτητη αβεβαιότητα σε ένα αποτέλεσμα μπορεί να εκφραστεί με μία οικογένεια καμπυλών διακινδύνευσης, στην οποία κάθε καμπύλη θα αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο εμπιστοσύνης (βλέπε δεξί μέρος της Εικόνας 3-7). Για παράδειγμα, μια καμπύλη διακινδύνευσης επιπέδου εμπιστοσύνης 95% σημαίνει ότι θεωρούμε με εμπιστοσύνη επιπέδου 95%, ότι η συνδυασμένη πιθανότητα και ζημιά ενός γεγονότος θα έχουν αποτελέσματα κάτω από την καμπύλη αυτή. Επίσης, αυτή η προσέγγιση υπονοεί ότι για κάθε τιμή ζημιάς (επιπέδου  $Z$ ) υπάρχει μια υπό συνθήκη κατανομή της αντίστοιχης πιθανότητας υπέρβασης.



Εικόνα 3-7 Αριστερά: καμπύλη διακινδύνευσης απεικονίζει την εγγενή αβεβαιότητα, δεξιά: οικογένεια καμπυλών διακινδύνευσης απεικονίζουν την επίκτητη αβεβαιότητα [βάσει Kaplan and Garrick 1981, Pate Cornell 1996]



### 3.4 Κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ

Η αλλαγή στη στρατηγική αντιμετώπισης πλημμυρών και η στροφή προς τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης αποτυπώθηκε στην Ευρώπη επισήμως μέσω της κοινοτικής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ περί «Αξιολόγησης και διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας» [European Council 2007]. Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου εκδόθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2007 και τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου 2007. Η Οδηγία συστήνει στα κράτη μέλη της Ε.Ε. να αναγνωρίσουν από τις περιοχές που γειτνιάζουν με υδάτινα σώματα, ειλείνες που βρίσκονται υπό διακινδύνευση πλημμύρας, να χαρτογραφήσουν τη δυνητική έκταση της πλημμύρας και τα στοιχεία υπό απειλή στις εν δυνάμει κατακλυσμένες περιοχές και τέλος, να λάβουν αναγκαία μέτρα μείωσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης όπου κρίνεται απαραίτητο. Η Οδηγία ενισχύει τα δικαιώματα των εμπλεκόμενων μερών και ενδιαφερόμενων στην πρόσβαση σε σχετική διαθέσιμη πληροφορία και στην ενεργή συμμετοχή τους σε διαδικασίες σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων. Ο στόχος της νέας Οδηγίας για τις πλημμύρες είναι να αναπτυχθεί ένα πλαίσιο αξιολόγησης και διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, το οποίο θα έχει την ικανότητα να μειώσει τις αρνητικές συνέπειες μιας πλημμύρας στον άνθρωπο, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Η Οδηγία αφορά όλους τους τύπους πλημμύρας (αστικές και παράκτιες πλημμύρες, ταχείας απόκρισης πλημμύρες και υπερχειλίσσεις ποταμών, τσουνάμι και παλιρροιακά κύματα) και απαιτεί από τα κράτη μέλη να εφαρμόσουν μια ολοκληρωμένη διαδικασία που διακρίνεται στα παρακάτω στάδια:

**Πρώτο στάδιο:** Τα κράτη μέλη οφείλουν μέχρι το 2011, να έχουν διεξάγει προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας σε όλες τις λεκάνες απορροής και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες με στόχο να εντοπιστούν και να αναγνωριστούν οι περιοχές που τελούν υπό απειλή πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η περαιτέρω δράση που προτείνεται να εφαρμοστεί, αφορά μόνο τις περιοχές που κρίθηκαν υπό πλημμυρική διακινδύνευση είτε σε υφιστάμενες είτε σε μελλοντικές συνθήκες.

**Δεύτερο στάδιο:** Για τις περιοχές υπό πλημμυρική διακινδύνευση, τα κράτη μέλη οφείλουν μέχρι το 2013, να έχουν αναπτύξει χάρτες κινδύνου πλημμύρας και χάρτες διακινδύνευσης πλημμύρας. Αυτοί οι χάρτες υποδεικνύουν περιοχές με χαμηλή και μέτρια πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας απεικονίζοντας τα αναμενόμενα βάρη κατάκλυσης. Άλλοι τύποι πληροφορίας που θα πρέπει να δίνουν οι χάρτες αυτοί είναι ο αριθμός των εν δυνάμει πληγέντων κατοίκων, η οικονομική δραστηριότητα που βρίσκεται υπό απειλή πλημμύρας και η δυνητική ζημιά στο περιβάλλον. Οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου αναμένεται να αυξήσουν τη δημόσια επίγνωση των εν δυνάμει πλημμυροόπληκτων περιοχών, να υποστηρίξουν διαδικασίες ιεράρχησης, τεκμηρίωσης και στόχευσης επενδύσεων και να στηρίξουν την ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, γενικών χωροταξικών σχεδίων και σχεδίων έκτακτης ανάγκης.

**Τρίτο στάδιο:** Μέχρι το 2015, σχέδια διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης θα πρέπει να έχουν εκπονηθεί για τις ζώνες που αναγνωρίστηκαν στο δεύτερο στάδιο σε επίπεδο λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής. Τα σχέδια θα περιλαμβάνουν μέτρα μείωσης της πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας και των δυνητικών συνεπειών της, και επομένως θα αποτελούν το λειτουργικό εργαλείο της διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης σε ολόκληρο το πεδίο. Οι προτεραιότητες των σχεδίων εστιάζουν στους άξονες πρόληψης (π.χ. στην αποτροπή κατασκευής κατοικιών και βιομηχανιών σε σημερινές και μελλοντικές πλημμυροόπληκτες περιοχές ή στην προσαρμογή μελλοντικών αναπτυξιακών σχεδίων στην πλημμυρική διακινδύνευση), στην προστασία (π.χ. στη λήψη μέτρων μείωσης της πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας

ή/και των επιπτώσεων πλημμύρας σε μια ορισμένη τοποθεσία (π.χ. υδροβιότοποι) και στην ετοιμότητα (π.χ. παρέχοντας οδηγίες στο κοινό για το τι πρέπει να κάνουν σε περίπτωση πλημμύρας). Λόγω της πολυδιάστατης φύσης της πλημμύρας, η Οδηγία αφήνει στα κράτη μέλη μεγάλη ευελιξία για τη λήψη των προτεινόμενων μέτρων. Σε περίπτωση που μία λεκάνη απορροής ανήκει εξ ολοκλήρου στην Ε.Ε. αλλά είναι μοιρασμένη σε διάφορα κράτη μέλη ή επεκτείνεται και πέρα από τα όρια της Ε.Ε., τα παραπάνω μέτρα θα πρέπει να αναπτυχθούν σε συνεργασία με ολόκληρη τη διοικητική μονάδα.

Στη συνέχεια, η Οδηγία 2007/60/ΕΚ προβλέπει επανεξέταση, επικαιροποίηση και αξιολόγηση προόδου, αιτιολόγηση μη εκτέλεσης προγραμματισμένων έργων, και συμπληρωματικά μέτρα κάθε έξι χρόνια σε ένα κύκλο συντονισμένο και συγχρονισμένο με τον κύκλο εκτέλεσης της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60.

### 3.4.1 Αδυναμίες στην εφαρμογή της νέας Οδηγίας

Οι Tsakiris et al. (2009) σε μια πρώτη προσπάθεια σχολιασμού του περιεχομένου της νέας Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, αναδεικνύουν και παραθέτουν κρίσιμα τεχνικά ζητήματα που θα προκύψουν κατά τη διαδικασία εφαρμογής της Οδηγίας από τα κράτη μέλη της Ε.Ε. και χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Μερικά από τα ζητήματα αυτά παρατίθενται στις ακόλουθες παραγράφους.

Ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα είναι η επιλογή της πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας, η οποία σύμφωνα με την 2007/60/ΕΚ αφήνεται στα κράτη μέλη. Η Οδηγία αναφέρεται σε τρεις πιθανότητες εμφάνισης πλημμύρας (μικρή, μέτρια και μεγάλη). Για παράδειγμα, σενάρια πλημμύρας με πιθανότητα υπέρβασης ίσης με 0.2-0.1 μπορεί να θεωρηθούν ως σενάρια μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης, ενώ σενάρια με πιθανότητα υπέρβασης ίσης με 0.02-0.01 και 0.002-0.001 ως σενάρια μέτριας και μικρής πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας αντίστοιχα. Ωστόσο, τα τρία παραπάνω σενάρια, πολλές φορές δεν είναι επαρκή για να περιγράψουν πλήρως το εύρος πιθανοτήτων εμφάνισης πλημμύρας, οπότε πιθανόν να απαιτείται ο προσδιορισμός ενδιάμεσων πιθανοτήτων υπέρβασης π.χ. ίσης με 0.04. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που απαιτείται ολοκλήρωση της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς, προφανώς είναι αναγκαία η ανάπτυξη περισσότερων από τρία σενάρια πλημμύρας για να επιτευχθεί ένα ελάχιστο επίπεδο ακρίβειας στο ολοκλήρωμα.

Επίσης, τίθεται ζήτημα διαθεσιμότητας υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων για την εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, τα οποία σπάνια είναι διαθέσιμα σε λεκάνες απορροής της Μεσογείου λόγω έλλειψης δικτύου σταθμών μετρήσεων. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις αιχμών παροχής είναι σπάνια διαθέσιμες ιδιαίτερα στην Ελλάδα, τα υδρογραφήματα άμεσης απορροής πλημμυρικών γεγονότων προκύπτουν από συνθετικά υετογράμματα μέσω μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής. Επιπλέον, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των διαθέσιμων χρονοσειρών προσεγγίζουν το μήκος 5 ή 10 ετών, το σενάριο μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί βάσει μετρήσεων βροχόπτωσης και απορροής. Αντίθετα, η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων σεναρίου μικρής πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας είναι ανέφικτη και κατά συνέπεια θα πρέπει κανείς να βασιστεί σε αβέβαιες προβλέψεις που προκύπτουν από την ουρά προσαρμοσμένων πιθανοτικών κατανομών. Ακόμη, εάν ληφθεί υπόψη μια μονοσήμαντη καμπύλη στάθμης – παροχής αντί της γνωστής μορφής βρόχου εισάγεται πρόσθετη αβεβαιότητα στους υδραυλικούς υπολογισμούς. Η συνήθης, λοιπόν, πρακτική υδραυλικής προσομοίωσης ενέχει κινδύνους άμβλυνσης της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων της αιχμής παροχών.

Τέλος, η ποσοτικοποίηση των πλημμυρικών συνεπειών παραμένει ένα από τα πιο κρίσιμα μέρη όλης της διαδικασίας εφαρμογής της 2007/60/ΕΚ. Αφενός δεν είναι δυνατόν όλοι οι τύποι ζημιάς να μπορούν να μετρηθούν με οικονομικούς όρους (π.χ. απώλειες ανθρώπινης ζωής). Αφετέρου οι μετρήσιμοι τύποι ζημιάς

απαιτούν τα εξής: (α) αξιοσημείωτη ποσότητα πληροφορίας στον χρόνο και στον χώρο, (β) μια συνεπή μεθοδολογία αξιολόγησης της μέγιστης άμεσης ζημιάς για κάθε κατηγορία στοιχείου υπό απειλή, (γ) μια αξιόπιστη βάση δεδομένων που μπορεί να στηρίξει αυτή τη μεθοδολογία, (δ) μια αξιόπιστη καμπύλη συνάρτησης πλημμυρικών μεγεθών με τη μέγιστη άμεση ζημιά για κάθε κατηγορία στοιχείου υπό απειλή και (ε) ένα μοντέλο οικονομικών έμμεσων συνεπειών λόγω πλημμύρας εκτός της κατακλυσμένης περιοχής που θα λειτουργεί σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Επιπλέον, η έλλειψη βάσεων δεδομένων των καταστροφών λόγω πλημμύρας στην Ευρώπη [Barredo 2007] που να περιλαμβάνει ευρύ πλήθος πληροφορίας (υδραυλικές παραμέτρους, ζημιές, ιστορικά στοιχεία κτλ), θέτει προβλήματα κυρίως στην αναγνώριση περιοχών υπό απειλή πλημμύρας (στάδιο 1 της Οδηγίας).

Στα προαναφερθέντα κρίσιμα τεχνικά ζητήματα προστίθεται η ιδιαιτερότητα της Ελλάδας στην εφαρμογή της Οδηγίας, η οποία οφείλεται κυρίως στους ακόλουθους παράγοντες:

- Οι λειάνες απορροής ποταμών στην Ελλάδα διαφέρουν από αυτές της Κεντρικής Ευρώπης ως προς την έκταση τους και συνεπώς ως προς τον τύπο των παρατηρούμενων πλημμυρών. Οι πλημμύρες στον ελληνικό χώρο χαρακτηρίζονται συνήθως ως ταχείας απόκρισης πλημμύρες (λόγω απότομης κλίσης εδάφους, χαμηλής βλάστησης, μεγάλης έντασης βροχόπτωσης) και είναι πιθανό να προκαλέσουν μεγαλύτερης έντασης άμεση ζημιά σε σύγκριση με άλλους τύπους πλημμύρας (π.χ. ποτάμιες πλημμύρες). Αυτό οφείλεται στα εξής: (α) οι ταχύτερες ροές είναι υψηλές και η πρόκληση σημαντικής στερεοπαροχής αναμενόμενη, (β) η άνοδος της πλημμυρικής στάθμης είναι απότομη και (γ) οι πλημμύρες ταχείας αποκρίσεως συμβαίνουν σε μικρές λειάνες απορροής με απότομη κλίση εδάφους και δίνουν μικρά χρονικά περιθώρια αντίδρασης σε επίπεδο πολιτικής προστασίας.
- Οι μεγάλες λειάνες απορροής (Αξιός, Στρυμόνας, Νέστος, Έβρος) ανήκουν στην κατηγορία των διακρειακών. Η Οδηγία προτείνει είτε η λειάνη απορροής υπάγεται εξολοκλήρου στην Ε.Ε. είτε όχι, να επιδιώκεται η κατάρτιση ενός διεθνούς σχεδίου διαχείρισης.
- Η αλλαγή των χρήσεων γης (αστικοποίηση, πυρκαγιές, μείωση των δασικών εκτάσεων, μείωση του χρόνου συγκέντρωσης, αύξηση του συντελεστή απορροής) επιβάλλει την επικαιροποίηση των υφιστάμενων υδρολογικών μελετών, ενώ η ταυτόχρονη έλλειψη διαθέσιμων υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων δυσχεραίνει τη διαδικασία αυτή και επίσης, παρεμποδίζει τη σύνταξη νέων υδρολογικών μελετών με την χρήση μη εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού.

Στα συμπεράσματα ημερίδας που οργανώθηκε από το ΤΕΕ στις 5 Δεκεμβρίου 2007 με στόχο την πληροφόρηση του κοινού σχετικά με τη νέα Οδηγία 2007/60/ΕΚ και τη διερεύνηση των ιδιαιτεροτήτων της εφαρμογής της στην Ελλάδα, διαπιστώθηκε επίσης, η αναγκαιότητα σύνταξης των κατάλληλων προδιαγραφών για την υλοποίηση των μελετών που απαιτούνται από την Οδηγία και η ύπαρξη προσβάσιμων και συμβατών μεταξύ τους πληροφοριών, μετρήσεων και δεδομένων. Εξίσου αναγκαιός θεωρήθηκε, ακόμη, ο συντονισμός μεταξύ χωροταξικού σχεδιασμού για τις χρήσεις γης και απαιτούμενων δράσεων για την πρόληψη των πλημμυρών.

Το απαιτούμενο νομοθετικό έργο καθώς και η αναγκαία διοικητική δομή που θα κληθεί να υποστηρίξει και να συντονίσει τις δράσεις, αποτελούν προτεραιότητες για την υλοποίηση της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στην Ελλάδα. Τέλος, οι τοπικοί φορείς στην περιφέρεια είναι σημαντικό να έχουν συγκεκριμένο και σαφή ρόλο, ενταγμένο στον συνολικό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό και να είναι σε θέση να ανταποκριθούν άμεσα στη διαχείριση των κρίσεων.



## Κεφάλαιο 4

# Βιβλιογραφική επισκόπηση στις μεθόδους εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται στη βιβλιογραφική επισκόπηση μεθόδων εκτίμησης της ζημιάς λόγω άμεσης επαφής με πλημμυρικά νερά που προκαλείται είτε λόγω κατάκλυσης είτε λόγω πλημμύρας με σημαντική ταχύτητα ροής είτε λόγω δράσης πλημμυρικών κυμάτων. Η βιβλιογραφική επισκόπηση αφορά την κατηγορία της άμεσης, πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η οποία εκτιμάται με ποσοτικό ή με ποιοτικό τρόπο. Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας της βιβλιογραφίας που διερευνήθηκε κατά την επισκόπηση. Η ταξινόμηση πληροφορίας στον πίνακα βασίζεται στις παραμέτρους ανάλυσης ζημιάς που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Από την επισκόπηση διαπιστώθηκε ότι η πλειοψηφία των δημοσιευμένων εργασιών εξετάζει την οικονομική εκτίμηση (σε απόλυτες τιμές ή σε ποσοστά) της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον και ότι η μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς αποτελεί την πιο διαδεδομένη προσέγγιση. Δεδομένου όμως ότι το βάθος νερού αποτελεί ένα μόνον από τα μεγέθη πλημμύρας που μπορεί να προκαλέσουν ζημιά, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται και σημαντικές επιστημονικές εργασίες οι οποίες διερεύνησαν και άλλα μεγέθη, όπως είναι η ταχύτητα ροής και η διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Πρόκειται για αξιολογώτερες μεθόδους εκτίμησης ζημιάς που λαμβάνουν υπόψη τους, εκτός από το βάθος νερού, και άλλες παραμέτρους.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε πέντε υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 4.1 παρουσιάζεται ο συγκριτικός πίνακας που αναπτύχθηκε από τη διερεύνηση της βιβλιογραφίας. Στο υποκεφάλαιο 4.2 περιγράφεται η πιο διαδεδομένη μέθοδος οικονομικής εκτίμησης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Το υποκεφάλαιο αναφέρεται στο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου, στην ιστορική αναδρομή ανάπτυξής της και επίσης σχολιάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Στο υποκεφάλαιο 4.3 παρουσιάζεται η μέθοδος καμπύλης πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς, η οποία βασίζεται στην καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς για την εκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς. Το υποκεφάλαιο 4.4 αναφέρεται σε μεθόδους ποιοτικής εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται κυρίως σε ανάπτυξη κριτηρίων ζημιάς βάσει πλημμυρικών μεγεθών

και το υποκεφάλαιο παρουσιάζει χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών για διαφορετικούς τύπους πλημμύρας. Επίσης, το ίδιο υποκεφάλαιο αναφέρει αναλυτικά το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen, το οποίο εφαρμόζεται σε περίπτωση μελέτης της διατριβής. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 4.5, αναφέρονται συνοπτικά αξιοσημείωτες προσπάθειες εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, οι οποίες περιλαμβάνουν στις εκτιμήσεις τους, εκτός από τα πλημμυρικά μεγέθη, και άλλους παράγοντες.

## 4.1 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Ο Πίνακας 4-1 συγκεντρώνει αναλυτική πληροφορία από 40 δημοσιευμένες εργασίες με αντικείμενο τις μεθόδους εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό με την ερευνητική εργασία της Friedland (2009) για την ταξινόμηση της σχετικής βιβλιογραφίας σύμφωνα με τις παραμέτρους ανάλυσης ζημιάς, η πληροφορία που παρέχεται στον Πίνακα 4-1 αφορά: (α) τον τύπο μέτρησης ζημιάς (φυσική ή οικονομική), (β) τον τύπο κλιμακίας μέτρησης (συνεχής ή διακριτή), (γ) τον τύπο πλημμυρικού κινδύνου (κατάκλυση, πλημμύρα με σημαντική ταχύτητα ροής, πλημμύρα με δράση κυμάτων, άλλο), (δ) το πλημμυρικό μέγεθος υπό εξέταση (βάθος νερού, ταχύτητα ροής, άλλο), (ε) τον τύπο δομημένου περιβάλλοντος (σκελετός, περιεχόμενο, σύνολο, άλλο), (στ) την κλιμακία χωρικής ανάλυσης (μάκρο, μέσο και μικρό), (ζ) τη μονάδα μέτρησης (απόλυτη τιμή, ποσοστό ζημιάς, κατηγοριοποίηση, άλλο), (η) την χρήση γης (κατοικία, επαγγελματική χρήση, βιομηχανική χρήση, αγροτική χρήση, άλλο) και (θ) το υλικό κατασκευής κτηρίου (οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία από οπτοπλινθοδομή, άλλο). Οι συντομογραφίες για καθεμία από τις τιμές των παραμέτρων δίνονται στο υπόμνημα που συνοδεύει τον Πίνακα 4-1. Επιπλέον, παρέχεται πληροφορία για τη χώρα προέλευσης ή εφαρμογής της ελάχιστοτε ερευνητικής εργασίας και επίσης, αναγράφεται το εύρος τιμών βάθους νερού και ταχύτητας ροής για κάθε εργασία που είναι διαθέσιμα.

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 4-1 αλλά και από αναφορές σε πολλές ερευνητικές εργασίες, υπάρχουν συνήθως περισσότερες από μια διαθέσιμες μέθοδοι εκτίμησης άμεσης ζημιάς για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ωστόσο, πρώτη εξετάζεται η μέθοδος καμπύλης βάθους νερού-ζημιάς, αφού αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη.

Πίνακας 4-1. Βιβλιογραφική επισκόπηση στις μεθόδους εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
FEMA (2003)	Ο	Δ	Κ	Β	Σ	Μι	Π	Κ		0 έως 8+ ft	Εκτιμητής ουσιαστικής ζημιάς σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες βάσει παρατηρημένων τιμών βάθους νερού (Residential Substantial Damage Estimator)	ΗΠΑ
Skinner (2006)	Ο	Δ	Κ	Β	Σ	Μα	Π	Κ		0 έως 8+ ft	Εφαρμογή τροποποιημένης μεθόδου RSDE σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα Κατρίνα	ΗΠΑ
USACE (2000, 2003)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π	Με	Π	Κ		-8 έως 16 ft	Ανάπτυξη γενικευμένων σχέσεων βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για κατοικίες με ή χωρίς υπόγεια για χρήση σε έργα κόστους-οφέλους	ΗΠΑ
FEMA (2006)	Ο	Σ	Κ Τ	Β Τ	Σ Π	Με	Π	Κ Ε Β Αγ Λ	Τ Ο	-2 έως 18 ft	Υπολογιστικό πρόγραμμα εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς FEMA HAZUS MH-Flood Model	ΗΠΑ
USACE (1996)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π	Με	Π	Κ			Συζήτηση και σχολιασμός για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στη	ΗΠΑ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης <sup>7</sup>	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
											μέθοδο βάθους νερού-ζημιάς	
Grigg and Helweg (1975)	Ο	Σ	Κ	Β	Συ	Με	Π	Κ		0 έως 12 ft	Σύγκριση καμπυλών βάθους νερού-ζημιάς προερχόμενες από FIA, USACE και USDA Soil Conservation Service	ΗΠΑ
White (1964)	Ο	Σ	Κ Τ	Β Τ	Συ	Με	Π Λ	Κ Ε		0 έως 10 ft	Εισάγει την έννοια των συνθετικών μεθόδων εκτίμησης ζημιάς και επίσης εξετάζει γενική επιρροή στην οικονομική απώλεια λόγω διάρκειας πλημμύρας, ταχύτητας ροής και στερεοπαροχής	ΗΠΑ
Blong et al. (2001)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π	Με	Π	Κ		-0.25 έως 3m	Ανάπτυξη καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς από το Ερευνητικό Κέντρο Φυσικών Κινδύνων (NHRC), βασισμένη σε βάση δεδομένων οικονομικών απωλειών (FLAIR) στη Μ. Βρετανία	Αυστραλία
Dutta et al. (2003)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π	Με	Π	Κ	Ο Α	0 έως 6 m	Ανάπτυξη καμπυλών βάθους νερού-ζημιάς με δεδομένα κατασκευών της Ιαπωνίας, η οποία εφαρμόζεται σε μοντέλο ολοκληρωμένης εκτίμησης ζημιάς	Ιαπωνία



ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
Penning-Rowse and Chatterton (1977)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π	Μι	Α	Κ Ε Β Λγ Α		-0.3 έως 3m	Παρουσιάζει καμπύλες βάθους νερού-απόλυτης ζημιάς για συγκεκριμένους τύπους κτηρίου, παλαιότητας, και κοινωνικής τάξης, περιλαμβάνοντας την επίδραση της διάρκειας πλημμύρας	Μ. Βρετανία
Smith (1981)	Ο	Σ	Κ	Β	Συ	Μι	Α	Κ Ε Β			Εκτίμηση και σύγκριση πραγματικής και αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε αστική περιοχή, βασισμένη σε τηλεφωνική έρευνα 140 κατοικιών, 212 εμπορικών καταστημάτων και 26 βιομηχανιών.	Αυστραλία
Smith (1994)	Ο	Σ	Κ	Β		Με	Α Π	Κ Ε			Επισκόπηση μεθόδων οικονομικής εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς μέσω της καμπύλης βάθους νερού-ζημιάς	Αυστραλία
Pistrika (2009)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ	Με	Α	Κ Ε Β Λγ Α	Ο	0.3 έως 6 m	Εκτίμηση αναμενόμενης ετήσιας αναμενόμενης άμεσης ζημιάς σε διάφορες χρήσεις γης, λόγω πλημμύρας από υπερχείλιση ρέματος στην Ανατολική Αττική. Εφαρμογή σε ΓΣΠ	Ελλάδα

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
Brinkmann and Ragas (2006)	Ο	Σ	Κ Τ Δ	Β	Σ Π Συ	Μα	Α Π	Κ			Στατιστική ανάλυση στοιχείων άμεσης οικονομικής ζημιάς στις πλημμυρόπληκτες κατοικίες της Νέας Ορλεάνης λόγω τυφώνα Κατρίνα	Η.Π.Α.
Oliveri and Santoro (2000)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ Π Συ	Μα	Π	Κ Α		0.25 έως 7 m	Ανάπτυξη εμπειρικής συνάρτησης συχνότητας πλημμύρας-ζημιάς βασισμένη σε λεπτομερή τοπική έρευνα της αστικής περιοχής του Παλέρμο, Σικελία, λαμβάνοντας υπόψη την αποτίμηση ιστορικών κτηρίων	Ιταλία
Alkema (2000)	Ο	Σ		Β Τ Α	Συ Α	Μα	Α Κ	Κ Β Αγ Α		0 έως >3.5 m 0 έως >2 m/s 0 έως >0.8 m <sup>2</sup> /s 0 έως >1 m/h	Οικονομική εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον και αγροτική γη στο πλαίσιο μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων για αυτοκινητόδρομο κοντά στο Τρέντο	Ιταλία
Merz et al. (2004)	Ο	Σ	Κ	Β		Μα	Α	Κ Α		0 έως 4 m	Διερεύνηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις καμπύλες βάθους νερού-απώλειας για εννέα πλημμυρικά γεγονότα στη Γερμανία από το 1978 έως το 1994	Γερμανία
Goldman (1997)	Ο	Σ	Κ	Β			Α		Ο		Προϋποθέσεις για την χρήση αναμενόμενης πιθανότητας πλημμύρας για	Η.Π.Α.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
											τον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας πλημμυρικής ζημιάς	
Egorova (2008)	Ο	Σ	Κ	Β	Σ	Μα	Α				Ενσωμάτωση αβεβαιότητας στα αποτελέσματα μοντέλου εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που αναπτύχθηκε στην Ολλανδία	Ολλανδία
Thieken et al. (2005)	Ο		Κ	Β	Σ Π	Μα	Π Α	Κ			Προσδιορισμός παραγόντων που επηρεάζουν τις απόλυτες και σχετικές οικονομικές εκτιμήσεις άμεσης πλημμυρικής ζημιάς, βασισμένος σε πρωτογενή δεδομένα από τηλεφωνική έρευνα στους πληγέντες	Γερμανία
Meyer and Messner (2005)	Ο		Κ	Β	Σ Π Α	Μα Με Μι		Κ Ε Β Α			Συζητά τις μεθόδους αποτίμησης πλημμυρικής ζημιάς στην Ευρώπη. Η εργασία βρίσκει σημαντικές διαφορές στο επίπεδο ανάλυσης, στο βαθμό λεπτομέρειας, στη βάση αποτίμησης κ.α.	Αγγλία Γερμανία Ολλανδία Τσεχία
Kelman (2002)	Φ	Δ	Κ Τ	Β Τ	Σ	Μα	Κ	Κ			Αναπτύσσει κλίμακα κατηγοριοποίησης της άμεσης ζημιάς σε 6 κλάσεις για πλημμυρόπληκτες κατοικίες. Διερευνά το μηχανισμό αντίστασης κατοικίας (φυσική τρωτότητα) έναντι	Μ. Βρετανία

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωριστής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
											πλημμύρας χρησιμοποιώντας το ρυθμό ανύψωσης στάθμης και την αστοχία τοίχου και παραθύρου	
Kelman and Spencer (2004)	Φ	Δ	K T A	B T	Σ	Mi	K				Κατηγοριοποίηση των πλημμυρικών μεγεθών ανάλογα με την επίδραση τους στην πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες δράσεων πλημμύρας	M. Βρετανία
Roos et al. (2003)	Φ	Σ	K T Δ	B T	Σ	Me	K	K	O A	0 έως 5m	Υπολογισμός εφελκυστικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών λόγω υδροστατικών, υδροδυναμικών φορτίων, φορτίων λόγω δράσης κύματος και στερεοπαροχής με στόχο τη σύγκριση με τυπική αντίσταση κατασκευής	Ολλανδία
Black (1975)	Φ	Σ	K T	B T	Σ	Me	K	K	O T	0 έως 17 ft 0 έως 27 ft/s	Ανάπτυξη κριτηρίων άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες βάσει μεγεθών ταχύτητας ροής και βάθους νερού μέσω υπολογισμού εφελκυστικών τάσεων, κάμψεων και άνωσης	H.Π.Α.
Sangrey et al. (1975)	Φ	Σ	K T	B T	Σ	Me	K	K	E		Ανάπτυξη εμπειρικών συναρτήσεων δυνητικής κατάρρευσης για διάφορες χρήσεις γης, βασισμένη σε ανάλυση	H.Π.Α.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
								B			υδροδυναμικών δυνάμεων και δυνάμεων άνωσης σε σχέση με τις δυνάμεις τριβής για εννέα κατηγορίες κτηρίων	
Clausen (1989)	Φ	Δ	Δ	B T Λ		Me	K	K	T	$v = 2 \text{ m/s}$ $3 \text{ m}^2/\text{s} < dv < 7 \text{ m}^2/\text{s}$	Ανάπτυξη κριτηρίων άμεσης πλημμυρικής ζημιάς βάσει βάθους νερού και ταχύτητας ροής. Διακρίνονται τρεις ζώνες πλημμυρικού κινδύνου	M. Βρετανία
Becker (2008)	Φ	Δ	K T Δ Λ	B T	Σ	Mi	K		Λ		Ανάπτυξη θεωρητικού μοντέλου άμεσης ζημιάς σε ξύλινες κατοικίες. Συσχέτιση του μηχανισμού αντίστασης κατοικίας με το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής	Καναδάς
Schwarz and Maiwald (2008)	Φ	Δ	K T Δ Λ	B Λ	Σ	Ma Me Mi	K		T O Λ		Ανάπτυξη μεθόδου κατηγοριοποίησης της δομικής ζημιάς σε όλα τα επίπεδα χωρικής ανάλυσης και λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική τρωτότητα της κατασκευής	Γερμανία
Pistrika and Jonkman (2009)	Φ	Δ	K T	B T	Σ	Me Mi	K	K	T Λ	0 έως 5 m 0 έως 10 m/s	Ανάπτυξη κριτηρίων άμεσης πλημμυρικής ζημιάς βάσει μεγεθών ταχύτητας ροής και βάθους νερού με δεδομένα από τις πλημμυρόπληκτες	Ολλανδία

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωριστής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
											κατοικίες στην πόλη της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα Κατρίνα	
Friedland (2009)	Φ	Δ	Δ	B T A	Σ Συ A	Μα Με Μι	Κ	Κ			Η διατριβή επικεντρώνει στη διερεύνηση της επίδρασης παλιρροιακού κύματος από τυφώνα σε δομημένο περιβάλλον. Προτείνει κλίμακα βαθμονόμησης ζημιάς από πλημμύρα και άνεμο σε επτά διακριτές κλάσεις.	Η.Π.Α.
Asselman and Jonkman (2003)	Φ	Σ	Κ Τ	Β Τ	Σ	Με	Κ	Κ	Ο Α	0 έως 5 m 0 έως 5 m/s	Εκτίμηση απωλειών ανθρώπινης ζωής λόγω κατάρρευσης κτηρίων	Ολλανδία
Graham (1999)	Φ	Δ	Δ	Α		Μα	Αλ	Κ			Εκτίμηση δυνητικού αριθμού απωλειών ανθρώπινης ζωής μετά από υποθετική θραύση φράγματος βάσει εμπειρικών εξισώσεων που προέκυψαν βάσει ιστορικών στοιχείων για αστοχίες φραγμάτων που συνέβηκαν μετά το 1960 στις ΗΠΑ.	Η.Π.Α.
Pistrika and Tsakiris (2008)	Φ	Δ	Δ	Α	Σ	Μα	Αλ	Κ			Εφαρμογή της μεθόδου Graham για την εκτίμηση απωλειών ανθρώπινης ζωής μετά από υποθετική θραύση του φράγματος Σμοκόβου, Ελλάδα	Ελλάδα
Jonkman et al.	Ο	Δ				Μα	Α				Επισκόπηση σε ποσοτικές μεθόδους	Ολλανδία

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ	Μέτρηση 1	Τύπος κλίμακας 2	Κίνδυνος πλημμύρας 3	Μέγεθος πλημμύρας 4	Τύπος δομημένου περιβάλλοντος 5	Κλίμακα χωρικής ανάλυσης 6	Μονάδα μέτρησης 7	Χρήση γης 8	Υλικό κατασκευής κτηρίου 9	Εύρος τιμών	Αντικείμενο έρευνας	Χώρα
(2003)		Σ					Αλ				μέτρησης της διακινδύνευσης για απώλεια ανθρώπινης ζωής και οικονομικής ζημιάς	
Jonkman (2007)	Φ	Σ	Κ Τ	Β Τ Α	Σ	Μα	Αλ	Κ			Εκτίμηση αριθμού απωλειών ανθρώπινης ζωής βάσει πλημμυρικών μεγεθών, μοντέλου εκκένωσης και εκτίμηση θνησιμότητας. Δεδομένα από πλημμύρες μακροκλίμακας σε Ολλανδία και ΗΠΑ	Ολλανδία
Jonkman et al. (2009)	Φ	Σ	Κ Τ Δ	Β Τ Α		Με	Αλ	Κ		0 έως 5 m 0 έως 10 m/s	Εκτίμηση αριθμού απωλειών ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα Κατρίνα	Ολλανδία

\*όταν δεν υπάρχει πληροφορία, το αντίστοιχο κελί παραμένει κενό

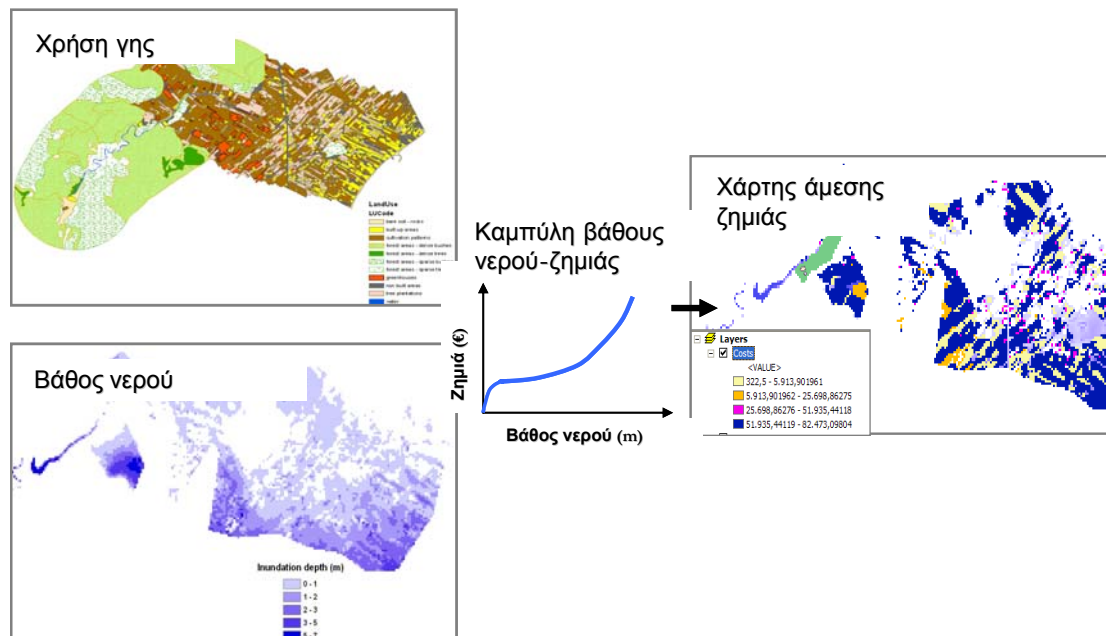
<p>1. Ο = οικονομική ζημιά</p> <p>Φ = φυσική ζημιά</p> <p>2. Σ = συνεχής</p> <p>Δ = διακριτή</p> <p>3. Κ = κατάκλυση</p> <p>Τ = ταχύτητα ροής</p> <p>Δ = δράση κυμάτων</p> <p>Λ = άλλο</p>	<p>4. Β = βάθος νερού</p> <p>Τ = ταχύτητα ροής</p> <p>Α = άλλο</p> <p>5. Σ = σικετός κτηρίου</p> <p>Π = περιεχόμενο</p> <p>Συ = σύνολο (σικετός και περιεχόμενο)</p> <p>Λ = άλλο</p>	<p>6. Μα= μακρο</p> <p>Με = μεσο</p> <p>Μι = μικρο</p> <p>7. Λ = απόλυτη τιμή</p> <p>Π = ποσοστό ζημιάς</p> <p>Κ =κατηγοριοποιημένη τιμή</p> <p>Λλ = άλλο</p>	<p>8. Κ = κατοικία</p> <p>Ε = επαγγελματική</p> <p>Β = βιομηχανική</p> <p>Αγρ = αγροτική</p> <p>Λ = άλλο</p> <p>9. Τ = τοιχοποιία από οπτοπλινθοδομή</p> <p>Ο = οπλισμένο σκυρόδεμα</p> <p>Λ = άλλο</p>
--	--	---	---



## 4.2 Μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς

Η μέθοδος καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς επικεντρώνεται στην άμεση επαφή με το νερό και κατά συνέπεια το βάθος νερού είναι εκείνο το μέγεθος πλημμύρας που αναλύεται με λεπτομέρεια [Merz et al. 2004, USACE 1996, Penning-Rowsell et al. 1992]. Η μέθοδος εκφράζει μια προσδιορισμένη σχέση μεταξύ βάθους νερού και οικονομικής εκτίμησης ζημιάς και αποτελεί την πιο διαδεδομένη προσέγγιση οικονομικής εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς για αστικές περιοχές [Smith 1996]. Στη βιβλιογραφία η καμπύλη (ή συνάρτηση) βάθους νερού - ζημιάς (depth-damage curve or function) διατυπώνεται επίσης με τον όρο «συνάρτηση απώλειας» (loss function) ή με τον γενικό όρο «συνάρτηση ζημιάς» (damage function). Στη μέθοδο το βάθος νερού αντιπροσωπεύει την προσομοιωμένη ή παρατηρημένη τιμή πλημμυρικής στάθμης και χρησιμοποιείται συνήθως η μέγιστη τιμή βάθους. Η οικονομική εκτίμηση ή αποτίμηση της άμεσης ζημιάς μπορεί να εκφραστεί είτε ως απόλυτη τιμή [π.χ. Penning-Rowsell and Chatterton 1977, Smith 1981] είτε ως ποσοστό της συνολικής αξίας του πληγέντος κτηρίου [π.χ. Dutta et al. 2003] είτε ως τιμή ενός δείκτη, όπως είναι ο ισοδύναμος αριθμός πλήρως κατεστραμμένων κατοικιών [Blong 2003]. Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις αποτίμησης ζημιάς οι καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς χαρακτηρίζονται ως απόλυτες και σχετικές αντίστοιχα.

Η εφαρμογή της μεθόδου απεικονίζεται στην Εικόνα 4-1 και περιλαμβάνει τρία βήματα: (α) προσομοίωση πλημμύρας και προσδιορισμός βάθους νερού, (β) συνδυασμός διαθέσιμης πληροφορίας για χρήσεις γης και αντίστοιχης μέγιστης αποτιμώμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς και (γ) εφαρμογή καμπυλών βάθους νερού - ζημιάς.

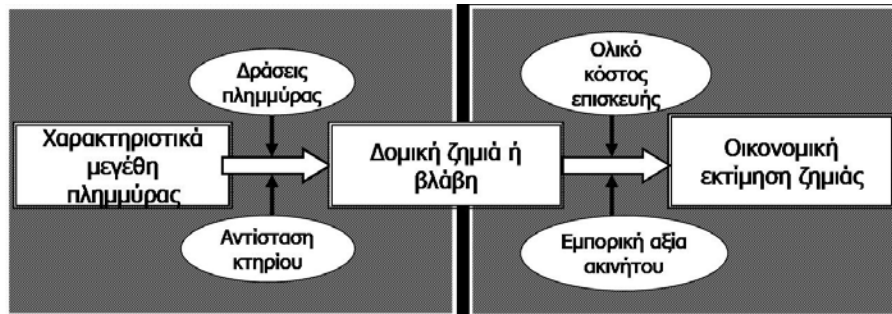


Εικόνα 4-1. Απεικόνιση της διαδικασίας εκτίμησης άμεσης ζημιάς λόγω πλημμυρικού γεγονότος [Tsakiris et al. 2007]

Η συγγραφέας [Pistrika 2009] περιγράφει την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής με στόχο την ανάπτυξη τοπικών εμπειρικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς και την εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον και σε αγροτική περιοχή. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση υλοποιείται εκτίμηση της αναμε-

νόμηνης ζημιάς υπό σενάρια πλημμύρας στην περιοχή μελέτης.

Ειδικά η εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον αποτελείται από τρία στάδια, από τα οποία το πρώτο αφορά την καταγραφή των μεγεθών της πλημμύρας, το δεύτερο την κατανόηση των φυσικών μηχανισμών πρόκλησης ζημιάς και το τρίτο στάδιο αφορά την αποτίμηση της φυσικής ζημιάς (βλέπε Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2. Στάδια ανάλυσης για την οικονομική εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

Η μέθοδος καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς επιχειρεί να συνδέσει το πρώτο με το τρίτο στάδιο χωρίς να μεσολαβήσει λεπτομερή διερεύνηση του δεύτερου σταδίου, δηλαδή η μέτρηση της φυσικής ζημιάς βάσει πλημμυρικών μεγεθών. Η μέθοδος προσεγγίζει μόνο επιφανειακά το δεύτερο στάδιο ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο ή την χρήση του πληγέντος κτηρίου για ανάπτυξη μιας καμπύλης τοπικού χαρακτήρα [π.χ. Smith 1981, Wind et al. 1999].

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί στα επόμενα εδάφια αναφέρεται στην ανάπτυξη της μεθόδου καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς, στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και σε προτάσεις / συστάσεις για την καταλληλότητα της εφαρμογής της.

#### 4.2.1 Περιγραφή της μεθόδου καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς

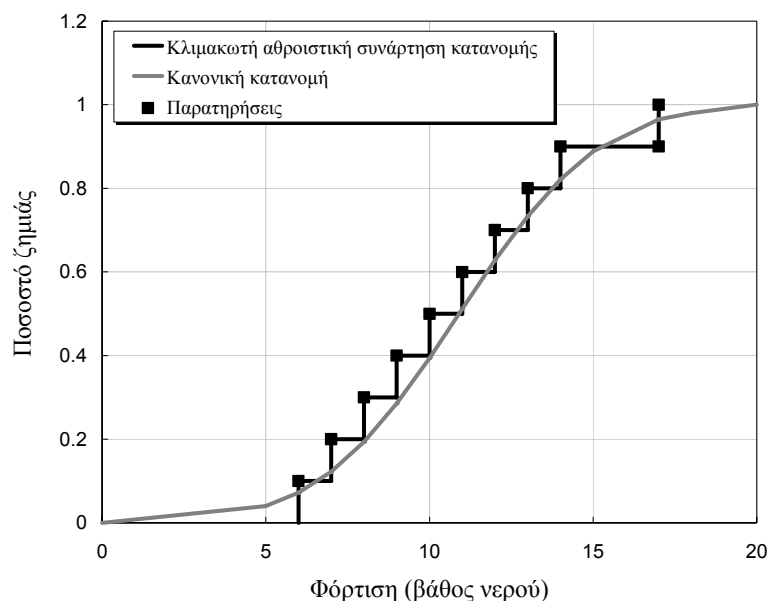
##### Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς μπορεί να μοντελοποιηθεί με την προσέγγιση φόρτισης - αντίστασης. Εάν υποθέσουμε ότι η έκθεση ενός κτηρίου σε ορισμένη ένταση ενός φυσικού φαινομένου αντιπροσωπεύει την φόρτιση του κτηρίου και η οριακή αντοχή του κτηρίου πριν αστοχήσει εκφράζεται από το μέγεθος  $c_R$ , τότε η συνάρτηση φόρτισης – αντίστασης εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_D(c) = P(c_R < c) \Rightarrow 0 \leq F_D(c) \leq 1 \quad (4.1)$$

Η πιθανότητα κατασκευαστικής αστοχίας ενός κτηρίου ως συνάρτηση της φόρτισης από πλημμύρα μπορεί να μοντελοποιηθεί με μία καμπύλη τρωτότητας του κτηρίου σε συγκεκριμένο τύπο φόρτισης. Θεωρητικά, η απόκριση ενός κτηρίου σε έκθεσή του στην επίδραση φυσικού φαινομένου υπό ελεγχόμενες συνθήκες οδηγεί στην ανάπτυξη μιας καμπύλης τρωτότητας για το κτήριο. Για παράδειγμα, ως υποθέσουμε το παρακάτω φανταστικό παράδειγμα. Έστω ότι η ένταση της επίδρασης ενός φυσικού φαινομένου, π.χ. μιας πλημμύρας, σταδιακά αυξάνεται και καταγράφεται η φυσική ζημιά στο κτήριο που προκαλείται ως αποτέλεσμα της μετρημένης έντασης του φυσικού φαινομένου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προκύψει μια αθροιστική συνάρτηση κατανομής των μετρήσεων φυσικής ζημιάς ως συνάρτηση της έντασης του φυσικού φαινομένου. Οι με-

τρήσεις φυσικής ζημιάς μπορεί να αδιαστατοποιηθούν με τη μετατροπή τους σε ποσοστά ζημιάς, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 7.2.2. Η σειρά από παρατηρημένες τιμές μέτρησης ζημιάς μπορεί να συνδεθεί με μια κλιμακωτή αθροιστική συνάρτηση κατανομής και εάν ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι μεγάλος, η κλιμακωτή συνάρτηση μπορεί εύκολα να προσεγγιστεί με μια συνεχή συνάρτηση κατανομής. Η Εικόνα 4-3 απεικονίζει ένα φανταστικό παράδειγμα για 10 παρατηρήσεις που αφορούν την έκθεση του κτηρίου σε ορισμένη ένταση μιας πλημμύρας. Κάθε παρατήρηση αντιστοιχεί περίπου σε ποσοστό ζημιάς ίσο με 10%. Επίσης, στην Εικόνα 4-3 φαίνονται η κλιμακωτή αθροιστική συνάρτηση κατανομής και η κανονική κατανομή ως συνεχής συνάρτηση κατανομής.



Εικόνα 4-3. Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας κτηρίου λόγω φόρτισης από πλημμύρα

Η συνεχή συνάρτηση κατανομής που μοντελοποιεί την προσέγγιση φόρτισης – αντίστασης αποτελεί την καμπύλη τρωτότητας του κτηρίου για το συγκεκριμένο τύπο φόρτισης. Η ανάπτυξη της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς προσεγγίζει εννοιολογικά την ανάπτυξη της καμπύλης τρωτότητας. Πρόκειται για την ειδική περίπτωση όπου η φόρτιση ενός κτηρίου λόγω της επίδρασης του φυσικού φαινομένου της πλημμύρας περιορίζεται στην εξέταση μόνον του βάθους νερού, δηλαδή γίνεται η υπόθεση ότι το βάθος νερού είναι το καθοριστικό πλημμυρικό μέγεθος πρόκλησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς.

Η καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς συνήθως εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής του ποσοστού ζημιάς από πλημμύρα. Η μέθοδος εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς με την εφαρμογή της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς δίνει τη δυνατότητα της ανάλυσης της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων της εξαιτίας της αβεβαιότητας της μοντελοποίησης. Ειδική αναφορά για την αβεβαιότητα της μεθόδου γίνεται στο εδάφιο 4.2.2.

### Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς βασίστηκε στη μέθοδο Duisier και στη συνθετική μέθοδο [Roos 2003]. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Σύμφωνα με τον Roos (2003), η μέθοδος Duisier χρησιμοποιεί πραγματικά στοιχεία ζημιάς από ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα, ενώ η συνθετική μέθοδος χρησιμοποιεί συνθετικά στοιχεία ζημιάς, τα οποία έχουν

βαθμονομηθεί από κάποια μελέτη εφαρμογής.

Αρχικά, η ανάπτυξη της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς υλοποιήθηκε με την χρήση πραγματικών στοιχείων πλημμυρικής ζημιάς από ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα (μέθοδος Duisier). Ωστόσο, μπορεί επαρκή ιστορικά στοιχεία ζημιάς να μην είναι πάντα διαθέσιμα για την ανάπτυξη τοπικής καμπύλης σε όλα τα παρατηρημένα βάρη πλημμυρικής στάθμης της πληγείσας περιοχής. Επομένως, επιτόπιες έρευνες καταγραφής της πλημμυρικής ζημιάς θα πρέπει να διεξάγονται όπου είναι δυνατό και να συσχετίζονται με τα ιστορικά στοιχεία. Αυτό είναι απαραίτητο εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας στις συνθήκες πλημμύρας που μπορεί να επικρατήσουν σε μια πληγείσα περιοχή. Η άμεση ζημιά που προκαλείται από ρέματα με μικρή κλίση πυθμένα και με αργή κίνηση του νερού είναι διαφορετική από τη ζημιά που προκαλείται από βροχοπτώσεις ταχείας απόκρισης σε χείμαρρους που μεταφέρουν φερτά υλικά. Επίσης, όταν η διάρκεια πλημμύρας είναι περίπου μία ώρα, κατασκευαστικά στοιχεία, όπως είναι τα ξύλινα δάπεδα και οι γυφτοσανίδες μπορεί να μην επηρεαστούν από την πλημμύρα.

Αυτή η προσέγγιση ανάπτυξης καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς αμέσως μετά από ένα πλημμυρικό γεγονός οδηγεί στην εκτίμηση της πραγματικής πλημμυρικής ζημιάς. Παραδείγματα ανάπτυξης καμπυλών βασισμένων σε δεδομένα πραγματικής ζημιάς αποτελούν οι καμπύλες που παρήχθησαν από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ στη δεκαετία του '60 και οι καμπύλες για πληγείσες κατοικίες που παρήχθησαν από το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας τη δεκαετία του '80 [Smith 1981, 1994]. Η μέθοδος όμως παρουσιάζει βασικά μειονεκτήματα. Στην πράξη η απαιτούμενη επιτόπια έρευνα λεπτομερούς επιμέτρησης και καταγραφής της πλημμυρικής ζημιάς μετά από ένα σημαντικό γεγονός πλημμύρας είναι σπάνια. Επίσης, η αποτίμηση των μετρήσεων της φυσικής πλημμυρικής ζημιάς δεν ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες και τις περισσότερες φορές η οικονομική εκτίμηση της ζημιάς βασίζεται είτε στην ανάλυση των κρατικών αποζημιώσεων/επιχορηγήσεων είτε στην ασφαλιστική κάλυψη έναντι πλημμύρας είτε ακόμη και σε αδρομερείς οικονομικές εκτιμήσεις δημοσιογραφικού τύπου [Smith 1994]. Ακόμη, όταν μία καμπύλη βάθους νερού - ζημιάς που αναπτύχθηκε τοπικά για συγκεκριμένη πληγείσα περιοχή, εφαρμοστεί σε άλλη περιοχή με παρόμοιο πλημμυρικό καθεστώς μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα εξαιτίας: (α) των πιθανών διαφορών στους χρόνους προειδοποίησης και (β) των διαφορών στους τύπους των κτηρίων και τα υλικά κατασκευής. Η εφαρμογή της καμπύλης ακόμη και στην ίδια περιοχή για την εκτίμηση ζημιάς από πλημμύρα συγκρίσιμης έντασης, μπορεί να οδηγήσει πάλι σε διαφορετικές εκτιμήσεις πλημμυρικής ζημιάς. Ένας συνηθισμένος λόγος που διαφοροποιεί το αποτέλεσμα είναι η πείρα στην αντιμετώπιση ενός πλημμυρικού γεγονότος από την πλευρά της υπό απειλή κοινότητας. Τέλος, η επέκταση της καμπύλης για την πρόγνωση της πλημμυρικής ζημιάς προσθέτει αβεβαιότητα στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

Ο White (1964) ήταν ο πρώτος που πρότεινε μια νέα μεθοδολογία εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς με τη χρήση της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς, την οποία ονόμασε «συνθετική μεθοδολογία». Οι συνθετικές καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς δεν βασίζονται στην πληροφορία που απορρέει από ένα ιστορικό πλημμυρικό γεγονός. Βασίζονται σε μια υποθετική ανάλυση, η οποία παράγει καμπύλες για κάθε χρήση γης ξεχωριστά. Επομένως, η συνθετική μέθοδος προϋποθέτει την κατηγοριοποίηση των δεδομένων ζημιάς, η οποία στην περίπτωση κτηρίων γίνεται συνήθως με βάση τον τύπο και την χρήση κτηρίου. Η συνθετική μέθοδος ανάπτυξης μιας καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς οδηγεί στην εκτίμηση της δυναμικής ζημιάς. Η ανάπτυξη των συνθετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς βασίζεται στις υφιστάμενες βάσεις δεδομένων και σε έρευνες από εξειδικευμένους αναλυτές – εκτιμητές αξίας ακινήτων.

Η προσέγγιση ανάπτυξης συνθετικών καμπυλών από τους Penning-Rowell και Chatterton το 1977 βασίστηκε σε υπάρχουσες βάσεις δεδομένων στην Μ. Βρετανία και θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές παγκόσμιες αναφορές για αυτό το πεδίο έρευνας. Το «Εγχειρίδιο τεχνικών εκτίμησης ή Μπλε εγχειρίδιο» [Pen-

ning-Rowse and Chatterton 1977] περιλαμβάνει λεπτομερείς, συνθετικές καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς για κατοικίες και εμπορικά καταστήματα στην Μ. Βρετανία. Τα στοιχεία αυτά επαναπροσδιορίστηκαν και είναι διαθέσιμα στην δημοσίευση του Parker et al. (1987). Τελικά αναπτύχθηκαν 168 καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς για 21 τύπους κτηρίων, για τέσσερις κοινωνικές τάξεις κατοίκων και για δύο κλάσεις διάρκειας πλημμύρας (λιγότερο από 12 ώρες και περισσότερο από 12 ώρες) λαμβάνοντας υπόψη και την παλαιότητα των κτηρίων. Σήμερα, θεωρείται απίθανο να επαναληφθεί σε άλλες χώρες η σύνθεση συγκρίσιμων βάσεων δεδομένων τέτοιας εμβάθυνσης και λεπτομέρειας λόγω έλλειψης στατιστικών στοιχείων της ίδιας φύσεως. Το εγχειρίδιο αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς για την εκτίμηση δυνητικής πλημμυρικής ζημιάς στην Μ. Βρετανία και παρέχει τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου σε υπολογιστικά προγράμματα αξιολόγησης αντιπλημμυρικών μέτρων.

Η εναλλακτική προσέγγιση ανάπτυξης συνθετικών καμπυλών βάθους νερού - ζημιάς είναι η διεξαγωγή έρευνας πεδίου σε διαφορετικούς τύπους κτηρίων στην εν δυνάμει πληγείσα περιοχή. Κατά την έρευνα πεδίου επιλέγεται ένας αριθμός κτηρίων (δείγμα) για ένα προκαθορισμένο τύπο κτηρίου και ο ερευνητής (ιδανικά ένας εξειδικευμένος εκτιμητής αξίας ακινήτων) αποτιμά την εμπορική αξία του εκάστοτε κτηρίου βάσει του τύπου, της ποιότητας και του βαθμού φθοράς του κτηρίου. Η αποτίμηση της φυσικής ζημιάς από πλημμύρα στο κτιριακό περιβάλλον λαμβάνει υπόψη την υπάρχουσα πειραματική πληροφορία σχετικά με επίδραση της πλημμύρας στα υλικά κατασκευής [Smith 1994, Becker 2008]. Στη συνέχεια, για κάθε σύνολο κτηρίων ίδιου τύπου υπολογίζεται η μέση τιμή της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς και έτσι προκύπτουν σταδιακά οι συνθετικές καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς για συγκεκριμένους τύπους κτηρίων. Οι Grigg και Helweg (1975) διαπίστωσαν στην έρευνά τους ότι «κατοικίες ενός τύπου αντιπροσωπεύονται από παρόμοιες καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς ανεξάρτητα από την πραγματική τους αξία». Επίσης, οι ίδιοι έδειξαν ότι η σχετική ομοιομορφία μεταξύ κτηρίων κατοικίας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα συναρτήσεις τοπικού χαρακτήρα μεταξύ αξιών κατοικίας, βάθους νερού και άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Στην περίπτωση όμως, κτηρίων εμπορικής και βιομηχανικής χρήσης, η διαφοροποίηση στην κατασκευή είναι μεγάλη και κατά συνέπεια απαιτείται εκτεταμένη έρευνα τοπικού χαρακτήρα για την ανάπτυξη τέτοιων καμπυλών.

Η πρώτη σημαντική εφαρμογή συνθετικών καμπυλών βάθους νερού - ζημιάς σε κτήρια έλαβε χώρα στο πλαίσιο της νομοθετικής πράξης για την Εθνική Ασφάλιση έναντι Πλημμύρας στις ΗΠΑ το 1968. Σύμφωνα με αυτή, η κυβέρνηση των ΗΠΑ επιδοτεί την ασφάλιση έναντι πλημμύρας για κατοικίες που ανήκουν σε ζώνες πλημμυρικού κινδύνου. Οι κατοικίες διαχωρίστηκαν σε κατηγορίες ασφάλισης και για καθμία κατηγορία αναπτύχθηκαν ξεχωριστά συνθετικές καμπύλες βάθους νερού - ζημιάς, ανάλογα με το μέγεθος, τον τύπο κτηρίου (υλικό κατασκευής, αριθμός ορόφων, με ή χωρίς υπόγειο), την οικοσκευή κτλ. Συνεπώς, οι καμπύλες που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ για την εκτίμηση συνολικής πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια, συμπεριλαμβάνουν το περιβάλλον και το περιεχόμενο του κτηρίου. Παραδείγματα των καμπυλών αυτών περιλαμβάνονται σε δημοσιευμένες εκδόσεις του Υπουργείου Στέγασης και Αστικής Ανάπτυξης των ΗΠΑ. Ωστόσο, οι καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν τότε, αποτίμησαν την πλημμυρική ζημιά με βάση μόνον την εμπορική αξία της κατοικίας. Ο τρόπος αυτός αποτίμησης θεωρείται ξεπερασμένος σήμερα, εξαιτίας της αδύναμης σχέσης μεταξύ της εμπορικής αξίας μιας κατοικίας και της τρωτότητας της κατοικίας αυτής έναντι πλημμύρας. Με άλλα λόγια, η φυσική ζημιά λόγω πλημμύρας αφορά μόνον το περιβάλλον και το περιεχόμενο ενός κτηρίου, ενώ η εμπορική αξία ενός κτηρίου περιλαμβάνει και την αξία του οικοπέδου του κτηρίου, η οποία θεωρείται εξωγενής παράγοντας στη διαδικασία αποτίμησης της ζημιάς. Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτές οι συνθετικές καμπύλες προέκυψαν από γενικευμένη θεωρητική ανάλυση σε περιφερειακό επίπεδο. Σήμερα χρησιμοποιούνται με τη μορφή γενικών κατευθυντήριων οδηγιών και θεωρείται αξιόπιστη η εφαρμογή τους σε όλες τις κοινότητες που ανήκουν στα διοικητικά όρια της εκάστοτε περιφέρειας.

Η επιστημονική εργασία του Smith et al. (1981) ήταν η πρώτη που σύγκρινε την πραγματική πλημμυρική

ζημιά σε κτήρια που προκλήθηκε από ένα σημαντικό πλημμυρικό γεγονός, με τη δυνητική πλημμυρική ζημιά που εκτιμήθηκε με τη συνθετική μέθοδο μέσω ερωτηματολογίου και έρευνας πεδίου από εξειδικευμένους αναλυτές. Η περιοχή μελέτης ήταν μια επανειλημμένα πλημμυρόπληκτη αστική περιοχή, η πόλη του Λίσμορ (Lismore) της Νέας Νότιας Ουαλίας στην Αυστραλία, η οποία διέθετε σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης. Το δείγμα κτηρίων περιλάμβανε 140 κατοικίες, 212 εμπορικά καταστήματα και 26 βιομηχανίες. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης ήταν ότι η πραγματική ζημιά προέκυψε το 52.4% της δυνητικής ζημιάς για τις κατοικίες, το 23.5% για τα εμπορικά καταστήματα και το 6% για τις βιομηχανίες. Συνεπώς από την έρευνα αυτή, διαπιστώθηκε η σπουδαιότητα του παράγοντα της πείρας της κοινότητας και του συστήματος έγκαιρης ειδοποίησης στη μείωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς με την χρήση της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς αρχικά αναπτύχθηκε από Αμερικανούς ερευνητές [White 1964, Kates, 1965] και αργότερα υιοθετήθηκε από Βρετανούς και Αυστραλούς ερευνητές [Parker et al. 1987, Penning-Rowsell et al. 1977]. Παρόλο που σήμερα η γενική έννοια της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση της πλημμυρικής απώλειας σε πολλές χώρες, υπάρχουν ακόμη μεγάλες διαφοροποιήσεις στις υφιστάμενες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς και μόνον ελάχιστες χώρες έχουν προχωρήσει σε τυποποίηση της μεθοδολογίας αυτής [Penning-Rowsell et al. 1987, Tang et al. 1992]. Μερικές χώρες, όπως είναι η Μ. Βρετανία και η Αυστραλία, έχουν καθιερώσει λεπτομερείς μεθοδολογίες για την εκτίμηση αποτιμώμενων απωλειών [Penning-Rowsell and Chatterton 1977, Smith 1981, UNSW 1981]. Ωστόσο, στην περίπτωση των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας, η λεπτομερής μεθοδολογία για την εκτίμηση πλημμυρικής ζημιάς περιορίζεται μόνον για ζημιά σε αστική περιοχή [USACE 1988, MOC 1996]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι χώρες έχουν υιοθετήσει παρόμοια προσέγγιση στην εκτίμηση ζημιάς. Επιπλέον, σημειώνεται ότι τυποποιημένες μεθοδολογίες με ισχύ σε όλη την επικράτεια της χώρας είναι διαθέσιμες μόνο στην Ιαπωνία και στη Μ. Βρετανία [Parker et al. 1987, Penning-Rowsell et al. 1992, MOC 1996], ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη τυποποιημένη μεθοδολογία βρίσκεται σε διαδικασία ανάπτυξης. Παρόλα αυτά, τόσο στην Αυστραλία όσο και σε άλλες χώρες, οι μεθοδολογίες εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς με τη χρήση καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς εξακολουθούν να διαφέρουν σημαντικά από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με την ελάχιστη περίπτωση.

#### 4.2.2 Ακρίβεια αποτελεσμάτων

Εξ ορισμού, η καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς θεωρεί το βάθος νερού ως το καθοριστικό μέγεθος πρόκλησης της πλημμυρικής ζημιάς. Η πλημμυρική ζημιά όμως, επηρεάζεται και από άλλα μεγέθη, όπως είναι η ταχύτητα ροής, η διάρκεια πλημμύρας, η ρύπανση, η στερεοπαροχή, ο χρόνος συρροής, η πληροφορία με την έγκαιρη ειδοποίηση πλημμύρας, τα κατασκευαστικά στοιχεία (ύψος, τρόπος κατασκευής κτλ.) και η πείρα σε πλημμυρικά γεγονότα [Smith 1994, USACE 1996, Kelman and Spence 2004, Merz et al. 2004]. Με εξαίρεση τα εννοιολογικά μοντέλα, οι παραπάνω παράγοντες σπάνια περιλαμβάνονται σε μοντέλα εκτίμησης της πλημμυρικής απώλειας. Επιπρόσθετα, οι εκτιμήσεις της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς τείνουν να μην περιλαμβάνουν την κατανόηση των φυσικών μηχανισμών αστοχίας των πληγέντων κτηρίων. Με άλλα λόγια, η πλειοψηφία των υφιστάμενων μοντέλων συνδέει την εκτίμηση πλημμυρικής ζημιάς μόνο με τις συνθήκες πλημμύρας χωρίς περαιτέρω ανάλυση των αιτιών πρόκλησης της ζημιάς. Έτσι, υπάρχει περιορισμένη γνώση σχετικά με τα φυσικά αίτια πρόκλησης της πλημμυρικής ζημιάς, όταν η ζημιά μπορεί να είναι αποτέλεσμα μεταφοράς ενέργειας, δυνάμεων ή πιέσεων που οδηγούν σε διάφορες επιδράσεις στα κτήρια, όπως είναι η αστοχία τοίχων, η θραύση υαλοπινάκων, η κατάρρευση στέγης ή υποσκαφή θεμελίων [Kelman and Spence 2004].

Γενικά, στα διαγράμματα διασποράς του βάθους νερού έναντι απόλυτων τιμών πλημμυρικής ζημιάς έχει παρατηρηθεί ότι το βάθος νερού εξηγεί ένα μικρό μόνον μέρος της μεταβλητότητας των στοιχείων πλημμυρικής ζημιάς. Συνήθως, οι απόλυτες καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην εξήγηση της διασποράς των στοιχείων ζημιάς, ενώ οι σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς θεωρούνται πιο κατάλληλες, διότι είναι τουλάχιστον ανεξάρτητες από τις απόλυτες τιμές του περιβλήματος και του περιεχομένου των κτηρίων. Ωστόσο, ακόμη και στην περίπτωση των σχετικών καμπυλών απαιτούνται τις περισσότερες φορές, ειδικές μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων ζημιάς, όπως είναι το φιλτράρισμα και η εξομάλυνση. Το συμπέρασμα αυτό έχει διαπιστωθεί επανειλημμένα σε πρόσφατες και παλιότερες επιστημονικές εργασίες [Smith 1994, Penning-Rowsell et al. 1992, USACE 1996, Merz et al. 2004, Pistrika and Jonkman 2009], οι οποίες έχουν αποδείξει ότι οι καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς μπορεί να έχουν μεγάλη αβεβαιότητα στα αποτελέσματά τους και τονίζουν τη σημασία που έχουν και άλλοι παράγοντες στην πρόκληση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς, εκτός από το βάθος νερού και τη χρήση κτηρίου.

Σύμφωνα με τους Merz et al. (2004), η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην παραγωγή της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς γίνεται πιο πολύπλοκη, όταν η ανάπτυξη της καμπύλης προϋποθέτει εξομάλυνση πρωτογενών δεδομένων. Οι ίδιοι συμπέραναν ότι η αβεβαιότητα στην εκτίμηση οικονομικής ζημιάς με τη χρήση της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς μειώνεται όσο ο αριθμός των πλημμυρόπληκτων κτηρίων αυξάνει, με την προϋπόθεση ότι το δείγμα προέρχεται από κατακλυσμένη περιοχή χωρίς μεγάλη διασπορά στις μέγιστες τιμές της πλημμυρικής στάθμης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε και από την ερευνητική εργασία των Pistrika και Jonkman (2009) με την εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου «bootstrapping» που περιγράφεται στο κεφάλαιο 12. Όλοι οι παραπάνω ερευνητές διαπίστωσαν σε διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης, ότι χρησιμοποιώντας μέσες τιμές ζημιάς και βάθους νερού που αντιστοιχούν σε σύνολα κτηρίων αντί μεμονωμένων κτηρίων, η αβεβαιότητα της εκτίμησης της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς μειώνεται σημαντικά, αρκεί τα σύνολα κτηρίων να είναι της ίδιας χρήσεως και να εμφανίζουν παρόμοιες παρατηρήσεις βάθους νερού. Εξαιτίας των διαφορετικών τιμών διασποράς στα στοιχεία ζημιάς για κάθε σύνολο, η μείωση της αβεβαιότητας διαφέρει από σύνολο σε σύνολο κτηρίων. Για παράδειγμα, οι Merz et al. (2004) διαπιστώνουν ότι η αβεβαιότητα της οικονομικής εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς για μια βιομηχανική περιοχή είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μιας περιοχής κατοικίας, με δεδομένο ότι ο αριθμός των πληγέντων κτιρίων είναι ίδιος και στις δυο περιοχές. Συνεπώς, η εφαρμογή των καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς σε μεμονωμένα κτήρια αναμένεται να μην οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς και η σχέση μεταξύ του βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς βελτιώνεται, εάν η περιοχή εφαρμογής διευρυνθεί και περιλαμβάνει σύνολα κτηρίων. Οι διαπιστώσεις αυτές έρχονται σε συμφωνία και επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των Grigg και Helweg.

Οι τεχνικές εκθέσεις του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας [National Research Council 2000] και του Σώματος Μηχανικών Στρατού [USACE 1996] αποτελούν πρακτικούς οδηγούς για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στον υπολογισμό της πλημμυρικής ζημιάς στις ΗΠΑ. Οι εκθέσεις αυτές περιγράφουν την ανάλυση της διακινδύνευσης και της αβεβαιότητας σε μελέτες μείωσης πλημμυρικής ζημιάς, καθώς λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες στην πιθανοτική κατανομή της παροχής, στην καμπύλη στάθμης – παροχής και στην καμπύλη βάθους νερού (στάθμη) – ζημιάς με όρους κανονικής, λογάριθμο-κανονικής και τριγωνικής κατανομής. Τέλος, οι Egorova et al. (2008) προσδιορίζουν την κατανομή της αβεβαιότητας στην πλημμυρική ζημιά αναπτύσσοντας μια μέθοδο που λαμβάνει υπόψη ξεχωριστά την αβεβαιότητα για το προσδιορισμό της μέγιστης ζημιάς ανά κατηγορία πληγέντων στοιχείων και για τη μοντελοποίηση της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Η αβεβαιότητα της μέγιστης ζημιάς ανά κατηγορία πληγέντων στοιχείων εκτιμήθηκε ότι περιγράφεται από τριγωνική κατανομή και η αβεβαιότητα της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς εκτιμήθηκε ότι περιγράφεται από κατανομή βήτα. Οι εκτιμήσεις των κατανομών αβεβαιότητας είναι κατά κύριο λόγο εμπειρικές, ωστόσο επιτρέπουν την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερα-

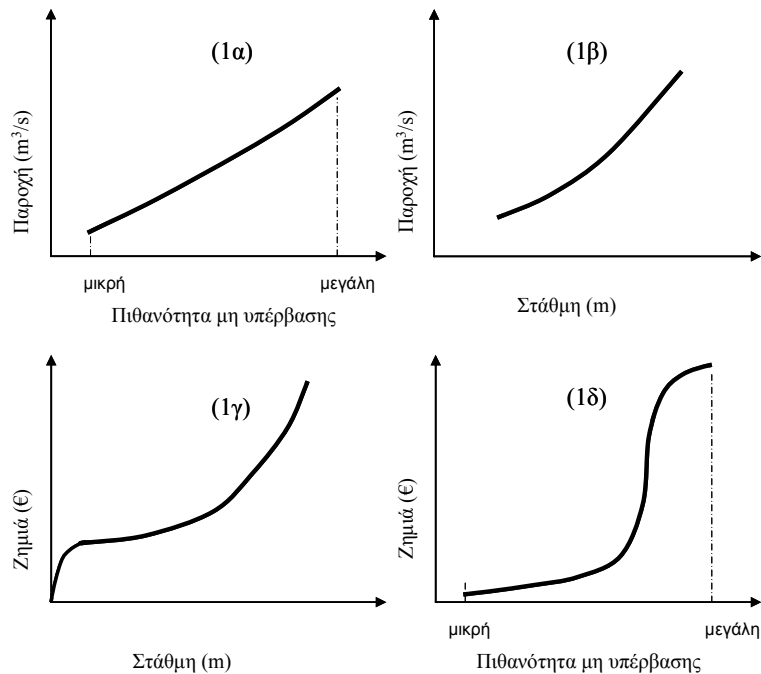
σμάτων σχετικά με τη συμβολή της ελάχιστης κατηγορίας πληγέντων στοιχείων στην συνολική αβεβαιότητα της εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς.

### 4.3 Καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς

Το υποκεφάλαιο αυτό αναφέρεται σε μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς για την εκτίμηση δυναμικής πλημμυρικής ζημιάς, που είναι η καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς (ή συχνότητας εμφάνισης πλημμύρας). Η καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης (ή μη υπέρβασης) πλημμύρας – ζημιάς αποσκοπεί στην εκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας πλημμυρικής ζημιάς. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η αναμενόμενη ετήσια ζημιά για την υφιστάμενη κατάσταση μιας πλημμυρόπληκτης περιοχής μελέτης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο σύγκρισης, αξιολόγησης και ιεράρχησης τεχνικών έργων για την αντιμετώπιση των πλημμυρικών γεγονότων της περιοχής. Για παράδειγμα, η οικονομική βιωσιμότητα ενός αντιπλημμυρικού έργου μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη μείωση της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς από πλημμύρα που έχει ως αποτέλεσμα η λειτουργία του έργου [Arnell 1986, Wurbs 1983]. Η ανάλυση κόστους – οφέλους για την αξιολόγηση τεχνικών έργων ξεφεύγει από τους στόχους αυτού του κεφαλαίου και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, δεν αναφέρεται περαιτέρω στο υποκεφάλαιο αυτό.

Οι Grigg και Helweg (1975) αναφέρουν για πρώτη φορά την καμπύλη συχνότητας εμφάνισης πλημμύρας - ζημιάς για την εκτίμηση της μέσης αναμενόμενης ετήσιας πλημμυρικής ζημιάς και προσδιορίζουν τα απαιτούμενα στάδια υπολογισμού. Τα στάδια αυτά περιγράφονται πλήρως στην τεχνική έκθεση που δημοσίευσε το 1996 το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ [USACE 1996] και είναι τα παρακάτω: (α) επιλογή εύρους πιθανοτήτων υπέρβασης πλημμύρας ή αλλιώς σεναρίων πλημμύρας, (β) υπολογισμός αιχμών πλημμύρας που σχετίζονται με κάθε πιθανότητα μη υπέρβασης πλημμύρας (Εικόνα 1α), (γ) υπολογισμός μέγιστου βάθους ροής με την κατά παραδοχή μονοσήμαντη καμπύλη στάθμης – παροχής (Εικόνα 1β), (δ) υπολογισμός μέσω της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς, η οποία για περιοχές όπου η ταχύτητα ροής και η διάρκεια της πλημμύρας δεν είναι σημαντικές, εξαρτάται μόνο από το βάθος ροής (Εικόνα 1γ) και (ε) εξαγωγή της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς (Εικόνα 1δ).





Εικόνα 4-4. Υπολογιστικά στάδια για την ανάπτυξη καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς [βασίζεται στη δημοσίευση USACE 1996]

Με προσδιορισμένο το εύρος της συχνότητας εμφάνισης όλων των πιθανών σεναρίων πλημμύρας, το εμβαδόν υπό την καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας-ζημιάς ισούται με την ολική αναμενόμενη ετήσια ζημιά. Η καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας-ζημιάς υπολογίζεται με βάση την αναμενόμενη πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας, ενώ οι υπόλοιποι παράμετροι εκτιμώνται σύμφωνα με τη διαθέσιμη πληροφορία και τα θεωρητικά μοντέλα. Η ανάπτυξη της καμπύλης αυτής βασίζεται στην απλοποιητική υπόθεση ότι η περίοδος επαναφοράς της ζημιάς είναι ίδια με αυτή του πλημμυρικού γεγονότος που προκάλεσε τη ζημιά. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας-ζημιάς εξαρτάται από την ποιότητα των οικονομικών, υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξή της [Goldman 1997]. Οι Tsakiris et al. (2009) θίγουν κρίσιμα τεχνικά ζητήματα που προκύπτουν στην πράξη κατά την εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης του USACE για την ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς στο πλαίσιο εφαρμογής της νέας ευρωπαϊκής Οδηγίας για τις πλημμύρες [European Council 2007] (βλέπε σχετικό εδάφιο 3.4.1).

Πιο πρόσφατα το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ ενσωμάτωσε την έννοια της αβεβαιότητας στην ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς και κατά συνέπεια στον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς. Η τεχνική έκθεση του Σώματος Μηχανικών Στρατού [USACE 1996] παρέχει αναλυτικές οδηγίες για την εκτίμηση της κατανομής της αβεβαιότητας για κάθε παράμετρο της υπολογιστικής διαδικασίας στην Εικόνα 4-4. Ωστόσο, μια σειρά από δημοσιεύσεις από τους Goldman (1997), Stendinger (1997) και Beard (1997) αποδεικνύει, ότι η χρησιμοποίηση της αναμενόμενης πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας για την ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς είναι θεμιτή. Με άλλα λόγια η εκτιμώμενη τιμή μίας παραμέτρου προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική τιμή της παραμέτρου, αρκεί ο αριθμός του δείγματος που λήφθηκε υπόψη στην ανάλυση να είναι μεγάλος.

Επίσης, εάν εξαιρέσει κανείς το σύνθετο πρόβλημα της βαθμονόμησης ενός θεωρητικού μοντέλου, οι διαδικασίες που περιγράφουν τη διόδευση πλημμύρας και τη σχέση μεταξύ βαθών νερού και πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας θεωρούνται αξιόπιστες διαδικασίες. Γενικά, στις διαδικασίες αυτές, ο βαθμός αβε-

βαιότητας προέρχεται από την ποιότητα και ποσότητα των δεδομένων, και επομένως εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του δείγματος [Arnell 1989]. Έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, η αβεβαιότητα λόγω έλλειψης υδρολογικών δεδομένων δεν είναι τόσο σημαντική όσο η αβεβαιότητα που προέρχεται από την ποσοτικοποίηση των ζημιών από πλημμύρα, δηλαδή από την οικονομική ανάλυση [Motayed & Krishnamurthy 1979]. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διεξάγεται λεπτομερής έρευνα πεδίου στην περιοχή μελέτης, ώστε να προκύπτουν τοπικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς που αποτυπώνουν την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης.

#### **4.4 Μέθοδοι ποιοτικής εκτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον**

Η ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον περιλαμβάνει το στάδιο της εκτίμησης της φυσικής ζημιάς που προκαλείται στο περιβάλλον ενός κτηρίου από την επίδραση μιας πλημμύρας και το στάδιο της αποτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς (βλέπε Εικόνα 4-2). Το υποκεφάλαιο αυτό αναφέρεται στο πρώτο στάδιο ανάλυσης ζημιάς και ειδικά στις μεθόδους εκτίμησης της φυσικής ζημιάς που μπορεί να προκληθεί σε ένα κτήριο λόγω της επίδρασης ενός πλημμυρικού γεγονότος. Επειδή οι μέθοδοι αυτές δεν καταλήγουν σε οικονομική εκτίμηση της ζημιάς, αναφέρονται στη διατριβή ως μέθοδοι ποιοτικής εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.

Απο τη βιβλιογραφική επισκόπηση διαπιστώθηκε ότι πέρα από την απλή περιγραφή των πλημμυρικών μεγεθών, υπάρχει περιορισμένη γνώση για τα φυσικά αίτια πρόκλησης πλημμυρικής ζημιάς. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές για την ανάλυση και την εκτίμηση της φυσικής ζημιάς από πλημμύρα σε κτήρια αναπτύχθηκαν αποσπασματικά στο διεθνή χώρο χωρίς ενιαίο τρόπο προσέγγισης και συνήθως ήταν το αποτέλεσμα μίας επείγουσας ανάγκης για καταβολή αποζημιώσεων σε πληγέντες. Άλλες μέθοδοι ακολουθούν την προσέγγιση της σύγκρισης μεταξύ φόρτισης από πλημμύρα και αντίστοιχης αντίστασης κτηρίου, άλλες διακρίνουν κλάσεις ζημιάς, οι οποίες περιγράφουν ποιοτικά την πλημμυρική ζημιά στην κατασκευή ενός κτηρίου με βάση χαρακτηριστικές ενδείξεις/παρατηρήσεις, και άλλες αποσκοπούν στην ανάπτυξη κριτηρίων ζημιάς βάσει πλημμυρικών μεγεθών με στόχο των χωρικό διαχωρισμό της κατακλυζόμενης περιοχής σε ζώνες ζημιάς.

Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά επιλεγμένες επιστημονικές εργασίες που καλύπτουν όλες τις παραπάνω μεθόδους ποιοτικής εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς, στις οποίες διακρίνεται κατά περίπτωση ο τύπος πλημμύρας που εξετάστηκε, η χωρική κλίμακα ανάλυσης και η μέθοδος εκτίμησης ζημιάς που εφαρμόστηκε.

Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις για την ανάλυση και εκτίμηση της φυσικής πλημμυρικής ζημιάς

Δημοσίευση	Τύπος πλημμύρας	Χωρική κλίμακα	Μέθοδος
Black (1975)	-	ανά κτήριο	φόρτιση-αντίσταση, κριτήριο ζημιάς
Sangrey et al. (1975)	υπερχείλιση ποταμού	ανά κτήριο	φόρτιση-αντίσταση
Clausen (1979)	θραύση φράγματος	ανά διαμέρισμα	κριτήριο ζημιάς
Mijala et al. (2001)	θραύση φράγματος (πειραματική διάταξη)	-	κριτήριο ζημιάς
Roos (2003)	θραύση αναχώματος	ανά κτήριο	φόρτιση-αντίσταση κριτήριο ζημιάς
Kelman (2003)	παλιρροιακό κύμα	ανά κτήριο	φόρτιση-αντίσταση
Maiwald and Schwarz (2008)	υπερχείλιση ποταμού Έλβα	ανά περιοχή, διαμέρισμα, κτήριο	κλάσεις ζημιάς
Becker (2008)	-	ανά κτήριο	φόρτιση-αντίσταση
Friedland (2009)	τσουνάμι και τυφώνες	ανά περιοχή και διαμέρισμα	κλάσεις ζημιάς

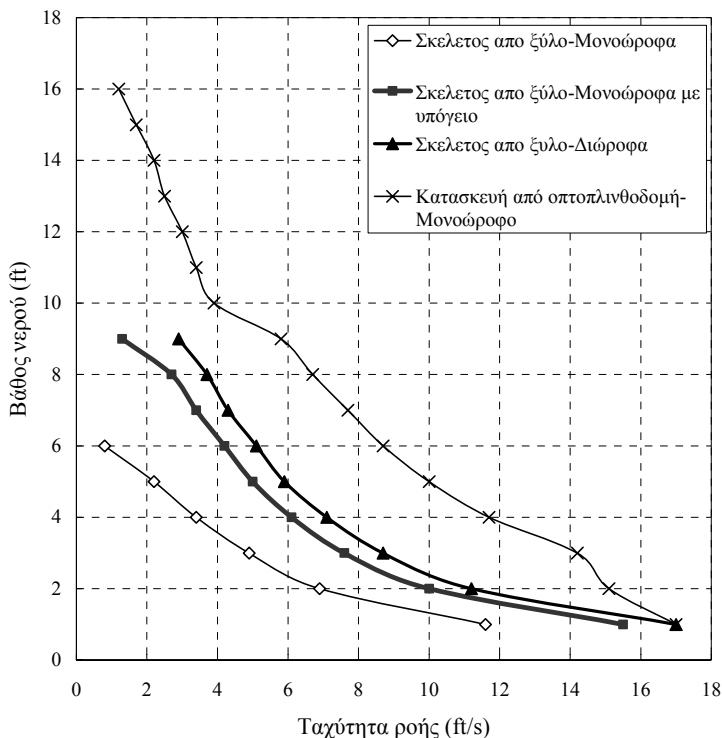
Στο εδάφιο που ακολουθεί περιγράφονται συνοπτικά με χρονολογική σειρά τα βασικά συμπεράσματα των παραπάνω επιλεγμένων επιστημονικών εργασιών.

#### 4.4.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η ερευνητική εργασία του Black (1975) «Αγροτικές κατοικίες θωρακισμένες έναντι πλημμύρας» αποτελεί μια από τις πρώτες προσπάθειες διερεύνησης της επίδρασης πλημμυρικών δυνάμεων σε τύπους κατοικίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κατασκευής. Ο Black εξέτασε και υπολόγισε αναλυτικά τη δύναμη άνωσης, την υδροστατική δύναμη και την υδροδυναμική δύναμη που μπορεί να ασκηθεί λόγω πλημμύρας στους ακόλουθους τέσσερις τύπους κατοικίας: κατασκευή από ξύλο σε (α) μονώροφη, (β) μονώροφη με υπόγειο, (γ) διώροφη κατοικία και (δ) κατασκευή από οπτοπλινθοδομή μονώροφη με υπόγειο. Στη συνέχεια εκτίμησε τις ελάχιστες τιμές βάθους νερού που απαιτούνται για να υπερνικήσει η δύναμη της άνωσης το μέσο βάρος της εκάστοτε κατασκευής σε ορισμένους τύπους κατοικίας. Επίσης, ο Black εκτίμησε τις οριακές τιμές βάθους νερού και ταχύτητας ροής που προκαλούν μετακίνηση της κατασκευής εξαιτίας της επίδρασης υδροδυναμικών δυνάμεων. Έτσι, η εργασία αυτή είχε ως αποτέλεσμα, το 1975, την πρωτοποριακή ανάπτυξη κριτηρίων ζημιάς από πλημμύρα βάσει πλημμυρικών μεγεθών για τέσσερις συγκεκριμένους τύπους κατοικίας, που απεικονίζεται στο γράφημα της Εικόνας 4-5. Οι καμπύλες στο γράφημα προσδιορίζουν τις οριακές τιμές βάθους νερού και ταχύτητας ροής που προκαλούν οριακή μετακίνηση ορισμένου τύπου κατοικίας λόγω πλημμύρας.

Διαπιστώθηκε ότι οι κατοικίες μπορεί να αστοχήσουν λόγω επίπλευσης όταν το βάθος νερού στο εξωτερικό της κατοικίας φτάσει τα  $\frac{3}{4}$  του συνολικού ύψους της κατοικίας. Στην περίπτωση που οι κατοικίες είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να αντέχουν φορτίο σχεδιασμού από άνεμο της τάξεως των 113 km/h, τότε θα υποστούν «μικρής έκτασης βλάβες λόγω πλημμύρας». Τέλος, διαπιστώθηκε ότι αυξημένη πιθανότητα πρόκλησης βλάβης σε κατοικίες υπάρχει λόγω αυξημένων υδροστατικών πιέσεων, όταν δεν εισχωρεί νερό στο εσω-

τερικό των κατοικιών.



Εικόνα 4-5. Κριτήριο πλημμυρικής ζημιάς σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους κατοικίας κατά Black (1975)

Την ίδια χρονιά, οι Sangrey et al. (1975) στην εργασία με τίτλο «Εκτίμηση επίδρασης πλημμύρας σε κατασκευές σε κατακλυσμένη περιοχή» χρησιμοποιούν τους θεωρητικούς υπολογισμούς του Black για τη δύναμη της άνωσης και εισάγουν μια αδιάστατη ανάλυση των κατακόρυφων και οριζόντιων δυνάμεων λόγω πλημμύρας σε κτήρια με ξύλινο σκελετό. Η οριζόντια υδροδυναμική δύναμη και η κατακόρυφη δύναμη της άνωσης κανονικοποιούνται με το βάρος και το ύψος του κτηρίου αντίστοιχα. Η αντίσταση του κτηρίου στις οριζόντιες δράσεις πλημμύρας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο μοντέλο τριβής για τη μοντελοποίηση της δύναμης τριβής μεταξύ κτηρίου και θεμελίωσης, χωρίς να ληφθούν υπόψη αγκυρώσεις στη θεμελίωση (μηχανισμός αστοχίας από ολίσθηση). Οι θεωρητικοί υπολογισμοί των αδιάστατων πλημμυρικών δράσεων συσχετίζονται με εμπειρικά δεδομένα άμεσης ζημιάς για τη βαθμονόμηση τους. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά στοιχεία ζημιάς που προκλήθηκαν σε 155 κτήρια λόγω της υπερχειλίσης του ποταμού Τσέμουκι (Chemung) το 1972 στις ΗΠΑ, εξαιτίας της τροπικής καταιγίδας Άγκνες (Agnes). Οι κατασκευές κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με την έκταση της πλημμυρικής ζημιάς σε «διασωθείσες» και «κατεστραμμένες». Τα αποτελέσματα της συσχέτισης έδειξαν μεγαλύτερη εξάρτηση της άμεσης ζημιάς από το βάθος νερού σε σχέση με την ταχύτητα ροής. Επίσης οι Sangrey et al. διαπίστωσαν, ότι το εμπειρικό κριτήριο ζημιάς που ανέπτυξαν απαιτεί μεγαλύτερες τιμές βάθους νερού και ταχύτητας ροής για να θεωρηθεί ένα κτήριο κατεστραμμένο σε σύγκριση με το κριτήριο ζημιάς κατά Black, δηλαδή είναι λιγότερο συντηρητικό.

Το Φιλανδικό Ινστιτούτο Περιβάλλοντος στην εκπόνηση του ερευνητικού έργου με τίτλο RESCDAM (Development of rescue actions based on dam-break flood analysis) από τους Mijala et al. (2001), χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τους Black (1975), Sangrey et al. (1975) και Clausen (1989) για την εφαρμογή του μεγέθους του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής σε τύπους φιλανδικής κατοικίας για την εκτίμηση της δυνητικής άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3. Κριτήριο ζημιάς κατά Mijala et al. (2001)

Υλικό κατασκευής κατοικίας	Μερική ζημιά	Ολική ζημιά
Εύλινος σκελετός χωρίς αγκυρώσεις στη θεμελίωση	$vd \geq 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$vd \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$
Εύλινος σκελετός με αγκυρώσεις στη θεμελίωση	$vd \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$vd \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$
Τοιχοποιία από σκυρόδεμα ή οπτοπλινθοδομή	$v \geq 2 \text{ m/s}$ και $vd \geq 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$v \geq 2 \text{ m/s}$ και $vd \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$

Η ερευνητική εργασία της Clausen (1989) που ακολουθεί χρονολογικά θα περιγραφεί χωριστά στο εδάφιο 4.4.2., λόγω της συνάφειας του αντικειμένου με την παρούσα διατριβή.

Η διατριβή του Kelman (2002) με τίτλο «Φυσική τρωτότητα λόγω πλημμύρας σε κατοικίες στην παραθαλάσσια ανατολική Αγγλία» επικεντρώθηκε στην επίδραση της διαφοράς σε υδροστατική πίεση μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου σε μια κατοικία και στην επίδραση της ταχύτητας ροής. Εκτεταμένες επιτόπιες έρευνες σε διάφορες περιοχές μελέτης προσδιόρισαν χαρακτηριστικά γνωρίσματα της φυσικής τρωτότητας κατοικιών λόγω πλημμύρας. Οι μηχανισμοί αστοχίας που αναλύθηκαν σε λεπτομέρεια είναι οι ακόλουθοι: (α) ο ρυθμός ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης στο εσωτερικό μιας κατοικίας, που προσδιορίζει τη διαφορά σε υδροστατική πίεση, (β) η αστοχία υαλοπίνακα με επικέντρωση σε μεγάλα ανοίγματα στις πόρτες και (γ) η αστοχία τοίχου με επικέντρωση σε τοίχους με μη οπλισμένη πλήρωση. Οι παρατηρήσεις και οι θεωρητικοί υπολογισμοί εφαρμόστηκαν για την ανάπτυξη ενός νέου τρόπου ποσοτικοποίησης της φυσικής τρωτότητας, τους διδιάστατους πίνακες τρωτότητας, όπου στον ένα άξονα εμφανίζεται η υψομετρική διαφορά σε βάθος νερού μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου ενός κτηρίου και στον άλλο άξονα η ταχύτητα ροής και στα κελιά του πίνακα φαίνεται η μέτρηση της ζημιάς. Οι πίνακες τρωτότητας αναπτύχθηκαν με στόχο τη μελλοντική εφαρμογή τους ως εργαλεία διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η επιστημονική έρευνα του Kelman (2002) αποτελεί μια αξιοσημείωτη προσπάθεια ποσοτικοποίησης της τρωτότητας μιας κατοικίας έναντι πλημμύρας, και έχει συνεισφέρει σημαντικά στη βελτίωση της κατανόησης των φυσικών μηχανισμών αστοχίας στοιχείων κτηρίου λόγω επίδρασης πλημμύρας.

Ο Roos (2003) ανέπτυξε ένα πιθανοτικό μοντέλο για την εκτίμηση κατάρρευσης κτηρίων, το οποίο λαμβάνει υπόψη δύο μηχανισμούς αστοχίας που μπορεί να οδηγήσουν σε μερική ή ολική κατάρρευση ενός κτηρίου. Αυτοί είναι (α) η διάβρωση της θεμελίωσης και (β) η αστοχία τοίχων. Το μοντέλο του Roos λαμβάνει υπόψη τη δράση υδροστατικών και υδροδυναμικών δυνάμεων, καθώς επίσης την επιβολή κυμάτων και φερτών υλικών. Επίσης, η αντίσταση διαφορετικών τύπων κτηρίων συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς του μοντέλου. Η εφαρμογή του μοντέλου σε περιοχή μελέτης στην Ολλανδία για την περίπτωση πλημμύρας λόγω αστοχίας αναχώματος είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κριτηρίων ζημιάς βάσει της ταχύτητας ροής και του βάθους νερού. Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής μοντέλου διαπιστώθηκε ότι η κατάρρευση τοίχου ως μηχανισμός αστοχίας προκαλεί τη μεγαλύτερη ζημιά σε πλημμυρόπληκτα κτήρια της περιοχής μελέτης, ενώ η δράση φερτών υλικών ως φόρτιση από πλημμύρα έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση της μεγαλύτερης πλημμυρικής ζημιάς.

Αξιοσημείωτη προσπάθεια διερεύνησης της συμβολής της αντίστασης ενός κτηρίου στο μέγεθος άμεσης ζημιάς που μπορεί να υποστεί ένα κτήριο λόγω πλημμύρας αποτελεί επίσης, η ανάλυση των Schwarz και Maiwald (2008). Οι ερευνητές αυτοί βασίστηκαν σε υφιστάμενη βάση δεδομένων πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια λόγω της υπερχειλίσης του ποταμού Έλβα το 2002 στη Σαξονία για να αναπτύξουν μια μέθοδο κατηγοριο-

ποίησης της ζημιάς σε κλάσεις, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί είτε ανά κτήριο (μικροκλίμακα) είτε σε σύνολα κτηρίων σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας και μακροκλίμακας. Οι παρατηρήσεις και οι ενδείξεις άμεσης ζημιάς σε ένα πλημμυρόπληκτο κτήριο ταξινομήθηκαν σε κλάσεις ποιοτικής περιγραφής με βάση τις οποίες προσδιορίστηκε μία κλίμακα βαθμονόμησης της πλημμυρικής ζημιάς. Η συσχέτιση των κλάσεων ζημιάς με τα πλημμυρικά μεγέθη, βάθος νερού και ειδική ενέργεια, υλοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη διαβαθμίσεις στη φυσική τρωτότητα ενός κτηρίου έναντι πλημμύρας, (Α – μέγιστος βαθμός τρωτότητας κτηρίου και Ε – ελάχιστος βαθμός τρωτότητας κτηρίου). Επιπλέον, διακρίθηκαν έξι διαφορετικοί τύποι κτηρίου ανάλογα με το υλικό κατασκευής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εφαρμόστηκαν σε πρόγραμμα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

Η έρευνα της Becker (2008) επικεντρώνει στην τρωτότητα μιας κατασκευής με ξύλινο σκελετό από την επίδραση ενός ραχδαίου και πολύ έντονου πλημμυρικού γεγονότος που χαρακτηρίζεται από μεγάλα βάθη ροής και υψηλές τιμές ταχύτητας ροής. Η ανάλυση του πολύπλοκου δομικού συστήματος μιας κατασκευής από ξύλο υλοποιήθηκε με μία απλοποιητική προσέγγιση, ενώ η επίδραση του συγκεκριμένου τύπου πλημμύρας περιορίστηκε στα πλημμυρικά μεγέθη του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η πρόβλεψη της φυσικής ζημιάς σε μια τυπική, καναδική, ξύλινη κατοικία, σε περίπτωση που πληγεί από ένα εξαιρετικό πλημμυρικό γεγονός τύπου τσουνάμι, δεν είναι απλή υπόθεση. Κατ' αρχήν δεν προέκυψε από την ανάλυση μία μονοσήμαντη σχέση μεταξύ του γινομένου του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής ( $dh$ ) και ορισμένου μηχανισμού αστοχίας ενός συγκεκριμένου τύπου κατασκευής. Αντί αυτού, προέκυψε ένας αριθμός περιπτώσεων μέγιστης και ελάχιστης φυσικής τρωτότητας, ο οποίος τόνισε τη σημασία μεμονωμένων στοιχείων κατασκευής στην συνολική αντίσταση μιας τυπικής ξύλινης κατοικίας. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι διαπερατά ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα) στην κατοικία παρεμποδίζουν μεν την εισβολή πλημμυρικού νερού στο εσωτερικό μιας κατοικίας, αλλά από την άλλη πλευρά την καθιστούν πιο ευάλωτη σε υδροστατικές δυνάμεις και δυνάμεις άνωσης, αφού η κατοικία είναι πιο ελαφριά, όταν δεν είναι πλημμυρισμένη στο εσωτερικό με νερό. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι μία κατοικία με έναν η περισσότερους ορόφους αντιστέκεται πιο σθεναρά στη δύναμη της άνωσης λόγω αυξημένου βάρους και επιπλέον προσφέρει τη δυνατότητα της κατακόρυφης διαφυγής των κατοίκων. Συνεπώς, η διαφορά της τρωτότητας μεταξύ ισόγειων και πολώροφων κατοικιών αποδείχθηκε μεγάλη. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι οι αγκυρώσεις του ισόγειου στη θεμελίωση αποτελούν ένα από τα πιο καθοριστικά στοιχεία μιας ξύλινης κατασκευής σε ό,τι αφορά τη θωράκισή της από πλημμύρα.

Η πιο πρόσφατη δημοσίευση με αντικείμενο την ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον είναι η διατριβή της Friedland (2009) με τίτλο «Ζημιά σε κατοικίες από παλιρροιακό κύμα λόγω τυφώνα: Προτεινόμενες μεθοδολογίες για την περιγραφή, αξιολόγηση και μοντελοποίηση της ζημιάς». Η Friedland διερεύνησε τη σύνθετη επίδραση πλημμύρας και ανέμου σε κατοικίες χρησιμοποιώντας την τεχνική της τηλεπισκόπησης ως μέθοδο ανάλυσης ζημιάς. Ένα από τα βασικά αποτελέσματα της διατριβής της είναι η προτεινόμενη κλίμακα ζημιάς σε κτήρια λόγω συνδυασμού πλημμύρας και ανέμου, η οποία χρησιμοποιεί επτά διακριτές κατηγορίες της σύνθετης ζημιάς από ένα φυσικό φαινόμενο, όπως είναι ο τυφώνας. Επίσης, βασικό αποτέλεσμα της έρευνας αυτής αποτελεί η ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου που συγκρίνει την υδροδυναμική επίδραση ενός παλιρροιακού κύματος με την αντίσταση κατοικίας σε υπολογιστικό περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Το προτεινόμενο μοντέλο των δυο πυλώνων φόρτισης και αντίστασης λαμβάνει υπόψη την συνολική αντίσταση της κατασκευής και τη συγκεκριμένη αντίσταση μεμονωμένων στοιχείων κατασκευής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μια γενική αδυναμία που παρατηρείται στα μοντέλα τρωτότητας κτηρίων έναντι δράσης πλημμύρας αφορά την περιορισμένη πρακτική εμβέλεια εφαρμογή τους. Οι περισσότερες από τις σχέσεις μεταξύ μεγεθών πλημμύρας και άμεσης ζημιάς που περιγράφηκαν είναι βασισμένες είτε σε θεωρη-

τικούς υπολογισμούς είτε σε πειραματικά μοντέλα υπό κλίμακα.

#### 4.4.2 Κριτήριο ζημιάς κατά Clausen

Η έρευνα της Clausen (1989) αποτελεί εκείνη την επιστημονική εργασία στο πεδίο της ποιοτικής εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η οποία εισάγει για πρώτη φορά το γινόμενο βάθους νερού  $d$  (m), και ταχύτητας ροής  $v$  (m/s), ως καθοριστικό πλημμυρικό μέγεθος για την οριοθέτηση διαφορετικών χωρικών ζωνών ζημιάς. Η εργασία με τίτλο «Ανάπτυξη κριτηρίου για την πρόβλεψη πλημμυρικής ζημιάς από θραύση φράγματος» είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κριτηρίου εκτίμησης ζημιάς σε κτήρια από οπτοπλινθοδομή βάσει πλημμυρικών μεγεθών χρησιμοποιώντας εμπειρικά στοιχεία ζημιάς από το ιστορικό γεγονός της αστοχίας του φράγματος Ντέιλ Ντάϊκ (Dale Dyke) στη Μ. Βρετανία το 1864. Στην εργασία διερευνήθηκαν και άλλα περιστατικά αστοχίας φράγματος λόγω πλημμύρας, τα οποία όμως χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την εξαγωγή μεμονωμένων συμπερασμάτων λόγω έλλειψης πληρότητας δεδομένων. Επιπλέον, τα πρόσθετα γεγονότα αστοχίας φραγμάτων που εξετάστηκαν παρείχαν επιβεβαίωση στα αποτελέσματα της ανάλυσης της αστοχίας του φράγματος Dale Dyke [Clausen 1989].

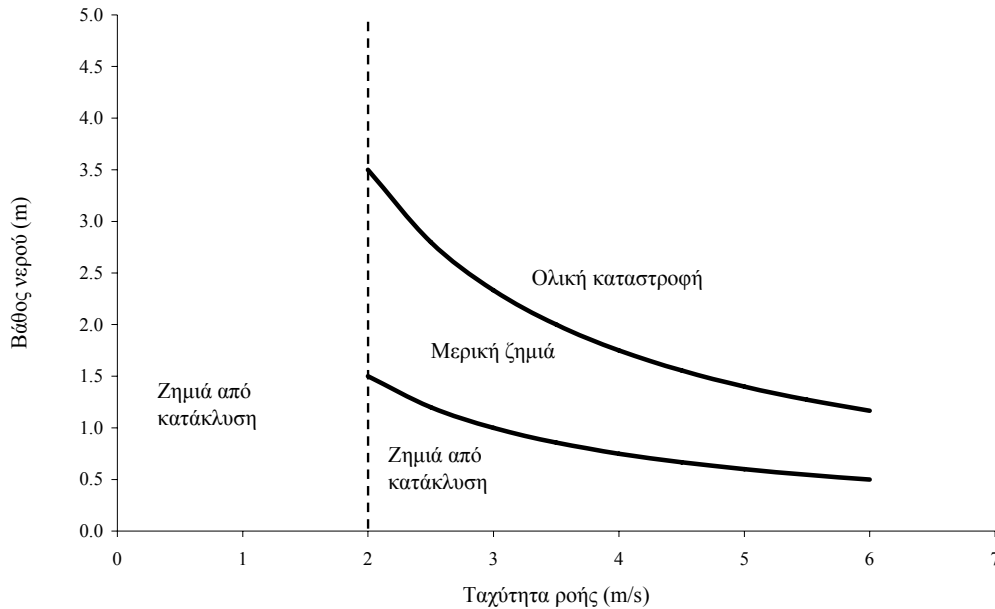
Η προσομοίωση της διάδευσης της πλημμύρας κατάντη μετά από την αστοχία φράγματος υλοποιήθηκε με την χρήση του προγράμματος DAMBRK, το οποίο γενικά εκτελεί μονοδιάστατους υπολογισμούς διάδευσης πλημμύρας. Τα πλημμυρικά μεγέθη που υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση ήταν οι τιμές του βάθους νερού  $d$  (m) και της μέσης ταχύτητας ροής  $v$  (m/s). Οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής ήταν οι μέσες τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε επιλεγμένη γεωμετρική διατομή κατάντη του φράγματος. Επομένως, οι τιμές της ταχύτητας ροής δεν έδωσαν πρόσθετη πληροφορία σχετικά με τη μετακίνηση του μετώπου του πλημμυρικού κύματος. Οι προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού ήταν σημειακές. Με βάση τις προσομοιωμένες τιμές αυτών των μεγεθών υπολογίστηκε το μέγεθος  $dv$  που συμμετείχε στην ανάλυση της ζημιάς.

Στην εργασία διακριθήκαν τρεις κατηγορίες άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον: (α) η ζημιά από κατάκλυση, (β) η μερική ζημιά και (γ) η ολική καταστροφή. Αυτές οι κατηγορίες ζημιάς ορίστηκαν ποσοτικά από τα μεγέθη πλημμύρας και ποιοτικά από το μέγεθος της βλάβης που αντιπροσωπεύουν. Ως ζημιά από κατάκλυση ορίστηκε η μη κατασκευαστική ζημιά σε δομημένο περιβάλλον που προκαλείται από βαθμιαία (μικρής ταχύτητας) υπερχείλιση ρέματος. Ως μερική ζημιά ορίστηκε η πλημμυρική ζημιά σε δομημένο περιβάλλον που έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη βλάβη στο φέροντα οργανισμό ενός κτηρίου. Τέλος, ως ολική καταστροφή ορίστηκε η ισοπέδωση ή κατάρρευση ενός κτηρίου λόγω πλημμύρας. Στον ορισμό της ολικής καταστροφής συμπεριλήφθηκε και η έννοια της σημαντικής βλάβης σε ένα κτήριο, η οποία μπορεί είτε να μην είναι επισκευάσιμη είτε το κόστος επισκευής της να ξεπερνά το κόστος κατεδάφισης. Επειδή οι παραπάνω κατηγορίες ζημιάς συνδέονται με χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμύρας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση ζωνών ζημιάς. Με αυτό τον τρόπο αναπτύχθηκε το κριτήριο ζημιάς που απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 4-6.

Είτε  $v < 2$  m/s είτε  $dv < 3$  m<sup>2</sup>/s έχει ως αποτέλεσμα «ζημιά από κατάκλυση»

Για  $v > 2$  m/s και  $3$  m<sup>2</sup>/s  $< dv < 7$  m<sup>2</sup>/s έχει ως αποτέλεσμα «μερική ζημιά»

Για  $v > 2$  m/s και  $dv > 7$  m<sup>2</sup>/s έχει ως αποτέλεσμα «ολική καταστροφή»



Εικόνα 4-6. Κριτήρια ζημιάς κατά Clausen για δομημένο περιβάλλον από οπτοπλινθοδομή [Clausen 1989]

Το κριτήρια ζημιάς κατά Clausen για δομημένο περιβάλλον από οπτοπλινθοδομή εφαρμόζεται σε περίπτωση μελέτης της διατριβής και περιγράφεται στο εδάφιο 12.7.1.

## 4.5 Λοιπές μέθοδοι εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφηκαν οι μέχρι τώρα δημοσιευμένες μέθοδοι εκτίμησης ζημιάς που περιλάμβαναν είτε το βάθος νερού ως καθοριστικό παράγοντα ζημιάς είτε ένα συνδυασμό βάθους νερού και ταχύτητας ροής. Ωστόσο η βιβλιογραφική επισκόπηση έδειξε ότι υπάρχουν πρόσφατες σημαντικές επιστημονικές εργασίες που περιλαμβάνουν και άλλα μεγέθη πλημμύρας στην ανάλυσή τους, σε μία προσπάθεια σε πρώτο επίπεδο να αποτυπωθεί και να καταγραφεί πλήρως η άμεση πλημμυρική ζημιά σε δομημένο περιβάλλον, και σε δεύτερο επίπεδο να δοθεί η βέλτιστη ερμηνεία των καταγεγραμμένων παρατηρήσεων ζημιάς και να διερευνηθεί η συμβολή του κάθε πλημμυρικού μεγέθους στην πρόκληση της ζημιάς.

Μία από τις πιο εκτεταμένες και πιο πρόσφατες αναλύσεις ζημιάς αυτού του τύπου αποτελεί το επιστημονικό έργο μιας ερευνητικής ομάδας με έδρα το Πότσταμ (Potsdam) της Γερμανίας που ασχολήθηκε σε βάθος με τις εκτεταμένες πλημμύρες λόγω υπερχείλισης του ποταμού Έλβα στη Γερμανία το 2002, το 2005 και το 2006. Σε μια σειρά από δημοσιεύσεις [Thieken et al. 2005, Kreibich et al. 2005, Kreibich and Thieken 2007, Thieken et al. 2008] οι ερευνητές περιγράφουν ένα τεράστιο έργο συλλογής, καταγραφής, επεξεργασίας, και στατιστικής ανάλυσης που ξεκίνησε αμέσως μετά από τα καταστροφικά πλημμυρικά γεγονότα. Η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων μετά το καταστροφικό πλημμυρικό γεγονός της υπερχείλισης του ποταμού Έλβα το 2002, πραγματοποιήθηκε μέσω 1697 τηλεφωνικών συνεντεύξεων σε πληγέντες κατοίκους [Thieken et al. 2005, Kreibich et al. 2005]. Από την επεξεργασία αυτής της βάσης δεδομένων παράχθηκαν ποιοτικοί δείκτες για την ταχύτητα ροής, τη επίδραση βακτηριακής δράσης της πλημμύρας σε κατοικίες, την έγκαιρη ειδοποίηση πλημμύρας, την αποδοτικότητα της λήψης έκτακτων αντιπλημμυρικών έργων και προ-



ληπτικών μέτρων από τη πλευρά των πληγέντων και την πείρα των πληγέντων σε πλημμύρες. Επίσης, η πλημμυρική ζημιά στις πληγείσες κατοικίες αποτιμήθηκε σε απόλυτες τιμές και σε ποσοστά ζημιάς λαμβάνοντας υπόψη την κατασκευή και το περιεχόμενο κτηρίου ξεχωριστά. Η στατιστική ανάλυση διέκρινε τις παραμέτρους της πλημμύρας σε εκείνες που σχετίζονται με τη φυσική και χημική επίδραση της πλημμύρας σε μια κατασκευή και σε εκείνες που σχετίζονται με τον περιορισμό της ζημιάς, όπως είναι η ειδοποίηση πλημμύρας, η πείρα και η ετοιμότητα σε πλημμύρα, με στόχο να προσδιορίσει τη συμβολή της κάθε παραμέτρου στη πρόκληση ζημιάς. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η λήψη προληπτικών μέτρων είναι ικανή να μειώσει το κόστος της πλημμυρικής ζημιάς, ενώ η ειδοποίηση πλημμύρας και τα έκτακτα αντιπλημμυρικά μέτρα φαίνεται να έχουν πολύ πιο μικρή επιρροή.

Οι Kreibich και Thieken (2007) ολοκλήρωσαν την παραπάνω ανάλυση περιλαμβάνοντας και τα πλημμυρικά γεγονότα του 2005 και 2006. Διεξάγοντας ίδιου τύπου στατιστική ανάλυση και με τα καινούργια δεδομένα ζημιάς και εστιάζοντας στη πόλη της Δρέσδης, διαπίστωσαν ότι η πλημμυρική ζημιά που είχε υποστεί η πόλη το 2006 ήταν σημαντικά πιο περιορισμένη σε σύγκριση με το 2002. Το γεγονός αυτό αποδείχθηκε ότι οφείλεται όχι μόνο στη μικρότερη ένταση της πλημμύρας το 2006, αλλά και στην αυξημένη κατά 67% ετοιμότητα σε πλημμύρα των κατοίκων και των αρχών της πόλης το 2006, σε σύγκριση με το 2005. Η συσχέτιση όλων των παραπάνω παραμέτρων πλημμύρας με την αποτιμώμενη ζημιά και για τα δυο πλημμυρικά γεγονότα (το 2002 και το 2006), έδειξε ότι η συμβολή του βάθους νερού στην πρόκληση της ζημιάς σε κατοικίες έρχεται πρώτη και ότι ακολουθούν ο δείκτης της ταχύτητας ροής, η μόλυνση και η λήψη προληπτικών μέτρων. Επομένως, η εκτεταμένη λήψη προληπτικών αντιπλημμυρικών μέτρων προστασίας από τη πλευρά των κατοίκων συνέβαλε σημαντικά στη μείωση της πλημμυρικής ζημιάς το 2006.



## Κεφάλαιο 5

# Μηχανισμοί πρόκλησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου

Είναι σημαντικό στην ανάλυση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον να συμπεριληφθεί η κατανόηση των μηχανισμών πρόκλησης της ζημιάς σε κτήρια. Συνήθως, αντί αυτού, περιγράφονται χωριστά τα πλημμυρικά μεγέθη και η παρατηρούμενη ζημιά, χωρίς διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο το πρώτο οδηγεί στο δεύτερο. Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφονται διάφοροι τρόποι δράσης της πλημμύρας σε ένα κτήριο με κριτήριο τη συνάφεια και τη σημασία τους στην πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Η γνώση και κατανόηση των μηχανισμών δράσης των πλημμυρικών μεγεθών συνεισφέρει στην αναγνώριση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς και, κατά συνέπεια, μπορεί να συμβάλλει στην αξιοπιστία της πρόβλεψης της δυνητικής πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.

Τα αίτια πρόκλησης ενός πλημμυρικού γεγονότος ποικίλλουν και μπορεί να περιλαμβάνουν την υπερχείλιση ρέματος ή ποταμού, την αστοχία αναχώματος, την αστοχία φράγματος και τη δράση παλιρροιακών κυμάτων. Ο τύπος πλημμύρας που προκύπτει ανάλογα με το γενεσιουργό αίτιο, χαρακτηρίζεται από διαφορετικές δράσεις πλημμύρας. Σύμφωνα με τους Kelman και Spencer (2004), «δράση πλημμύρας» ορίζεται η πράξη που επιβάλλει μια πλημμύρα σε ένα κτήριο και πιθανόν προκαλεί ζημιά ή αστοχία στο κτήριο. Η δράση πλημμύρας μπορεί να οφείλεται σε μεταφορά ενέργειας, δυνάμεις, πιέσεις, ή απλή επαφή με μολυσμένο νερό, και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση τοίχου, κουφώματος, υαλοπίνακα ή στέγης, ή την υποσκαφή θεμελίωσης.

Αρχικά, το κεφάλαιο αυτό αναφέρει την κατηγοριοποίηση και την περιγραφή των πλημμυρικών δράσεων, που συνήθως επιβάλλονται σε κτήρια κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Έτσι, το κεφάλαιο στοχεύει στη βελτίωση της κατανόησης των μηχανισμών πρόκλησης άμεσης ζημιάς. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο αναδεικνύεται η συνάφεια των πλημμυρικών δράσεων στην ανάλυση της πλημμυρικής ζημιάς και στο τέλος του κεφαλαίου, επιχειρείται να συνδεθούν οι κατηγορίες πλημμυρικής δράσης με τους συνήθεις τύπους πλημμύρας που έχουν ως αποτέλεσμα την άμεση πλημμυρική ζημιά.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε τρία υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 5.1 περιγράφονται οι κατηγορίες δράσεων πλημμύρας που μπορεί να προκαλέσουν άμεση ζημιά με φυσικό ή χημικό τρόπο σε ένα κτήριο. Το υπο-

κεφάλαιο 5.2 αναφέρεται στη σημασία των πλημμυρικών δράσεων στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Τέλος, το υποκεφάλαιο 5.3 αναφέρεται στους βασικούς μηχανισμούς αστοχίας στοιχείων κτηρίου λόγω της φυσικής δράσης της πλημμύρας και ταυτόχρονα τονίζεται η σημασία της απόκρισης (μηχανισμός αντίστασης) ενός κτηρίου στη διαμόρφωση του τελικού μεγέθους της πλημμυρικής ζημιάς.

## 5.1 Δράσεις πλημμύρας

### 5.1.1 Υδροστατικές δράσεις

Η υδροστατική δράση ασκείται άμεσα σε μία εξωτερική επιφάνεια ενός κτηρίου λόγω της επαφής και μόνο του πλημμυρικού νερού με την επιφάνεια αυτή. Σύμφωνα με τον Kelman (2002), οι υδροστατικές δράσεις διακρίνονται σε υδροστατικές πιέσεις και σε ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων. Η υδροστατική πίεση οφείλεται σε βάθος νερού  $d$ , που βρίσκεται σε επαφή με επιφάνεια κτηρίου κάθετη ως προς τη ροή της πλημμύρας. Εάν υποθέσουμε ότι η επιφάνεια αυτή είναι ένα άνοιγμα στο κτήριο (π.χ. ένα παράθυρο), διακρίνουμε τις ακόλουθες τέσσερις περιπτώσεις κατανομής υδροστατικής πίεσης (βλέπε Εικόνα 5-1):

1<sup>η</sup> περίπτωση: Το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εν μέρει το παράθυρο, μόνο από την εξωτερική του πλευρά.

2<sup>η</sup> περίπτωση: Το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εξ ολοκλήρου το παράθυρο, μόνο από την εξωτερική του πλευρά.

3<sup>η</sup> περίπτωση: Το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εν μέρει το παράθυρο από την εξωτερική του πλευρά, ενώ το νερό έχει εισχωρήσει στο εσωτερικό του κτηρίου σε διαφορετικό βάθος νερού  $y$ .

4<sup>η</sup> περίπτωση: Το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εξ ολοκλήρου το παράθυρο από την εξωτερική του πλευρά, ενώ το νερό έχει εισχωρήσει στο εσωτερικό του κτηρίου σε διαφορετικό βάθος νερού  $y$ .

Παρατηρούμε στην Εικόνα 5-1, ότι η υδροστατική πίεση είναι μια γραμμικά κατανεμημένη πίεση, που αυξάνει με την αύξηση του βάθους νερού  $d$ . Έτσι για τις περιπτώσεις (1) και (2) η υδροστατική πίεση  $p_s$ , που ασκείται σε άνοιγμα ύψους  $h_w$ , δίνεται από τις εξισώσεις (5.2) και (5.3):

$$\text{για } d < z_w \quad \text{τότε} \quad p_s = 0 \quad (5.1)$$

$$\text{για } z_w < d \leq (z_w + h_w) \quad \text{τότε} \quad p_s = \frac{1}{2}[\rho g(d - z_w)] \quad (5.2)$$

$$\text{για } d > (h_w + z_w) \quad \text{τότε} \quad p_s = \rho g(d - h_w - z_w) + \frac{1}{2}\rho gh_w \quad (5.3)$$

όπου  $d$  = βάθος νερού στο εξωτερικό του κτηρίου, [m]

$z_w$  = κατακόρυφη απόσταση από το φυσικό έδαφος στο περβάζι του παραθύρου, [m]

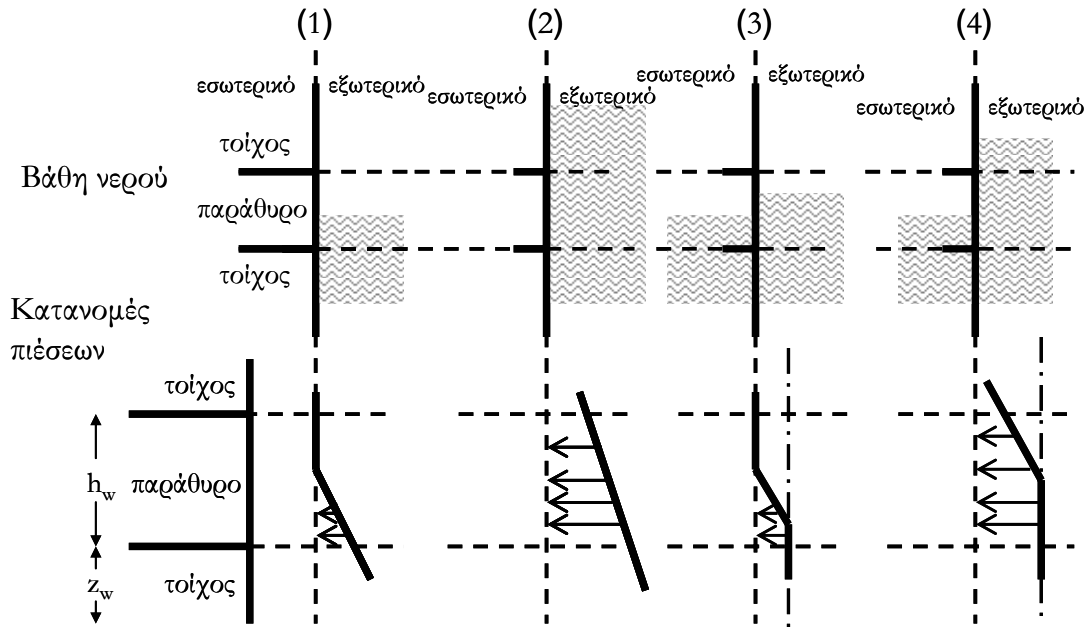
$p_s$  = υδροστατική πίεση που ασκείται καθ' ύψος του παραθύρου, [Pa]

$h_w$  = ύψος παραθύρου, [m]

$\rho$  = πυκνότητα νερού, (= 1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας, ( $= 9.81 \text{ m/s}^2$ )

Στις περιπτώσεις (3) και (4) όπου το νερό εισχωρεί στο εσωτερικό του κτηρίου σε διαφορετικό βάθος  $y$ , οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται μέχρι το βάθος  $y$ , αμφότερα στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του ίδιου στοιχείου εξισώνονται και επομένως αλληλοεξουδετερώνονται. Γενικά θα πρέπει να τονιστεί, ότι η υδροστατική πίεση που ασκείται σε ένα στοιχείο κτηρίου οφείλεται σε διαφορετικά βάθη νερού, που είναι σε άμεση επαφή με την εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου αυτού.



Εικόνα 5-1. Ενδεικτικές περιπτώσεις βαθών νερού και κατανομών υδροστατικών πιέσεων σε ένα άνοιγμα ενός κτηρίου [βασίζεται σε Kelman and Spencer (2004)]

Η ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων στο εσωτερικό ορισμένων στοιχείων κτηρίου όταν τα τελευταία έρχονται σε επαφή με πλημμυρικό νερό, θεωρείται σύμφωνα με τον Kelman, υδροστατική δράση. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι τριχοειδείς δυνάμεις αναπτύσσονται σε ένα ύψος πάνω από τη στάθμη πλημμύρας, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων του υλικού κατασκευής του εκάστοτε στοιχείου και μπορεί να φτάσει τη μέγιστη τιμή 0.45 m. Η επίδραση τους στην ανάπτυξη άμεσης πλημμυρικής ζημιάς ποικίλλει και λαμβάνεται υπόψη σπάνια στην ανάλυση ζημιάς. Στην παρούσα διατριβή η ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων λόγω πλημμύρας δεν θα αναλυθεί.

### 5.1.2 Υδροδυναμικές δράσεις

Η υδροδυναμική δράση ασκείται άμεσα σε μια εξωτερική επιφάνεια ενός κτηρίου λόγω της κίνησης του πλημμυρικού νερού ως προς την επιφάνεια αυτή. Σύμφωνα με τον Kelman (2002), οι υδροδυναμικές δράσεις σχετίζονται είτε απευθείας με την ταχύτητα ροής είτε με τη δράση κυματισμών, και συνεπώς διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες.

#### Υδροδυναμική πίεση

Αυτός ο τύπος πίεσης προσεγγίζεται από την πίεση που ασκείται σε εξωτερική επιφάνεια ενός κτηρίου λόγω της δράσης δυνατού ανέμου με τη διαφορά ότι η σχετική πυκνότητα του νερού προς τον αέρα (περίπου 1000

προς 1) προκαλεί την ανάπτυξη πολύ μεγαλύτερων πιέσεων λόγω νερού σε πολύ πιο μικρές ταχύτητες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πιέσεις λόγω ανέμου της ίδιας ταχύτητας. Εάν θεωρήσουμε ότι η υδροδυναμική πίεση ασκείται σε ένα κατακόρυφο στοιχείο κτηρίου (π.χ. τοίχος) λόγω κίνησης του νερού με ταχύτητα  $v$ , τότε σε μία πρώτη προσέγγιση η υδροδυναμική πίεση δίνεται από την εξίσωση (5.4):

$$p_d = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 \quad (5.4)$$

όπου  $p_d$  = υδροδυναμική πίεση που ασκείται καθ' ύψος του στοιχείου, [Pa]

$C_D$  = αδιάστατος συντελεστής (εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου στη ροή και π.χ. για κτήριο σε σχήμα κύβου είναι ίσος με 2.0)

$\rho$  = πυκνότητα νερού, (= 1000 kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = ταχύτητα ροής, [m/s]

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω πιέσεων διακρίνονται σε ψευδο-υδροστατικές (επικρατεί η τριβή) και σε δυνάμεις ώθησης (επικρατεί η αδράνεια). Επιπλέον δεδομένου ότι οι κατασκευές σε πλημμυρόπληκτες περιοχές μπορεί να κυμαίνονται από ισόγειες κατοικίες έως πολύ ψηλά κτήρια, η δυναμική αντίστασης ενός κτηρίου επηρεάζει την επίδραση της φόρτισης σε αυτό. Συνεπώς η σημασία των φορτίσεων μικρής διάρκειας στην ολική ευστάθεια του κτηρίου αλλά και στην επιμέρους αντίσταση των δομικών και μη δομικών στοιχείων, είναι σχετική. Σχετική έρευνα βάσει πειραματικών διατάξεων μικρής κλίμακας για την προσομοίωση πλημμύρας από θραύση φράγματος είναι σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο του Ντέλφτ (Delft), με σκοπό τη διερεύνηση της δυναμικής των υδροδυναμικών φορτίσεων σε κτήρια. Τα πρώτα αποτελέσματα από αισθητήρες πίεσης σε μοντέλα – κτήρια, έδειξαν ότι στις χρονοσειρές υδροδυναμικής πίεσης εμφανίζεται αρχικά, ιδιαίτερα υψηλή και μικρής διάρκειας πίεση (δυνάμεις ώθησης), η οποία ακολουθείται από αργά μεταβαλλόμενη ψευδο-υδροστατική πίεση.

### Τοπικές αλλαγές στην ταχύτητα ροής

Ένα κτήριο το οποίο αντιστέκεται στην υδροδυναμική πίεση ίση με  $0.5\rho v^2$ , μπορεί να υποκύψει και να υποστεί ζημιές εξαιτίας τοπικών διαφοροποιήσεων της ταχύτητας ροής. Τοπικές αλλαγές στην ταχύτητα μπορεί να συμβούν, όταν το πλημμυρικό νερό ρέει γύρω από τις γωνίες ενός κτηρίου ή μέσα από κενά των τοίχων πλήρωσης. Οι διαταραχές στη ροή, δηλαδή οι απότομες αλλαγές στο μέγεθος ή τη διεύθυνση της ταχύτητας ροής έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων αναρρόφησης, πρόκληση δινών και στροβίλων με επακόλουθες απότομες αλλαγές βάθους νερού ή πιθανή διάβρωση της θεμελίωσης κτηρίου.

### Δράση μη θραυόμενων κυματισμών σε κατακόρυφο μέτωπο κτηρίου

Οι κορυφές και τα κοίλα σημεία μη θραυόμενων κυματισμών λόγω πλημμύρας αυξάνουν και μειώνουν αντίστοιχα την υδροστατική πίεση που ασκείται σε κατακόρυφα στοιχεία ενός κτηρίου. Οι κορυφές ενός κυματισμού μπορεί να προσθέσουν μια μέγιστη δύναμη ισοδύναμη της υδροστατικής, ενώ τα κοίλα σημεία ενός κυματισμού μπορεί να μειώσουν την ολική δύναμη περίπου κατά 40%. Έξω από τα όρια αυτά συμβαίνει θραύση κυματισμού. Η ακριβής αλλαγή στην ολική υδροστατική δύναμη που ασκείται σε ένα κατακόρυφο στοιχείο εξαρτάται από το κλάσμα του ύψους κύματος προς το βάθος νερού, το οποίο για μη θραυόμενα κύματα πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή 0.7. Ο ρυθμός αλλαγής των δυνάμεων και πιέσεων εξαρτάται από την περίοδο του κύματος [USACE 1984].

### Δράση θραυόμενων κυματισμών σε κατακόρυφο μέτωπο

Δράση θραυόμενων κυματισμών σε ένα κατακόρυφο μέτωπο κτηρίου μπορεί να επιβάλει μεγάλες πιέσεις σε σύγκριση με άλλες υδροδυναμικές δράσεις. Οι μέγιστες υδροδυναμικές πιέσεις θραυόμενων κυμάτων μπορεί να είναι 15 έως 18 φορές μεγαλύτερες από εκείνες που υπολογίζονται για μη θραυόμενα κύματα, ωστόσο απαιτείται λεπτομερής υπολογισμός των χαρακτηριστικών του κύματος σε κάθε περίπτωση. Από πειραματικές διατάξεις βρέθηκε ότι για βάθος νερού ίσο με 0.5 m και διαφορετικά σενάρια συνθηκών, η μέγιστη δυναμική πίεση σε ένα κατακόρυφο μέτωπο κτηρίου λόγω θραυόμενων κυματισμών είναι περίπου ίση με 50 kPa, ενώ για βάθος νερού ίσο με 2.5 m η μέγιστη δυναμική πίεση είναι περίπου ίση με 500 kPa [USACE 1984].

#### 5.1.3 Δράση δύναμης άνωσης

Η δύναμη της άνωσης είναι συνάρτηση του εκτοπιζόμενου ύδατος υπό στερεό σώμα, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένα κτήριο. Η δύναμη της άνωσης  $F_A$ , δίνεται από την εξίσωση (5.5):

$$F_A = \rho g V_{\text{εκτοπιζόμενο}} = \rho g A d \quad (5.5)$$

όπου  $V_{\text{εκτοπιζόμενο}} = \text{ο όγκος ενός κτηρίου βυθισμένος στο νερό, [m}^3]$

$A = \text{επιφάνεια κτηρίου βυθισμένη στο νερό, [m}^2]$

$d = \text{βάθος νερού πλημμύρας, [m]}$

$\rho = \text{πυκνότητα νερού, (= 1000 kg/m}^3)$

$g = \text{επιτάχυνση βαρύτητας, (= 9.81 m/s}^2)$

Η διεύθυνση της δύναμης άνωσης είναι κατακόρυφη με φορά προς τα πάνω με αποτέλεσμα να προκαλεί μείωση του ενεργού βάρους κτηρίου και κατ' επένταση μείωση της δύναμης τριβής στη θεμελίωση. Επομένως, η δράση της δύναμης άνωσης μπορεί να οδηγήσει σε δύο περιπτώσεις αστοχίας κτηρίου: (α) να υπερνικήσει τη συνισταμένη του βάρους και την αντίσταση θεμελίωσης του κτηρίου και συνεπώς να «σηκώσει» το κτήριο από τα θεμέλια του (επίπλευση κτηρίου) και (β) σε συνδυασμό με πλευρικές υδροδυναμικές πιέσεις να μετακινήσει το κτήριο από τη θεμελίωση του.

#### 5.1.4 Λοιπές δράσεις πλημμύρας

##### Φερτά υλικά

Στις περιπτώσεις πλημμυρών με μεγάλη ταχύτητα ροής, έχει παρατηρηθεί επανειλημμένα η γένεση και μεταφορά φερτών υλικών που περιλαμβάνουν χώματα, βράχους, κλαδιά, δένδρα ή χαλάσματα από κατεστραμμένα κτήρια. Η δράση φερτών υλικών δύσκολα μοντελοποιείται στην ανάλυση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς τους μηχανισμούς γένεσης, μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλικών λόγω πλημμύρας. Οι Kelman και Spencer (2004) διακρίνουν τη δράση των φερτών υλικών σε (α) στατική δράση και (β) δυναμική δράση.

Η στατική δράση των φερτών υλικών λόγω πλημμύρας οφείλεται σε συσσώρευση ιζήματος εξωτερικά ή εσωτερικά σε ένα κτήριο. Σύμφωνα με το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ [USACE 1984], οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν τοίχο λόγω ιζηματοπόθεσης εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της κοκκο-

μετρίας του εδάφους, από το βαθμό συμπίεσης και κορεσμού του εδάφους και από τη γεωμετρία της μάζας της ιζηματοπόθεσης. Η εξίσωση (5.6) μοντελοποιεί τις δυνάμεις αυτές:

$$F_{\Phi} = \rho_{\text{εδάφους}} g y^2 a \quad (5.6)$$

όπου  $a$  = προσδιορίζεται από φυσικές ιδιότητες εδάφους και τη γεωμετρία της μάζας

$y$  = ύψος της μάζας της ιζηματοπόθεσης, [m]

$\rho_{\text{εδάφους}}$  = πυκνότητα εδάφους, [kg/m<sup>3</sup> ]

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας, (= 9.81 m/s<sup>2</sup>)

Η δυναμική δράση των φερτών υλικών λόγω πλημμύρας ορίζεται από τη μεταφορά τους με την ταχύτητα ροής και την πρόσκρουση τους σε ένα κτήριο. Οι δυναμικές δράσεις φερτών υλικών μπορεί να διακριθούν είτε σε συγκεντρωμένες δυνάμεις, είτε σε κατανεμημένες πιέσεις. Παράδειγμα δυναμικής δράσης φερτών υλικών ως συγκεντρωμένη δύναμη αποτελεί η πρόσκρουση πλωτού κλαδιού σε τοίχο κτηρίου, ενώ παράδειγμα δράσης φερτών υλικών ως κατανεμημένη πίεση αποτελεί η πίεση μια υπερσυγκεντρωμένης ροής σε φερτά υλικά για σχετικά μεγάλη διάρκεια σε ένα κτήριο. Επίσης ο Roos (2003) έχει αποδείξει ότι πλωτά, μεγάλα αντικείμενα που κινούνται με σημαντική ταχύτητα ροής μπορεί να προκαλέσουν με την πρόσκρουση τους σοβαρές βλάβες σε ένα κτήριο.

### Διάβρωση

Το φαινόμενο της διάβρωσης από εκσκαφή λόγω πλημμυρικής ροής σε όχθες ή στον πυθμένα ενός ανεπένδυτου καναλιού έχει ερευνηθεί και αναλυθεί εκτεταμένα. Τα ερευνητικά αποτελέσματα στη διεθνή βιβλιογραφία κατέληξαν ότι στην πρόκληση διάβρωσης λαμβάνουν χώρα δύο φαινόμενα: η συμπαράσυρση ιζημάτων από την κίνηση του νερού και η οριζόντια κίνηση του ιζήματος αυτού. Οι παράμετροι πλημμύρας που συμμετέχουν σε τέτοιου είδους ανάλυση είναι το βάθος νερού, η ταχύτητα ροής, η παροχή ροής και η κινηματική συνεκτικότητα. Επίσης, η κοκκομετρία και η πυκνότητα του ιζήματος και ο μεταβαλλόμενος συντελεστής τραχύτητας του πυθμένα παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτάχυνση ή επιβράδυνση του μηχανισμού της διάβρωσης.

Η διαβρωτική ικανότητα της πλημμύρας μπορεί να οδηγήσει π.χ. σε εκσκαφή θεμελίωσης ενός κτηρίου. Το αποτέλεσμα άμεσης ζημιάς σε κτήριο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και από τη εδαφική ευστάθεια της ευρύτερης περιοχής, παράγοντες που διαφοροποιούνται έντονα με την αλλαγή γεωγραφικής θέσης [Becker 2008].

### Μη φυσική δράση πλημμύρας

Μη φυσική δράση πλημμύρας εμφανίζεται σε περιπτώσεις πλημμυρών με μεγάλη διάρκεια παραμονής νερών και προϋποθέτει την άμεση επαφή πλημμυρικού νερού με δομικά στοιχεία κτηρίου. Το ύψος της πλημμυρικής στάθμης, η συγκέντρωση ρυπαντών στο πλημμυρικό νερό και η διάρκεια παραμονής των νερών, καθώς επίσης οι φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής είναι καθοριστικοί παράγοντες για το τελικό αποτέλεσμα της άμεσης ζημιάς. Η μη φυσική δράση πλημμύρας μπορεί να συμβεί πάνω και κάτω από το όριο της μέγιστης πλημμυρικής στάθμης. Πάνω από το όριο της μέγιστης στάθμης συμβαίνει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης τριχοειδών δυνάμεων, της μεταφοράς υδρατμών (π.χ. σε ξύλο ή χαρτί) και της υγροποίησης. Κάτω από το όριο της μέγιστης στάθμης συμβαίνει ως αποτέλεσμα διάβρωσης (π.χ. σκουριά), διάλυσης (π.χ. χαρτιού), μόλυνσης μεταδιδόμενη με το νερό και διάσπασης βακτηρίων.



Διακρίνουμε χημική και βιολογική δράση πλημμύρας. Η βιολογική δράση πλημμύρας περιλαμβάνει την ανάπτυξη μικροοργανισμών που ευνοούνται από τις συνθήκες υγρασίας, όπως είναι οι μύκητες, τα βακτήρια και τα παράσιτα. Συνηθισμένη ένδειξη βιολογικής δράσης της πλημμύρας αποτελεί η ανάπτυξη μούχλας στο εσωτερικό πληγέντων κτηρίων.

Στους χημικούς ρυπαντές περιλαμβάνονται οι βαφές, πετρέλαιο, βενζίνη, λάδια, απορρυπαντικά ή βιομηχανικά χημικά. Οποιαδήποτε διαβρωτική ή εύφλεκτη ιδιότητα των χημικών αυτών μπορεί να μεταφέρεται μέσω του νερού σε υλικά κατασκευής ενός κτηρίου. Για τα περισσότερα υλικά κατασκευής ισχύει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η παραμονή των πλημμυρικών νερών τόσο αυξάνει ο κίνδυνος πρόκλησης ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων σε αυτά, όπως είναι η οξείδωση και η διάβρωση. Οι χημικοί ρυπαντές του νερού διακρίνονται σε βαρέα μέταλλα, σε πετρελαιοειδή οργανικά, σε παρασιτοκτόνα και σε πολυχλωριωμένες φαινόλες. Επίσης, στην κατηγορία της χημικής δράσης πλημμύρας μπορεί να συμπεριληφθεί και η διάβρωση μεταλλικών στοιχείων από θαλασσινό νερό.

Η φόρτιση ενός κτηρίου από πλημμύρα μπορεί να είναι αποτέλεσμα συνδυασμού και αλληλεπίδρασης των προαναφερόμενων δράσεων πλημμύρας. Για παράδειγμα, η ανύψωση κτηρίου λόγω δράσης της δύναμης της άνωσης μειώνει την υδροδυναμική πλευρική πίεση που απαιτείται για την μετακίνηση του κτηρίου. Επίσης, η χημική δράση της πλημμύρας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση ορισμένων υλικών κατασκευής, όπως είναι η οπτοπλινθοδομή, το ξύλο ή το πλαστικό, και κατά συνέπεια να μειώσει την υδροστατική πίεση που απαιτείται για την αστοχία ενός δομικού στοιχείου. Τέλος, φυσικές παράμετροι πλημμύρας, όπως είναι η πίεση και η θερμοκρασία σε ένα σημείο μπορούν να επηρεάσουν το ρυθμό και τις συνέπειες χημικών αντιδράσεων, όπως είναι η ανάφλεξη ή η οξείδωση.

## 5.2 Συνάφεια πλημμυρικών δράσεων στην εκτίμηση άμεσης ζημιάς σε κτήριο

Οι Kelman και Spencer (2004) διέκριναν τρεις κατηγορίες πλημμυρικών δράσεων με βάση τη συνάφεια και τη σημασία τους στην εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς καθώς και το βαθμό προβλεψιμότητά τους.

1<sup>η</sup> κατηγορία: Υψηλή συνάφεια και σχετική προβλεψιμότητα. Περιλαμβάνονται οι υδροστατικές πιέσεις λόγω υψομετρικής διαφοράς βάθους ροής ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό ενός κτηρίου, πιέσεις από τη δράση της ταχύτητας ροής και της επαφή του νερού λόγω της βαθμιαίας ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης.

2<sup>η</sup> κατηγορία: Ποικίλη συνάφεια και σχετική προβλεψιμότητα. Στην κατηγορία ανήκει η δύναμη της άνωσης.

3<sup>η</sup> κατηγορία: Ποικίλη συνάφεια και μειωμένη προβλεψιμότητα. Περιλαμβάνονται τριχοειδείς δυνάμεις, διάβρωση και ιζηματογένεση, δράση κυμάτων, χημικές αντιδράσεις και άλλες τοπικές δράσεις της ταχύτητας ροής.

Οι πλευρικές υδροδυναμικές πιέσεις λόγω της διαφοράς του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής και οι υδροστατικές πιέσεις λόγω της επαφής με νερό θεωρούνται καθοριστικής σημασίας δράσεις στην πρόκληση άμεσης ζημιάς στις περισσότερες περιπτώσεις πλημμυρών. Οι δράσεις αυτές παρουσιάζουν υψηλή συνάφεια με το παρατηρούμενο αποτέλεσμα άμεσης ζημιάς από πλημμύρα, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσουν σε δομική ζημιά. Η λεπτομερής διερεύνηση του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής είναι υλοποιήσιμη σε μέτριες προς μεγάλες χωρικές κλίμακες ανάλυσης ζημιάς και κατά συνέπεια οι δράσεις αυτές εμφανίζουν μεγάλη προβλεψιμότητα σε σχετικά μεγάλες κλίμακες ανάλυσης.

Η συνάφεια της δύναμης άνωσης στην πρόκληση άμεσης ζημιάς ποικίλλει. Κτήρια με ξύλινο σκελετό που δεν είναι κατάλληλα αγκυρωμένα στη θεμελίωση μπορεί να επιπλεύσουν κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος [Black 1975, Sangrey et al. 1975] αλλά δεν ισχύει το ίδιο και για κτήρια κατασκευασμένα από πέτρα. Η δύναμη της άνωσης συνήθως επιδρά σημαντικά στην πρόκληση ζημιάς σε περιπτώσεις οχημάτων, δένδρων, ανθρώπων και άλλων πιθανών «χαλασμάτων». Επομένως, η δύναμη της άνωσης θεωρείται προβλέψιμη, ωστόσο η συνάφεια της στην εκτίμηση ζημιάς εξαρτάται από το είδος των πλημμυρόπληκτων αντικειμένων.

Η συνάφεια των λοιπών δράσεων (ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων, διάβρωση, φερτά υλικά, κυματισμοί, χημικές και βιολογικές δράσεις πλημμύρας) στην πρόκληση ζημιάς ποικίλλει και εξαρτάται από την ακριβή μορφή στην οποία εμφανίζεται η δράση και από την αλληλεπίδραση της με άλλες δράσεις. Για παράδειγμα η ανάπτυξη τριχοειδών δυνάμεων τείνει να είναι σημαντική σε περιπτώσεις που το νερό δεν εισέρχεται στο κτήριο αλλά εισχωρεί στη μόνωση των εξωτερικών τοίχων, ενώ τείνει να είναι ασήμαντη στην περίπτωση χημικής δράσης της πλημμύρας από μακροχρόνια επαφή με πλημμυρικό νερό. Γενικά οι επιπτώσεις των λοιπών δράσεων πλημμύρας είναι τοπικές και συνεπώς δεν θεωρούνται προβλέψιμες σε μεγάλης κλίμακας ανάλυσεις ζημιάς.

Παρατηρείται [Kelman and Spencer 2004] ότι η ολική μη δομική ζημιά που προκύπτει από τις λοιπές πλημμυρικές δράσεις σε ένα κτήριο, είναι μικρότερη από τη δομική ζημιά που προκαλούν οι πλευρικές πιέσεις. Όμως, η δομική ζημιά που μπορεί να προκύψει από τις λοιπές πλημμυρικές δράσεις είναι η αντίστοιχη ζημιά λόγω πλευρικών πιέσεων. Η μετάβαση από μη δομική ζημιά σε δομική ζημιά λόγω των λοιπών πλημμυρικών δράσεων εξαρτάται άμεσα από τις τοπικές συνθήκες. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η εκτίμηση ζημιάς λόγω λοιπών πλημμυρικών δράσεων σε μεγάλη χωρική κλίμακα θεωρείται δύσκολη.

Για όλες τις παραπάνω κατηγορίες θεωρείται ότι η διάρκεια της ελάχιστο πλημμυρικής δράσης είναι σημαντική παράμετρος στην πρόκληση ζημιάς και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση ζημιάς.

### 5.3 Μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων κτηρίου βάσει πλημμυρικών δράσεων

Το μοντέλο φόρτισης – αντίστασης εφαρμόζεται για να εξεταστεί η απόκριση δομικών στοιχείων κτηρίου στη δράση πλημμύρας, χρησιμοποιώντας ως μεγέθη πλημμύρας το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής. Στο μοντέλο αξιολογείται εάν ένα τυπικό στοιχείο κτηρίου είναι ασφαλές έναντι πλημμύρας, συγκρίνοντας συνδυασμένες πλημμυρικές δράσεις λόγω ορισμένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής με την αντίσταση του στοιχείου. Στα ακόλουθα εδάφια, βάσει του μοντέλου φόρτισης – αντίστασης περιγράφονται τρεις μηχανισμοί αστοχίας κτηρίου: (α) αστοχία από ρηγμάτωση ανοίγματος, (β) αστοχία από ανατροπή στοιχείου και (γ) αστοχία από ολίσθηση κτηρίου. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορεί να συμβούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο ή αλληλεπιδρώντας ο ένας με τον άλλο. Για παράδειγμα, η ολίσθηση από τη θεμελίωση εξαρτάται σημαντικά από το εάν έχει συμβεί νωρίτερα ρηγμάτωση σε άνοιγμα και έχει εισχωρήσει νερό στο εσωτερικό του κτηρίου. Για λόγους απλοποίησης, οι μηχανισμοί αστοχίας εφαρμόζονται μόνον σε μεμονωμένα στοιχεία κτηρίου, και, κατά συνέπεια, δεν λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία του κτηρίου ως πλαίσιο.

### 5.3.1 Αστοχία από ρηγμάτωση ανοίγματος

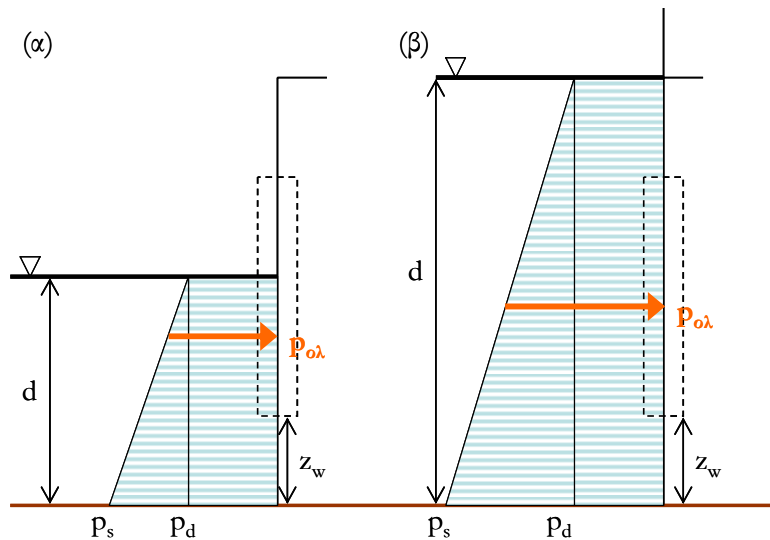
Στο εδάφιο αυτό εξετάζεται ο μηχανισμός αστοχίας από ρηγμάτωση ανοίγματος κτηρίου υπό την φόρτιση υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων. Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις φόρτισης:

1<sup>η</sup> περίπτωση: Δεν συμβαίνει αστοχία και κατά συνέπεια δεν εισέρχεται νερό στο εσωτερικό του κτηρίου. Τότε, ασκούνται υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις στην εξωτερική επιφάνεια ανοίγματος του κτηρίου.

2<sup>η</sup> περίπτωση: Εισέρχεται νερό στο εσωτερικό κτηρίου με αποτέλεσμα να εξισώνονται εν μέρει οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια ενός ανοίγματος του κτηρίου. Επίσης, ασκούνται υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις στην εξωτερική επιφάνεια ανοίγματος του κτηρίου.

3<sup>η</sup> περίπτωση: Εισέρχεται νερό στο εσωτερικό κτηρίου με αποτέλεσμα να εξισώνονται πλήρως οι υδροστατικές πιέσεις στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια ενός ανοίγματος του κτηρίου. Επίσης, ασκούνται μόνον υδροδυναμικές πιέσεις στην εξωτερική επιφάνεια ανοίγματος του κτηρίου.

Εξετάζουμε την πρώτη περίπτωση φόρτισης, που είναι και η δυσμενέστερη. Έστω παράθυρο ύψους,  $h_w$ . Διακρίνουμε δυο υποπεριπτώσεις: (α) όταν το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εν μέρει το παράθυρο και (β) όταν το βάθος νερού  $d$ , καλύπτει εξ ολοκλήρου το παράθυρο (βλέπε Εικόνα 5-2).



Εικόνα 5-2. Σκαρίφημα ανοίγματος σε αστοχία από ρηγμάτωση λόγω δράσης πλημμύρας

Η ολική φόρτιση στο παράθυρο από τη δράση των υδροστατικών  $p_s$ , και υδροδυναμικών πιέσεων  $p_d$ , δίνεται από τις εξισώσεις (5.7) και (5.8) για τις υποπεριπτώσεις (α) και (β) αντίστοιχα:

$$(α) \text{ εάν } z_w < d \leq (z_w + h_w) \quad \text{τότε} \quad p_{ολ} = p_s + p_d = \frac{1}{2}[\rho g(d - z_w)] + \frac{1}{2}C_D \rho v^2 \quad (5.7)$$

$$(β) \text{ εάν } d > (h_w + z_w) \quad \text{τότε} \quad p_{ολ} = p_s + p_d = \rho g(d - h_w - z_w) + \frac{1}{2}\rho g h_w + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (5.8)$$

όπου  $v$  = ταχύτητα ροής, [m/s]

$z_w$  = κάθετη απόσταση από το φυσικό έδαφος στο περβάζι του παραθύρου, [m]

$\rho$  = πυκνότητα νερού, (= 1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας, (= 9.81 m/s<sup>2</sup>)

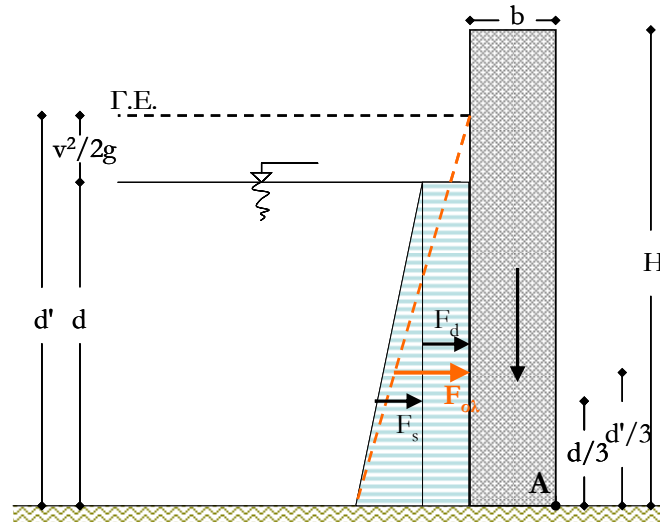
$p_s$  = υδροστατική πίεση, [Pa]

$p_d$  = υδροδυναμική πίεση, [Pa]

Στο συγκεκριμένο μοντέλο φόρτισης – αντίστασης, ο υπολογισμός της αντίστασης ενός παραθύρου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την ερευνητική εργασία του Kelman (2002), στην οποία η αντοχή σε θραύση παραθύρων με υαλοπίνακα εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 1 kPa και 10 kPa, ενώ παράθυρα μικρής επιφάνειας (~1 m<sup>2</sup>) εκτιμήθηκε ότι αντέχουν πιέσεις μεγαλύτερες και από 10 kPa.

### 5.3.2 Αστοχία από ανατροπή δομικού στοιχείου

Στο εδάφιο αυτό εξετάζεται ο μηχανισμός αστοχίας από ανατροπή δομικού στοιχείου (π.χ. τοίχιο προστασίας) υπό την φόρτιση υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο φόρτισης - αντίστασης, θεωρείται ότι το έδαφος έδρασης του τοιχίου και το ίδιο το τοίχιο είναι αδιαπέρατα και κατά συνέπεια η δύναμη της άνωσης αγνοείται για λόγους απλοποίησης. Η Εικόνα 5-3 παρουσιάζει ένα σχηματικό κατακόρυφης τομής του τοιχίου, τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό και τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων αυτών.



Εικόνα 5-3. Σχηματικό στοιχείου σε αστοχία από ανατροπή λόγω δράσης πλημμύρας

Το στάσιμο βάθος νερού  $d$ , προκαλεί υδροστατική πίεση  $p_s$ , τριγωνικής κατανομής στη βρεχόμενη κατακόρυφη επιφάνεια του τοιχίου. Η αντίστοιχη υδροστατική δύναμη ανά μονάδα μήκους  $F_s$ , υπολογίζεται από τον τύπο (5.9) γενικής μορφής:

$$p_s = \rho g d \Rightarrow F_s = \frac{1}{2} p_s d = \frac{1}{2} \rho g d^2 \quad (5.9)$$

Η ταχύτητα ροής του νερού προκαλεί υδροδυναμική πίεση  $p_d$ , στο τοίχιο. Η αντίστοιχη υδροδυναμική δύναμη ανά μονάδα μήκους  $F_d$ , υπολογίζεται από τον τύπο (5.10) γενικής μορφής:

$$p_d = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 \Rightarrow F_d = p_d d \quad (5.10)$$

όπου  $d$  = βάθος νερού, [m]

$v$  = ταχύτητα ροής, [m/s]

$C_D$  = αδιάστατος συντελεστής, (ίσος με 1.15 για την περίπτωση κατακόρυφου τοιχίου)

$\rho$  = πυκνότητα νερού, (=1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας, (= 9.81 m/s<sup>2</sup>)

Για την απλοποίηση του υπολογισμού της υδροδυναμικής δύναμης  $F_d$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του γραφστατικού υπολογισμού, δηλαδή ο μετασχηματισμός της υδροδυναμικής δύναμης  $F_d$ , στην ισοδύναμη υδροστατική δύναμη [Κωτούλας 1989]. Στην περίπτωση αυτή, η ολική ισοδύναμη υδροστατική δύναμη στο τοίχιο υπολογίζεται από τον τύπο (βλέπε Εικόνα 5-3):

$$F_{ολ} = F_s + F_d = F_d' \quad (5.11)$$

$$\text{όπου } d' = d + \frac{v^2}{2g} \quad (5.12)$$

Η αντίσταση του κατακόρυφου τοιχίου στις δράσεις της πλημμύρας εξαρτάται από το υλικό κατασκευής και τη θεμελίωσή του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του εξεταζόμενου τοιχίου, για την απλοποίηση των υπολογισμών θεωρείται ότι το υλικό κατασκευής είναι ξηρολιθοδομή, ένα υλικό χωρίς συνοχή που αδυνατεί να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, εξετάζεται ο μηχανισμός αστοχίας του τοιχίου μόνο από ανατροπή και όχι και από ολίσθηση.

Η οριακή συνθήκη αστοχίας του τοιχίου από ανατροπή δίνεται από την εξίσωση (5.13):

$$\Sigma M_A = 0 \quad (5.13)$$

όπου  $A$  = σημείο στο κάτω εσωτερικό άκρο του τοιχίου (βλέπε Εικόνα 5-3)

Οι κύριες δυνάμεις που διαμορφώνουν το μοντέλο φόρτισης – αντίστασης στο τοίχιο, διακρίνονται σε οριζόντιες δυνάμεις που ωθούν την κατασκευή σε ανατροπή και σε κατακόρυφες δυνάμεις που αντιστέκονται στην ώθηση με φορά προς τα κάτω. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνισταμένη των οριζόντιων δυνάμεων ισούται με την ολική υδροστατική δύναμη  $F_d'$ , ενώ η συνισταμένη των κατακόρυφων δυνάμεων ισούται με το βάρος  $B$  του τοιχίου, αφού η άνωση θεωρείται μηδενική με την παραδοχή του αδιαπέρατου εδάφους.

$$\text{Δυνάμεις: } F_d' = \frac{d'^2}{2} \gamma_w \quad (5.14) \quad \text{Μοχλοβραχίονας ως προς το σημείο A: } l_{F_d'} = \frac{d'}{3} \quad (5.15)$$

$$B = bH\gamma_b \quad (5.16) \quad \text{Μοχλοβραχίονας ως προς το σημείο A: } l_B = \frac{b}{2} \quad (5.17)$$

Επομένως, από τις εξισώσεις (5.13), (5.14), (5.15), (5.16), (5.17) προκύπτει:

$$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow \frac{d'^3}{6} = Hb^2 \frac{\gamma_b}{2} \quad (5.18)$$

όπου  $\gamma_b$  = ειδικό βάρος τοιχοποιίας, [t/m<sup>3</sup>] (για την ξηρολιθοδομή ίσο με 2.1 t/m<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος νερού σε [t/ m<sup>3</sup>] (=1 t/m<sup>3</sup>)

$H$  = το ύψος τοιχίου, [m]

$b$  = το πλάτος του τοιχίου, [m]

### 5.3.3 Αστοχία από επίπλευση κτηρίου

Η αστοχία από επίπλευση σε κτήριο παρατηρείται σε περιπτώσεις ελαφριών κατασκευών (π.χ. ισόγειες κατοικίες κατασκευασμένες από ξύλο). Όπως φαίνεται από την εξίσωση (5.5), η δύναμη της άνωσης είναι ανάλογη με τον όγκο νερού που εκτοπίζεται π.χ. από μια κατοικία και κατά συνέπεια ανάλογη με το βάθος νερού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το μοντέλο φόρτισης – αντίστασης εφαρμόζεται για να προσδιοριστεί εάν το κτήριο θα αστοχήσει από επίπλευση ή από μετακίνηση από τη θεμελίωση του. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη ως πλημμυρική δράση μόνο η δύναμη της άνωσης και στη δεύτερη περίπτωση συμπεριλαμβάνεται η δράση των πλευρικών πιέσεων. Η αντίσταση στη δύναμη της ανώσεως ασκείται από το βάρος της κατοικίας και τη δύναμη από τις αγκυρώσεις της θεμελίωσης. Η αντίσταση στην πλευρική μετακίνηση της κατοικίας ασκείται επιπρόσθετα και από τη δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του ξύλινου δαπέδου του ισόγειου και της θεμελίωσης (π.χ. κοιτόστρωσης).

#### Επίπλευση κατοικίας

Με την παραδοχή ότι δεν έχει συμβεί αστοχία από ρηγματώση σε άνοιγμα της κατοικίας, και επομένως δεν έχει εισχωρήσει νερό στο εσωτερικό της κατοικίας, η κατοικία μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πλαίσιο γεμάτο με αέρα. Σε αυτή την περίπτωση ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού ισούται:

$$V_{\text{εκτοπιζόμενο}} = LbD \quad (5.19)$$

όπου  $L$  = το μήκος κατοικίας, [m]

$b$  = το πλάτος κατοικίας, [m]

$D$  = βάθος νερού πάνω από τη θεμελίωση, [m]

Επομένως, με δεδομένο όγκο  $V_{\text{εκτοπιζόμενο}}$ , η φόρτιση λόγω πλημμύρας ισούται με τη δύναμη της άνωσης, και υπολογίζεται από την εξίσωση (5.5). Η αντίσταση της κατοικίας είναι συνισταμένη του βάρους της κατοικίας και της δύναμης αγκυρώσεως της θεμελίωσης. Η τελευταία υπολογίζεται με βάση τις προδιαγραφές του γενικού οικοδομικού κανονισμού της κάθε χώρας.

#### Ολίσθηση κατοικίας

Η οριζόντια πλευρική δύναμη λόγω δράσης υδροδυναμικής πίεσης μπορεί να μετακινήσει ένα κτήριο π.χ. μια κατοικία από ξύλο από τη θεμελίωση του. Διακρίνουμε δύο υποπεριπτώσεις:

$$\blacksquare D > N_s H_s$$

$$F_d = p_d N_s H_s L \quad (5.20)$$

$$\blacksquare D \leq N_s H_s$$

$$F_d = p_d DL \quad (5.21)$$

όπου  $F_d$  = οριζόντια πλευρική δύναμη, Nt

$p_d$  = υδροδυναμική πίεση, Pa

$$D = d - z_f$$

$d$  = βάθος νερού, [m]

$z_f$  = ύψος θεμελίωσης πάνω από το έδαφος, [m]

$L$  = μήκος τοίχου κάθετου στη ροή, [m]

$N_s$  = αριθμός ορόφων κτηρίου

$H_s$  = ύψος ορόφου κτηρίου, [m]

Η αντίσταση του κτηρίου προέρχεται από τη δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του δαπέδου του ισογείου και της πλάκας θεμελίωσης. Το βάρος κτηρίου μειώνεται από τη δύναμη της άνωσης και κατά συνέπεια μειώνεται και η δύναμη τριβής.

$$F_T = \mu N = \mu |B - F_A| \quad (5.22)$$

όπου  $F_T$  = δύναμη τριβής μεταξύ δαπέδου ισογείου και θεμελίωσης, [Nt]

$\mu$  = συντελεστής τριβής

$N$  = αξονική δύναμη, [Nt]

$B$  = βάρος κτηρίου, [Nt]

$F_A$  = δύναμη άνωσης, [Nt]





# Κεφάλαιο 6

## Πλημμυρικό μοντέλο

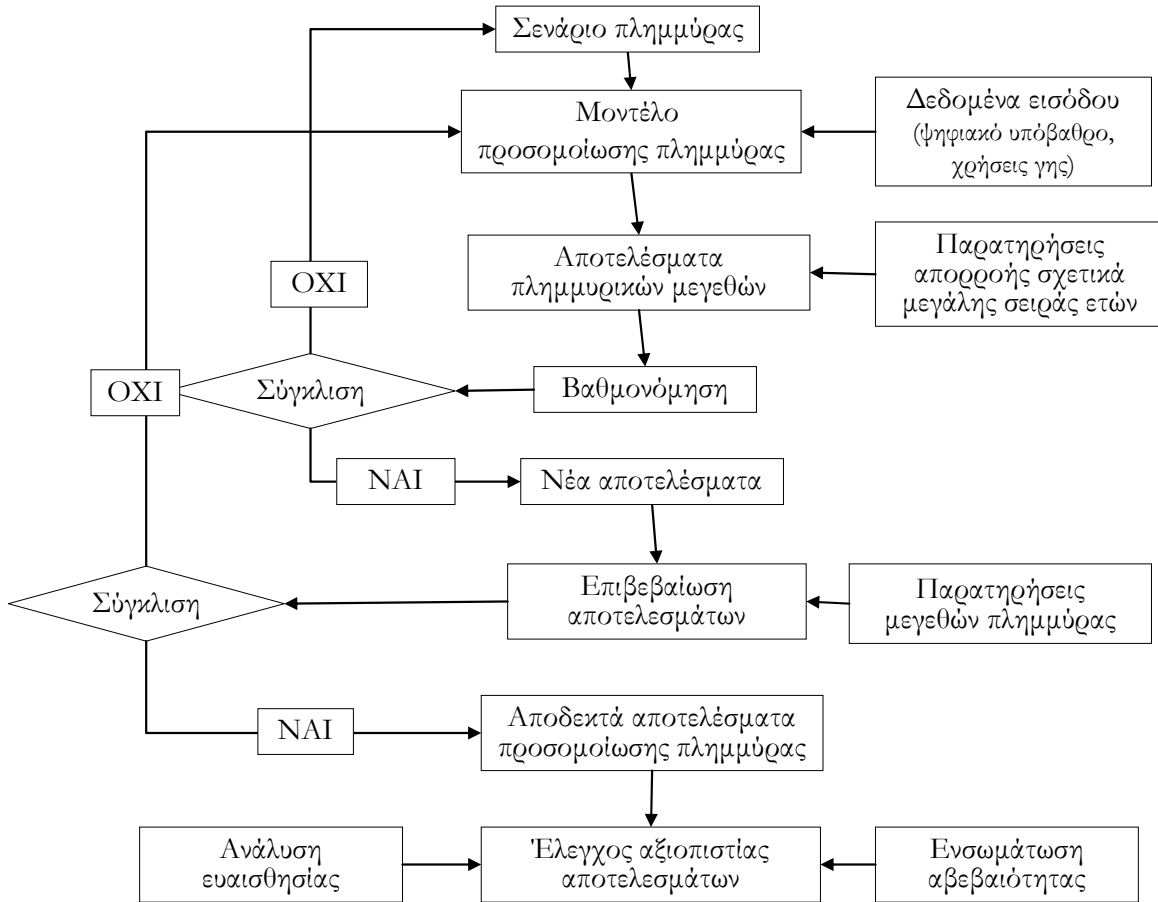
Με τον όρο πλημμυρικό μοντέλο εννοούμε τη μοντελοποίηση των κατάλληλων πλημμυρικών συνθηκών με σκοπό την εκτίμηση της αναμενόμενης άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που αναμένεται να συμβεί υπό ένα σενάριο πλημμύρας σε μια ορισμένη χωρικά περιοχή. Η αναμενόμενη ζημιά αναφέρεται στο μέγιστο μέγεθος ζημιάς που θα προκληθεί στην εξεταζόμενη περιοχή υπό ένα σενάριο πλημμύρας και κατά συνέπεια η εκτίμησή της δεν συνδέεται με πραγματικό πλημμυρικό γεγονός. Τα στάδια που απαρτίζουν τη διαδικασία μοντελοποίησης των πλημμυρικών συνθηκών παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-1. Η εφαρμογή των βημάτων στο διάγραμμα ροής εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, για παράδειγμα στην περίπτωση της ανάπτυξης περιβάλλουσας κατάκλυσης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 6-1 το πλημμυρικό μοντέλο περιλαμβάνει δυο επαναληπτικές διαδικασίες κατά την εφαρμογή του, αυτή της βαθμονόμησης βάσει παρατηρημένων τιμών απορροής μίας σχετικά μεγάλης σειράς ετών και αυτή της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων βάσει παρατηρημένων τιμών των προσομοιωμένων μεγεθών πλημμύρας. Ιδανικά, η προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος σε μία περιοχή προϋποθέτει τη διόδευση του πλημμυρικού κύματος μέσω διδιάστατου υδραυλικού μοντέλου και διαθέσιμες παρατηρήσεις απορροής μίας σχετικά μεγάλης σειράς ετών για τη βαθμονόμηση του μοντέλου αυτού. Οι παρατηρήσεις των μεγεθών πλημμύρας θα πρέπει να προέρχονται από ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα παρόμοιου τύπου πλημμύρας με τον τύπο πλημμύρας που προσομοιώνεται.

Το κεφάλαιο εστιάζει σε μία συνοπτική περιγραφή των βασικών σημείων ανάπτυξης ενός πλημμυρικού μοντέλου που απαιτείται για τους σκοπούς ανάλυσης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στο δομημένο περιβάλλον μίας εν δυνάμει πληγείσας περιοχής. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το κεφάλαιο περιλαμβάνει αποκλειστικά τις περιγραφές καθιερωμένων μοντέλων προσομοίωσης πλημμύρας που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής για τον αναγκαίο υπολογισμό των πλημμυρικών μεγεθών.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε έξι υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 6.1 προσδιορίζει τα πλημμυρικά μεγέθη τα οποία αναλύονται στις περιπτώσεις μελέτης της παρούσας διατριβής. Το υποκεφάλαιο 6.2 αναφέρεται στη μεθοδολογία διαμόρφωσης σεναρίων πλημμύρας, ενώ το υποκεφάλαιο 6.3 αναφέρεται στα συνήθη δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εφαρμογή ενός υδραυλικού μοντέλου προσομοίωσης πλημμύρας. Στο υποκεφάλαιο 6.4 περιγράφονται οι τύποι μοντέλων που απαιτούνται για την προσομοίωση πλημμύρας, όπως εί-

να τα υδρολογικά μοντέλα και τα υδραυλικά μοντέλα μονοδιάστατης και διδιάστατης διόδευσης πλημμυρικού κύματος, καθώς επίσης και ένα μοντέλο προβολής των αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Το υποκεφάλαιο 6.5 αναφέρεται στον έλεγχο αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης πλημμύρας και τέλος το υποκεφάλαιο 6.6 αναφέρεται σε κατάλληλα μέτρα απόδοσης για την αξιολόγηση των πλημμυρικών μοντέλων μεταξύ τους.



Εικόνα 6-1. Στάδια μοντελοποίησης πλημμυρικών συνθηκών

## 6.1 Πλημμυρικά μεγέθη

### 6.1.1 Βάθος νερού

Ο ορισμός του βάθους νερού διαφοροποιείται ανάλογα με το εάν το μέγεθος αναφέρεται σε εξωτερικό ή σε εσωτερικό χώρο ενός κτηρίου. Στην πρώτη περίπτωση το βάθος νερού ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της προσομοιωμένης στάθμης πλημμύρας και του φυσικού εδάφους αφού πρόκειται για αποτέλεσμα προσομοίωσης. Στην δεύτερη περίπτωση το βάθος νερού ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της παρατηρημένης στάθμης πλημμύρας και του δαπέδου του ισογείου και συνήθως πρόκειται για παρατηρημένο ίχνος στάθμης μετά το πέρας ενός πλημμυρικού γεγονότος. Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί εξαρχής στην ανάλυση ζημιών το επίπεδο αναφοράς του βάθους νερού, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η ποσοτικοποίηση

της αβεβαιότητας που εισάγεται στην ανάλυση από τον υπολογισμό του βάθους νερού.

Στην παρούσα διατριβή η ανάλυση άμεσης ζημιάς χρησιμοποιεί τη μέγιστη τιμή της μεταβλητής του βάθους νερού ή την περιβάλλουσα κατάκλυσης μιας πληγείσας περιοχής, διότι η μέγιστη τιμή είναι πιο εύκολο να καταγραφεί ή να υπολογιστεί. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει επανειλημμένα εξεταστεί και επιβεβαιωθεί η συμβολή του βάθους νερού στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον (βλέπε κεφάλαιο 5).

### 6.1.2 Γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής

Στη διεθνή βιβλιογραφία [Black 1975, Sangrey et al. 1975, Clausen 1989, Mijala et al. 2001, Kelman 2002, Roos 2003, Becker 2008] εξετάζονται διάφορες συναρτήσεις των μεγεθών βάθους νερού και ταχύτητας ροής με εμπειρικά στοιχεία ζημιάς για τη διερεύνηση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ τους. Η σχέση του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε βέλτιστα αποτελέσματα εκτίμησης της άμεσης ζημιάς στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης, οι μη γραμμικοί συνδυασμοί των δύο μεγεθών συναντούνται σε θεωρητικούς υπολογισμούς των φυσικών μηχανισμών πρόκλησης βλάβης και ενδεχόμενης αστοχίας κτηρίου, που περιγράφηκαν αναλυτικά στο εδάφιο 5.3.2.

Το γινόμενο του βάθους νερού  $d$  [m] και της ταχύτητας ροής  $v$  [m/s], το οποίο συμβολίζεται στο κείμενο ως  $dv$  και έχει μονάδα μέτρησης [m<sup>2</sup>/s], θεωρείται κρίσιμη μεταβλητή για την πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια. Σύμφωνα με τους Schwarz και Maiwald (2008) η συνάφεια και η σημασία της ταχύτητας ροής σε συνδυασμό με το βάθος νερού θα πρέπει να διερευνηθεί για την ανάπτυξη και καθιέρωση μοντέλων πρόγνωσης της ζημιάς, ειδικά όταν μία ξαφνική αλλαγή στην ταχύτητα ροής είναι αναμενόμενη λόγω υδραυλικών και τοπογραφικών τοπικών συνθηκών.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του γινομένου  $dv$  φαίνεται ότι σχετίζεται με την πλημμυρική ορμή. Γενικά σε ένα αντικείμενο σχήματος τετραγώνου (το οποίο προσεγγίζει το σχήμα ενός ισόγειου κτηρίου), η μεταβλητή  $dv$  σχετίζεται με μια ενεργητική δράση της πλημμύρας στο αντικείμενο, δια μέσου του ακόλουθου ορισμού της πλημμυρικής ορμής:

$$P = mv = \rho Vv = \rho A dv \quad (6.1)$$

όπου  $P$  = ορμή πλημμύρας, [kg m/s]

$m$  = μάζα πλημμύρας, [kg]

$V$  = όγκος πλημμύρας, [m<sup>3</sup>]

$\rho$  = πυκνότητα νερού, (= 1000 kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = ταχύτητα ροής, [m/s]

$A$  = οριζόντια πλημμυρισμένη επιφάνεια με διεύθυνση κάθετη στη ροή, [m<sup>2</sup>]

$d$  = βάθος νερού πλημμύρας, [m]

Εάν η πυκνότητα νερού  $\rho$  και η οριζόντια πλημμυρισμένη επιφάνεια  $A$ , θεωρηθούν σταθερές το μέγεθος  $dv$  αποτελεί τη μεταβλητή που καθορίζει την πλημμυρική ορμή σύμφωνα με την εξίσωση (6.1).

Ο υπολογισμός της μεταβλητής  $dv$ , υλοποιείται με βάση τις μέγιστες τιμές του βάθους νερού  $d_{max}$  και ταχύ-

τητας ροής  $v_{max}$  που προκύπτουν από την προσομοίωση πλημμύρας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η προσέγγιση είναι κατά κάποιον τρόπο συντηρητική γιατί οι μέγιστες τιμές του βάθους νερού και οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας ροής δεν συμβαίνουν κατ' ανάγκη ταυτόχρονα, αλλά ισχύει  $d_{max} v_{max} > (dv)_{max}$ .

### 6.1.3 Ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης

Στη διεθνή βιβλιογραφία το πλημμυρικό μέγεθος του ρυθμού ανύψωσης της στάθμης πλημμύρας θεωρείται ότι συμβάλλει στην πρόκληση απώλειας ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας αφού επηρεάζει το διαθέσιμο χρόνο εκκένωσης των πληγέντων από μία κατακλυσμένη περιοχή ή τον απαιτούμενο χρόνο να βρει κανείς καταφύγιο σε υψηλότερες περιοχές.

Εάν ο ρυθμός ανύψωσης της στάθμης πλημμύρας είναι μεγάλος, η πλημμυρική στάθμη ανεβαίνει ταχύτατα και αφήνει ελάχιστο διαθέσιμο χρόνο διαφυγής, πριν το βάθος νερού φτάσει περίπου στο ύψος της μέσης του ανθρώπου, οπότε η κίνηση του περιορίζεται σημαντικά [Jonkman 2007]. Επίσης, το μέγεθος αυτό φαίνεται ότι μπορεί να συμβάλλει σε κατάρρευση κτηρίου, αφού οι διαφορετικές τιμές του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής επιφάνειας προκαλούν δράση της πλευρικής υδροστατικής δύναμης στο κτήριο.

Ο ρυθμός ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης υπολογίζεται βάσει της ανάπτυξης του βάθους νερού σε ορισμένο χρονικό πλαίσιο. Επειδή αυτό το μέγεθος χρησιμοποιείται συχνά σε ανάλυση για την εκτίμηση της απώλειας ανθρώπινης ζωής λόγω πλημμύρας, ορίζεται ως ο μέσος ρυθμός ανύψωσης στάθμης σε μία θέση, από τη χρονική στιγμή άφιξης της πλημμύρας μέχρι τη χρονική στιγμή όπου η στάθμη έχει φτάσει σε βάθος νερού ίσο με 1.5 m. Η χρονική στιγμή άφιξης της πλημμύρας σε μια θέση προσδιορίζεται από την χρονική στιγμή που το βάθος νερού φτάσει σε ύψος ίσο με 30 cm. Η μέγιστη στάθμη πλημμύρας σε ύψος ίσο με 1.5 m επιλέχθηκε για τον ορισμό, διότι μεγαλύτερα βάθη νερού από το 1.5 m προσεγγίζουν το μέσο ύψος του ανθρώπου και κατά συνέπεια θεωρούνται επικίνδυνα για τον άνθρωπο. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού του μέθους του ρυθμού ανύψωσης στάθμης αποτρέπει την παραγωγή πολύ υψηλών τιμών της μεταβλητής για μικρά βάθη νερού (π.χ. για μερικά cm). Στη συνέχεια, η υψομετρική διαφορά βάθους νερού υπολογίζεται ανηγμένη για το χρονικό διάστημα μίας ώρας και επομένως η μεταβλητή του ρυθμού ανύψωσης στάθμης πλημμύρας έχει ως μονάδα μέτρησης [m/h].

## 6.2 Σενάρια πλημμύρας

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνα 6-1, η ιδανική προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος σε μία περιοχή προϋποθέτει διαθέσιμες παρατηρήσεις απορροής μίας σχετικά μεγάλης σειράς ετών για τη βαθμονόμηση του υδραυλικού μοντέλου προσομοίωσης πλημμύρας. Συνήθως όμως δεν υπάρχουν διαθέσιμες υδρομετρικές παρατηρήσεις και κρίνεται αναγκαία η μοντελοποίηση της σχέσης βροχόπτωσης – απορροής. Στα περισσότερα υδρολογικά μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής ισχύει η υπόθεση ότι οι περιοδοί επαναφοράς της βροχόπτωσης και της απορροής είναι ίσες και εφαρμόζεται η ανάλυση συχνότητας.

Συνήθης πρακτική αποτελεί η επιλογή σεναρίων πλημμύρας, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης πλημμύρας και θεωρητικά καλύπτει ένα εύρος τιμών συχνότητας εμφάνισης του φαινομένου. Εάν με  $T$  συμβολίζεται η περίοδος επαναφοράς ενός πλημμυρικού γεγονότος, τότε για την ανάλυση των μέγιστων τιμών ενός πλημμυρικού φαινομένου, η πιθανότητα υπέρβασης  $p$  του φαινομένου σε ένα

έτος ισούται με  $\frac{1}{T}$ , και κατά συνέπεια η πιθανότητα μη υπέρβασης  $(1-p)$  του φαινομένου σε ένα έτος θα

ισούται με  $(1 - \frac{1}{T})$ .

Η τελική επιλογή της περιόδου επαναφοράς για το προσδιορισμό ενός σεναρίου πλημμύρας με στόχο την ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες. Ωστόσο, σύμφωνα με τις γενικές κατευθυντήριες οδηγίες που δίνει η νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία (2007/60/EE), προτείνεται να επιλέγονται τουλάχιστον τρία σενάρια πλημμύρας τα οποία θα αντιστοιχούν σε υψηλή, μέτρια και χαμηλή συχνότητα εμφάνισης ενός πλημμυρικού γεγονότος. Σύμφωνα με την νέα Οδηγία, ένα σενάριο πλημμύρας χαρακτηρίζεται υψηλής συχνότητας εμφάνισης όταν η πιθανότητα υπέρβασης πλημμύρας κυμαίνεται από 0.2 έως 0.1, ενώ ένα σενάριο χαρακτηρίζεται μέτριας και χαμηλής συχνότητας εμφάνισης όταν η πιθανότητα υπέρβασης πλημμύρας κυμαίνεται από 0.02 έως 0.01 και από 0.002 έως 0.001 αντίστοιχα (ή διαφορετικά, οι τιμές περιόδου επαναφοράς κυμαίνονται από 50 έως 100 έτη και από 500 έως 1000 έτη αντίστοιχα). Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις που τα τρία σενάρια πλημμύρας δεν επαρκούν για να περιγράψουν πλήρως το εύρος της συχνότητας εμφάνισης πλημμύρας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ολοκλήρωσης της καμπύλης της συχνότητας εμφάνισης πλημμύρας έναντι ζημιάς απαιτείται να ληφθούν υπόψη περισσότερες από τρεις πιθανότητες υπέρβασης μιας πλημμύρας [Tsakiris et al. 2009].

## 6.3 Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος αναφέρονται συνήθως σε χωρικά δεδομένα, που περιλαμβάνουν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τον ψηφιακό χάρτη χρήσεων γης. Τα ψηφιακά αυτά προϊόντα, συνιστούν την πιο πρόσφατα επικαιροποιημένη πληροφορία για την τοπογραφία και τις υφιστάμενες χρήσεις γης της υπό μελέτη περιοχής και επομένως αποτελούν αναγκαίο υπόβαθρο για την προσαρμογή της προσομοίωσης μιας πλημμύρας στις τοπικές συνθήκες της περιοχής.

### 6.3.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ)

Ως «ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ)» ορίζεται το σύνολο των προσδιορισμένων σημείων που περιγράφει αυστηρώς την επιφάνεια του εδάφους και δεν περιλαμβάνει στην περιγραφή αυτή τα φυσικά ή τεχνητά υπερκείμενα στοιχεία, π.χ. βλάστηση, ιτσίματα, έργα υποδομής κ.τ.λ. [Kraus 2003]. Εν προκειμένω, θα πρέπει να τονιστεί ότι τα υπερκείμενα στοιχεία στο ΨΜΕ λειτουργούν ως εμπόδια στην απορροή του νερού, και σε πρώτη φάση αγνοούνται στην προσομοίωση του εδάφους. Η ύπαρξή τους λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση του πλημμυρικού φαινομένου με έμμεσο τρόπο μέσω του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους.

Τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται για την παραγωγή του ΨΜΕ συνοψίζονται στα: (α) συλλογή αεροφωτογραφιών (Α/Φ), (β) μέτρηση φωτοσταθερών, (γ) επίλυση αεροτριγωνισμού – προσανατολισμός αεροφωτογραφιών (Α/Φ), (δ) παραγωγή ΨΜΕ και (ε) παραγωγή ορθοφωτογραφίας κλίμακας 1:5 000.

Για την παραγωγή του ΨΜΕ χρησιμοποιούνται έγχρωμες Α/Φ της πιο πρόσφατης φωτοληψίας ώστε η εξαγωγή πληροφορίας να ανταποκρίνεται στην υφιστάμενη κατάσταση. Η μετατροπή των Α/Φ σε ψηφιακή εικόνα γίνεται σε ειδικό φωτογραμμετρικό σαρωτή. Με την επίλυση του αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο των δεσμών προσδιορίζεται ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων με ορισμένη οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $x$  και κατά  $y$  και ορισμένη υψομετρική ακρίβεια. Δεδομένου ότι η μέγιστη ακρίβεια για κλίμακα προϊόντος 1:5 000 είναι το 1 m (η τιμή αυτή προκύπτει, εάν πολλαπλασιαστεί η τιμή της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου ματιού, ίση με 0.2 mm, με την κλίμακα του τελικού προϊόντος) οι ακρίβειες θεωρούνται ι-διαίτερα ικανοποιητικές για προσομοίωση πλημμύρας όταν υπολογίζονται μικρότερες του 0.3 m.

Το επόμενο στάδιο είναι η εξαγωγή του ΨΜΕ στη μορφή κανονικού καννάβου. Το βήμα του καννάβου κυμαίνεται εμπειρικά από 0.2 έως 1 cm στην κλίμακα της ορθοφωτογραφίας που διατίθεται. Για παράδειγμα, για ορθοφωτογραφία κλίμακας 1:5 000 το βήμα καννάβου θα πρέπει να κυμαίνεται από 10 έως 50 m. Όσο πιο μικρό είναι το βήμα καννάβου, δηλαδή όσο πιο υψηλή η διακριτοποίηση του ΨΜΕ τόσο πιο λεπτομερέστερη είναι η απόδοση του ανάγλυφου της περιοχής στο ΨΜΕ [Kraus 2003, Tsakiris et al. 2008].

### 6.3.2 Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης

Με δεδομένο το ΨΜΕ της περιοχής ενδιαφέροντος και γνωστούς τους προσανατολισμούς των Α/Φ είναι δυνατό να εξαχθούν με αυτοματοποιημένη διαδικασία ψηφιακές ορθοφωτογραφίες για την περιοχή και να συνταχθεί ψηφιακό ορθοφωτο-μωσαϊκό της περιοχής, δηλαδή ψηφιακός χάρτης σε συγκεκριμένη κλίμακα και σε εικονιστική μορφή. Η ορθοφωτογραφία είναι μια μετασχηματισμένη εικόνα της αρχικής σε ορθή προβολή, δηλαδή μία εικόνα απαλλαγμένη από τις παραμορφώσεις της αρχικής Α/Φ λόγω στρωφών και ανάγλυφου. Έτσι έχει ενιαία κλίμακα και επίσης ακρίβεια που ανταποκρίνεται στην κλίμακα σύνταξής της. Για παράδειγμα ψηφιακές ορθοφωτογραφίες και αντίστοιχος ορθοφωτοχάρτης μπορεί να συνταχθούν σε κλίμακα 1:5 000 με το μέγεθος της εδαφοψηφίδας των ορθοφωτογραφιών να είναι ίσο με 0.35 m.

Με βάση το ψηφιακό ορθοφωτο-μωσαϊκό που προκύπτει από την ανάλυση της φωτογραμμετρίας, είναι δυνατόν να ψηφιοποιηθούν πολύγωνα χρήσεων γης σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών από ειδικούς της φωτοερμηνείας, σύμφωνα με τις κατηγορίες χρήσεων γης που ενδιαφέρουν για ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή ενδιαφέροντος σε συγκεκριμένο σύστημα γεωαναφοράς.

## 6.4 Μοντέλα προσομοίωσης πλημμύρας

### 6.4.1 Μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής

Τα μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής ή υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ελλείψει δικτύου υδρομετρικών παρατηρήσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η καθιερωμένη διαδικασία των υδρολογικών υπολογισμών περιλαμβάνει αρχικά την εξαγωγή της τοπικής σημειακής όμβριας καμπύλης βάσει των διαθέσιμων στοιχείων του πλησιέστερου βροχογράφου και την αναγωγή της σε επιφανειακή και στη συνέχεια την εξαγωγή του υδρογραφήματος άμεσης απορροής της λεκάνης απορροής που βρίσκεται ανάντη της περιοχής ενδιαφέροντος.

Γενικά, στους υδρολογικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται η όμβρια καμπύλη της μορφής:

$$i = \frac{aT^b}{t^c} \quad (6.2)$$

όπου  $i$  = ένταση βροχής σχεδιασμού, [mm/h]

$T$  = περίοδος επαναφοράς, [yr]

$t$  = διάρκεια βροχής σχεδιασμού, [h]

$a, b, c$  = αδιάστατοι συντελεστές

Πιο λεπτομερής αναφορά για τις διαθέσιμες μορφές όμβριας καμπύλης και τη μέθοδο αναγωγής από σημειακή σε επιφανειακή καμπύλη παρατίθεται στο υποκεφάλαιο Π6.1 (Τόμος II).

Συνήθης πρακτική για την εξαγωγή του υδρογραφήματος σχεδιασμού άμεσης απορροής αποτελεί η διαίρεση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής, η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος και το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS του Σώματος Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ.

### **Μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος**

Η τυποποιημένη υπολογιστική διαδικασία που έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό υδρογραφήματος σχεδιασμού άμεσης απορροής (ΥΑΑ) σε κάθε υπολεκάνη απορροής για κάθε σενάριο πλημμύρας, ακολουθεί τα εξής στάδια: (α) παραγωγή συνθετικού τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, (β) παραγωγή συνθετικού υετογράμματος σχεδιασμού και (γ) παραγωγή υδρογραφήματος άμεσης απορροής. Η διαδικασία στηρίζεται σε βασικές αρχές της τεχνικής υδρολογίας και περιλαμβάνει υπολογισμούς τυποποιημένης μεθοδολογίας, οι οποίοι παρατίθενται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο Π6.2 (Τόμος II).

### **Υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS**

Το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) είναι ένα από πιο διαδεδομένα εμπορικά προγράμματα υδρολογικών υπολογισμών και αναπτύχθηκε ως ελεύθερο λογισμικό στα τέλη της δεκαετίας του '80 από το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ. Από τότε, αναπροσαρμόζεται και αναβαθμίζεται συνεχώς. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση HEC-HMS v.3.4.

Πρόκειται για ένα ευρύτατα διαδεδομένο πρόγραμμα μοντελοποίησης διεργασιών βροχόπτωσης - απορροής σε λεκάνες απορροής δενδρικού τύπου [HEC-HMS 2009a]. Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο HEC-HMS για τον υπολογισμό υδρογραφήματος άμεσης απορροής διακρίνονται σε δεδομένα εισόδου: (α) για το μοντέλο βροχόπτωσης και (β) για το μοντέλο περιγραφής της λεκάνης απορροής.

Το μοντέλο βροχόπτωσης απαιτεί τον προσδιορισμό της περιόδου επαναφοράς  $T$  ενός σεναρίου πλημμύρας, της διάρκειας  $t$  της βροχής σχεδιασμού, του χρονικού βήματος υπολογισμού και της χρονικής κατανομής της έντασης της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος.

Το μοντέλο της λεκάνης απορροής αφορά το μετασχηματισμό βροχόπτωσης σε απορροή. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους μετασχηματισμού είναι η μέθοδος του κινηματικού κύματος, ενώ η πιο συνηθισμένη μέθοδος εκτίμησης του περισεύματος βροχόπτωσης είναι η μέθοδος απώλειας της Soil Conservation Service. Συνήθως, η λεκάνη απορροής διαιρείται σε υπολεκάνες και ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο χρησιμοποιούνται γεωμετρικά στοιχεία των υπολεκάνων, όπως είναι το μήκος υδατορεύματος, η κλίση πυθμένα του υδατορεύματος και το εμβαδό της υπολεκάνης. Επίσης, γίνονται παραδοχές σε ό,τι αφορά το σχήμα διατομής κάθε ρέματος, τον αριθμό καμπύλης  $CN$  για τον χαρακτηρισμό της διηθητικότητας του εδάφους και την χρήση γης, την τραχύτητα του φυσικού εδάφους και την εκτίμηση της βασικής ροής των ρεμάτων. Οι τεχνικές λεπτομέρειες για την εφαρμογή του προγράμματος HEC-HMS περιγράφονται αναλυτικά στο αντίστοιχο εγχειρίδιο χρήστη [HEC-HMS 2009b].

## 6.4.2 Μοντέλα μονοδιάστατης (1D) προσομοίωσης

Το θεωρητικό υπόβαθρο ασταθούς μονοδιάστατης ροής ασυμπιέστων ρευστών μέσα σε αγωγούς δίνεται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων συνέχειας και διατήρησης ορμής (εξισώσεις St. Venant) [Γερζίδης 1997]:

$$\text{Εξίσωση συνέχειας: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (ub)}{\partial x} = 0 \quad (6.3)$$

$$\text{Εξίσωση διατήρησης ορμής: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{u|u|}{C^2 b} + au|u| = 0 \quad (6.4)$$

όπου  $\zeta$  = βάθος ροής πάνω από το επίπεδο αναφοράς, [m]

$t$  = χρόνος, [s]

$b$  = ολικό βάθος ροής ( $\zeta$  + βάθος ροής κάτω από το επίπεδο αναφοράς), [m]

$u$  = ταχύτητα ροής στη διεύθυνση  $x$ , [m/s]

$C$  = συντελεστής Chézy, [m<sup>1/2</sup>/s]

### Υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS

Το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) είναι επίσης ένα από πιο εμπορικά προγράμματα υδραυλικών υπολογισμών και αναπτύχθηκε όπως και το HEC-HMS ως ελεύθερο λογισμικό από το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ. Από τα τέλη της δεκαετίας του '80 συνεχώς αναβαθμίζεται και στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση HEC-RAS v.3.1.3.

Το πρόγραμμα εκτελεί μονοδιάστατη διόδευση υδρογραφήματος άμεσης απορροής μέσω ρέματος με την απλοποιητική παραδοχή της μόνιμης (βαθμιαία μεταβαλλόμενης) ροής. Το υπολογιστικό μοντέλο μπορεί να χειριστεί πλήρες δίκτυο ρεμάτων δενδρικής μορφής. Η βασική υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στην επίλυση της εξίσωσης συνέχειας (βλέπε εξίσωση (6.3)). Οι απώλειες ενέργειας εκτιμώνται από την τριβή (εξίσωση Manning) και τη διαστολή/συστολή (συντελεστής που πολλαπλασιάζεται με τη διαφορά της κινητικής ενέργειας). Η εξίσωση της αρχής διατήρησης της ορμής (βλέπε εξίσωση (6.4)) χρησιμοποιείται σε καταστάσεις, όπου η στάθμη της επιφάνειας του νερού μεταβάλλεται ραγδαία, όπως στη συμβολή ρεμάτων σε ένα κόμβο [HEC-RAS 2004].

Για την εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών της διόδευσης υδρογραφήματος άμεσης απορροής με τη χρήση του προγράμματος HEC-RAS, απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι: (α) η γεωμετρία του δικτύου, η οποία δίνεται από τις διατομές κάθε υδατορεύματος του δικτύου. Οι θέσεις των διατομών επιλέγονται από τον χρήστη με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιγράφεται με τον πληρέστερο δυνατό τρόπο η γεωμετρία του υδατορεύματος. Επομένως, το πλάτος των διατομών και η απόσταση μεταξύ τους διαμορφώνονται ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής, (β) τα στοιχεία ροής, τα οποία στην περίπτωση της μόνιμης ροής αποτελούν οι αιχμές των πλημμυρογραφημάτων των υπολεικάνων που ανήκουν τα ρέματα υπό μελέτη, και ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών ροής. Η εισαγωγή των αιχμών πλημμύρας γίνεται στα πιο ανάντη σημεία του δικτύου και σε επιλεγμένα σημεία αλλαγής της παροχής (π.χ. στην έξοδο κάθε υπολεικάνης) και (γ) άλλες υδραυλικές παράμετροι (π.χ. υδραυλική τραχύτητα κλπ).



## Υπολογιστικό πρόγραμμα BOSS DAMBRK

Το υπολογιστικό πρόγραμμα BOSS DAMBRK v.88 είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα μονοδιάστατης διόδευσης πλημμυρικού κύματος. Διατίθεται εμπορικά από την αμερικανική εταιρεία BOSS, αλλά ουσιαστικά πρόκειται για μια αναβαθμισμένη έκδοση του προγράμματος πρόγνωσης πλημμύρας από θραύση φράγματος DAMBRK (Dam-break flood forecasting model) του 1988 της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (National Weather Service). Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του υδρογραφήματος εκροής που προκύπτει από την αστοχία ενός φράγματος και την υδραυλική διόδυσή του στην περιοχή κατάντη του φράγματος.

Το πρόγραμμα αποτελείται από δύο μέρη: (1) την περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας του φράγματος, δηλαδή την χρονική και γεωμετρική περιγραφή του χάσματος και (2) τον υπολογιστικό αλγόριθμο, (α) για τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος εκροής από το χάσμα ανάλογα με το σχήμα του χάσματος, το υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα, τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης στον ταμιευτήρα και τα χαρακτηριστικά του υπερχειλιστή στο φράγμα και (β) για τη διόδυση του υδρογραφήματος εκροής στην κατάντη περιοχή λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της περιοχής και την τραχύτητα εδάφους.

Το φαινόμενο υπερπήδησης του φράγματος προσομοιώνεται στο μοντέλο υπολογισμού χάσματος του προγράμματος που αφορά την περιγραφή της χρονικής και γεωμετρικής εξέλιξης του χάσματος. Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο υπολογισμού χάσματος μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τις εμπειρικές εξισώσεις του Froehlich [Froehlich 1995]. Οι εξισώσεις Froehlich έχουν εξαχθεί βάσει παρατηρήσεων σε 63 χωμάτινα φράγματα και εκτιμούν το μέσο πλάτος  $B$  ενός χάσματος τραπεζοειδούς σχήματος και τον χρόνο σχηματισμού του  $t_f$ , ανάλογα με τον τύπο αστοχίας φράγματος, τον όγκο του ταμιευτήρα και το τελικό ύψος του χάσματος. Δεδομένου ότι ο υπολογισμός του υδρογραφήματος εκροής εξαρτάται άμεσα από την χρονική και γεωμετρική εξέλιξη του χάσματος, ο εμπειρικός τρόπος υπολογισμού του μοντέλου χάσματος οδηγεί σε μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων του υδρογραφήματος εκροής.

Ο υπολογιστικός αλγόριθμος του προγράμματος βασίζεται στις πλήρεις εξισώσεις St. Venant μη μόνιμης μονοδιάστατης ροής, οι οποίες συνδυάζονται με εσωτερικές και εξωτερικές οριακές συνθήκες. Οι εσωτερικές οριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τη ραγδαία μεταβαλλόμενη ροή (ευρείας στέψης) μέσω κατασκευών, όπως είναι τα φράγματα και αναχώματα, στα οποία μπορεί να αναπτυχθεί ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο ρήγμα. Επίσης, χρησιμοποιούνται κατάλληλες εξωτερικές οριακές συνθήκες στο ανάντη και κατάντη άκρο της διαδρομής διόδευσης. Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων επιλύεται με ένα αριθμητικό σχήμα πεπερασμένων διαφορών μη γραμμικής πεπλεγμένης μορφής, που επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν χωροχρονικά βήματα στη διαδικασία επίλυσης. Η ροή μπορεί να υπολογιστεί ως υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ή μεικτή ροή που μεταβάλλεται στο χώρο και στο χρόνο.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος DAMBRK διατίθενται στις θέσεις ενδιαφέροντος της κατάντη περιοχής σε υπολογιστική, αναλυτική μορφή και σε γραφική μορφή και συνοψίζονται στα εξής: (α) χρόνο άφιξης του κύματος, (β) μέγιστη στάθμη βάρους νερού (από όπου θα προσδιοριστεί η έκταση της περιοχής κατάκλυσης), (γ) υδρογράφημα του πλημμυρικού κύματος και (δ) μέση ταχύτητα ροής για όλο το πλάτος της διατομής. Περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες για το θεωρητικό υπόβαθρο και την εφαρμογή του προγράμματος DAMBRK περιγράφονται αναλυτικά στο αντίστοιχο εγχειρίδιο του χρήστη [BOSS DAMBRK 2000].

### 6.4.3 Μοντέλα μονοδιάστατης/διδιάστατης (1D/2D) προσομοίωσης

Το θεωρητικό υπόβαθρο ασταθούς διδιάστατης ροής ασυμπιέστων ρευστών μέσα σε αγωγούς δίνεται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων συνέχειας και διατήρησης ορμής (εξισώσεις St. Venant) [Γεωζίδης 1997]:

$$\text{Εξίσωση συνέχειας: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(ub)}{\partial x} + \frac{\partial(vb)}{\partial y} = 0 \quad (6.5)$$

$$\text{Εξίσωση διατήρησης ορμής: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{u|V|}{C^2 b} + au|u| = 0 \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{v|V|}{C^2 b} + av|v| = 0 \quad (6.7)$$

όπου  $\zeta$  = βάθος ροής πάνω από το επίπεδο αναφοράς, [m]

$t$  = χρόνος, [s]

$b$  = ολικό βάθος ροής ( $\zeta$  + βάθος ροής κάτω από το επίπεδο αναφοράς), [m]

$u$  = ταχύτητα ροής στη διεύθυνση  $x$ , [m/s]

$v$  = ταχύτητα ροής στη διεύθυνση  $y$ , [m/s]

$V$  = ταχύτητα ροής:  $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$ , [m/s]

$C$  = συντελεστής Chezy, [m<sup>1/2</sup>/s]

$a$  = συντελεστής τριβής, [1/m]

#### Υπολογιστικό πρόγραμμα 1D2D SOBЕК

Το πρόγραμμα Sobek 1D2D αναπτύχθηκε από την εταιρεία WL-Delft Hydraulics στην Ολλανδία για την προσομοίωση της διδιάστατης δυναμικής συμπεριφοράς της επιφανειακής ροής σε αρχικά ξηρό έδαφος. Η πλημμύρα προσομοιώνεται με τη σύζευξη μονοδιάστατου (1D) δικτύου καναλιών και διδιάστατου (2D) ορθογωνικού καννάβου της περιοχής κατάκλισης, τα οποία επιλύονται ταυτόχρονα από το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας ένα σταθερό αριθμητικό σχήμα επίλυσης πεπερασμένων διαφορών, γνωστό ως “Delft Scheme” [Robertson et al. 1988]. Το “Delft Scheme” απαρτίζεται από τις εξισώσεις (6.3) και (6.4) για τη μονοδιάστατη ροή και τις εξισώσεις (6.5), (6.6) και (6.7) για τη διδιάστατη ροή. Αυτό το αριθμητικό σχήμα επίλυσης είναι ικανό να διαχειριστεί απότομες κλίσεις εδάφους, υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη επιφανειακή ροή. Επίσης, προσομοιώνει εύκολα ρήγματα σε αναχώματα, χρησιμοποιώντας καμπύλες ελέγχου ροής και άλλα σημεία ρύθμισης ροής, που εισάγονται στο μονοδιάστατο (1D) σύστημα. Γενικά, οι οριακές συνθήκες (π.χ. κανάλια και υδάτινα σώματα που περιλαμβάνουν τις υποπεριοχές εισάγονται στη μοντελοποίηση μέσω του μονοδιάστατου (1D) συστήματος, ενώ τα αποτελέσματα της διδιάστατης (2D) προσομοίωσης υπολογίζονται στο κέντρο κάθε φατνίου του ορθογώνιου καννάβου της περιοχής κατάκλισης.

#### 6.4.4 Μοντέλο προβολής πλημμυρικής προσομοίωσης σε περιβάλλον ΓΣΠ

Το Hydrologic Engineering Center σε συνεργασία με το Environmental Systems Research Institute ανέπτυξε το 2000 μια εργαλειοθήκη σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), η οποία ονομάστηκε HEC-GeoRAS [HEC-GeoRAS 2005]. Το HEC-GeoRAS παρέχει στον χρήστη ένα σύνολο λειτουργιών και δυνατοτήτων για την εισαγωγή δεδομένων γεωμετρίας από το περιβάλλον ΓΣΠ στο πρόγραμμα HEC-RAS και αντίστροφα, για την εξαγωγή υδραυλικών αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα HEC-RAS σε περιβάλλον ΓΣΠ.

Συγκεκριμένα το HEC-GeoRAS δημιουργεί ένα αρχείο δεδομένων γεωμετρίας διανυσματικής μορφής βάσει ψηφιακού μοντέλου εδάφους, το οποίο είναι σε μορφή κατάλληλη για εισαγωγή στο πρόγραμμα HEC-RAS. Μετά την περάτωση των υδραυλικών υπολογισμών στο πρόγραμμα HEC-RAS, οι υπολογισμένες στάθμες πλημμύρας μπορούν να εξαχθούν πίσω σε περιβάλλον ΓΣΠ για την παραγωγή και προβολή του αντίστοιχου πλημμυρικού πεδίου μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου αρχείου ανταλλαγής στοιχείων που παράγει η εργαλειοθήκη HEC-GeoRAS. Η παραγωγή χάρτη πλημμυρικού πεδίου εκτελείται χρησιμοποιώντας τα υψόμετρα των μέγιστων βαθών νερού στις διατομές, τα οποία προσδιορίζονται με βάση το πλάτος των διατομών. Με άλλα λόγια το πλάτος κατάκλυσης πλημμύρας περιορίζεται από το προκαθορισμένο πλάτος της εκάστοτε διατομής, ενώ για τις ενδιάμεσες περιοχές μεταξύ των διατομών εφαρμόζεται η διαδικασία της γραμμικής παλινδρόμησης. Ο τελικός χάρτης πλημμύρας που προκύπτει αποτελεί αρχείο του ΓΣΠ και είναι αποτέλεσμα μιας επαναληπτικής διαδικασίας εισαγωγής και διόρθωσης γεωμετρίας στο υδραυλικό πρόγραμμα HEC-RAS και εξαγωγής υδραυλικών υπολογισμών πίσω στο ΓΣΠ.

Η εργαλειοθήκη HEC-GeoRAS λειτουργεί μόνο σε περιβάλλον ΓΣΠ και για την εφαρμογή της απαιτείται ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε ψηφιδωτή μορφή κανναβικής δομής. Το HEC-GeoRAS έχει τη δυνατότητα να οπτικοποιήσει με τη μορφή χάρτη την χωρική κατανομή δύο συγκεκριμένων υδραυλικών μεταβλητών: το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής. Όλη η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων γεωμετρίας από το ΓΣΠ στο πρόγραμμα HEC-RAS, και επίσης η εξαγωγή και προβολή των υδραυλικών υπολογισμών στο ΓΣΠ είναι τυποποιημένη και περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του χρήστη του HEC-GeoRAS [HEC-GeoRAS 2005].

### 6.5 Αξιοπιστία αποτελεσμάτων προσομοίωσης πλημμύρας

Από το διάγραμμα ροής της Εικόνας 6-1 φαίνεται ότι ο έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης θα πρέπει να περιλαμβάνεται στην ανάπτυξη ενός πλημμυρικού μοντέλου. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το βαθμό αβεβαιότητας που έχει ενσωματωθεί στα αποτελέσματα κατά τη διαδικασία υπολογισμού τους και την ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε βασικές παραμέτρους των μοντέλων προσομοίωσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 3.3.2., η επίκτητη αβεβαιότητα μπορεί να οφείλεται στη μοντελοποίηση ή στη στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Στην περίπτωση ανάπτυξης πλημμυρικού μοντέλου, η επίκτητη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των πλημμυρικών μεγεθών θεωρούμε ότι οφείλεται κυρίως: (α) στην ποιότητα των δεδομένων εισόδου και (β) στην αναγωγή των προσομοιωμένων μεγεθών στη μονάδα χωρικής ανάλυσης. Για παράδειγμα, για την ποσοτικοποίηση του σφάλματος στον υπολογισμό του προσομοιωμένου βάθους νερού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το σφάλμα που προέρχεται από τον υπολογισμό του υψόμετρου εδάφους, διότι το βάθος νερού προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Βάθος νερού} = \text{Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας πλημμύρας} - \text{Υψόμετρο φυσικού εδάφους} \quad (6.8)$$

Το σφάλμα στο υψόμετρο εδάφους οφείλεται: (α) στην υψομετρική ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ) και (β) στην αναγωγή της τιμής υψόμετρου εδάφους από κάθε φατνίο του ΨΜΕ στην ανηγμένη τιμή που αντιστοιχεί σε μια επιλεγμένη χωρική μονάδα ανάλυσης (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο).

Στην περίπτωση (α), κάθε φατνίο ενός ΨΜΕ κανναβικής δομής (raster) έχει μια ορισμένη τιμή υψόμετρου εδάφους. Η υψομετρική ακρίβεια σε ένα ΨΜΕ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι τα διαθέσιμα δεδομένα (αεροφωτογραφίες, μέθοδος LIDAR), η μέθοδος εξαγωγής του ΨΜΕ (αυτόματη ή ημιαυτόματη), η δεξιάτητα του χειριστή, το ανθρώπινο λάθος επιτόπιων μετρήσεων για σημεία ελέγχου (check points) κτλ. Επομένως, η υψομετρική ακρίβεια ενός ΨΜΕ προσδιορίζεται πολύ δύσκολα. Για την περίπτωση προσομοίωσης πλημμύρας, η υψομετρική ακρίβεια θεωρείται αποδεκτή, όταν η απόλυτη ακρίβεια των σημείων του ΨΜΕ ως προς ένα σταθερό σημείο εκτιμάται ίση με  $\pm 0.50$  m και κατά συνέπεια η αντίστοιχη σχετική ακρίβεια των σημείων θα είναι πολύ μεγαλύτερη. Εάν θεωρηθεί ότι το σφάλμα στο υψόμετρο εδάφους σε ένα φατνίο ΨΜΕ ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή ίση με 0, τότε η ποσοτικοποίησή του μπορεί να προσεγγιστεί από την τιμή της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , στην κατανομή. Κατά παραδοχή, το σφάλμα αυτό θεωρείται ότι είναι το ίδιο σε όλα τα φατνία ενός ΨΜΕ.

Στην περίπτωση (β), η αναγωγή της τιμής του υψόμετρου εδάφους από το φατνίο σε μια μεγαλύτερη χωρική μονάδα ανάλυσης (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο) προκαλεί πρόσθετο σφάλμα στη τιμή του υψόμετρου εδάφους. Το οικοδομικό τετράγωνο καλύπτει μια επιφάνεια, στην οποία το υψόμετρο εδάφους είναι μεταβλητό, ενώ με την αναγωγή θα πρέπει να αντιπροσωπεύεται μόνο από μία τιμή. Σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο  $i$  ( $OT_i$ ) μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή υψόμετρου εδάφους από το σύνολο τιμών που αντιστοιχούν στα φατνία του ΨΜΕ που περιλαμβάνονται σε αυτό. Το εύρος των τιμών αυτών, δηλαδή ( $OT_{i,max} - OT_{i,min}$ ) θεωρείται προσεγγιστικά ίσο με 4 τυπικές αποκλίσεις σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο  $i$  [IPEΓ 2007a]. Το σφάλμα λόγω μεταβλητότητας του υψόμετρου εδάφους σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο προσεγγίζεται από μια μέση τιμή σφαλμάτων (τυπικής απόκλισης) που θεωρείται ότι είναι ίδια για όλα τα οικοδομικά τετράγωνα που περιέχονται στο ΨΜΕ. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση (6.9) υπολογίζει τη μέση τυπική απόκλιση  $SD_i$ , δηλαδή το σφάλμα λόγω αναγωγής της τιμής υψόμετρου εδάφους από φατνίο σε οικοδομικό τετράγωνο.

$$SD_i = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad (6.9)$$

όπου  $\sigma_i$  = η τυπική απόκλιση σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο  $i$ , όπου  $\sigma_i = \frac{OT_{i,max} - OT_{i,min}}{4}$

$N$  = ο αριθμός οικοδομικών τετραγώνων  $i$  που περιλαμβάνονται στο ΨΜΕ

Συνοψίζοντας, το ολικό σφάλμα στο υψόμετρο εδάφους σε ένα οικοδομικό τετράγωνο  $i$ , ισούται με το άθροισμα των τετραγώνων των προαναφερθέντων σφαλμάτων με την υπόθεση της ανεξαρτησίας των δυο πηγών προέλευσης σφάλματος, δηλαδή:

$$Error_{ολ,i}^2 = Error_{εδάφους,i}^2 + Error_{αναγωγής,i}^2 = \sqrt{\sigma_{εδάφους,i}^2 + SD_i^2} \quad (6.10)$$

Η τιμή  $Error_{ολ}$  θεωρείται ίδια για όλα τα οικοδομικά τετράγωνα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να θεωρηθεί

ότι το υψόμετρο εδάφους για κάθε οικοδομικό τετράγωνο εκφράζεται με μια κανονική κατανομή με μέση τιμή που υπολογίζεται από το σύνολο των τιμών του υψόμετρου και τυπική απόκλιση ίση με  $Error_{oi}$ . Από την εξίσωση (6.8) η ποσοτικοποίηση αυτή της αβεβαιότητας επεκτείνεται και στον υπολογισμό του βάθους νερού.

## 6.6 Μέτρα απόδοσης των μοντέλων πλημμύρας

Στο υποκεφάλαιο 6.4 περιγράφονται συνοπτικά τα μοντέλα προσομοίωσης πλημμύρας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, τα οποία διακρίνονται σε μοντέλα μονοδιάστατης (1D) και μονοδιάστατης/διδιάστατης (1D/2D) προσομοίωσης. Η επιλογή του μοντέλου προσομοίωσης για κάθε περίπτωση μελέτης υλοποιείται με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου (ψηφιακά υπόβαθρα, χρήσεις γης) και εξόδου (παρατηρήσεις πλημμυρικών μεγεθών) σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, όταν υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστούν και τα δυο μοντέλα προσομοίωσης στην ίδια περιοχή μελέτης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων με τις παρατηρημένες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών δίνει τη δυνατότητα να αξιολογηθεί η απόδοση των μοντέλων και να επιλεγεί η βέλτιστη λύση.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-1, αξιολογείται η απόδοση των παρακάτω μοντέλων: (α) γραμμική παρεμβολή των τιμών βάθους νερού μεταξύ των θέσεων παρατηρημένων τιμών βάθους νερού και εξαγωγή της περιοχής κατάκλισης. (β) θεώρηση μονοδιάστατης (1D) ροής για την προσομοίωση της διόδευσης πλημμυρικού κύματος και (γ) θεώρηση μονοδιάστατης (1D) ροής για την ανάπτυξη οριακών συνθηκών και διδιάστατου (2D) πεδίου πλημμύρας

Η αξιολόγηση της απόδοσης γίνεται με βάση τα παρακάτω μέτρα απόδοσης που υπολογίζονται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων με τις παρατηρημένες τιμές των μεγεθών: (1) για το βάθος νερού, (α) η μεροληψία (bias), (β) το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error), (γ) η τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (root mean square error) και (2) για την έκταση κατάκλισης, ο δείκτης κατακλισμένης επιφάνειας, δηλαδή το κλάσμα της κατακλισμένης περιοχής προς την ολική περιοχή.

Πίνακας 6-1. Μέτρα απόδοσης των πλημμυρικών μοντέλων που εξετάζονται

	Βάθη νερού		Έκταση κατάκλισης
	Τυπικό σφάλμα [m]	Σφάλμα τετραγωνικής ρίζας μέσων τετραγωνισμένων υπολοίπων m]	Δείκτης κατακλισμένης επιφάνειας [%]
Γραμμική παρεμβολή			√
1D προσομοίωση		√	√
1D/2D προσομοίωση	√	√	√

Τα αποτελέσματα της απόδοσης των μοντέλων προσομοίωσης με βάση τα παραπάνω μέτρα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τοπογραφία της περιοχής μελέτης. Όταν, για παράδειγμα, πρόκειται για διόδευση πλημμυρικού κύματος σε μία στενή κοιλάδα αναμένεται ότι όλα τα υδραυλικά μοντέλα θα προσομοιώσουν την έκταση της κατακλισμένης περιοχής πολύ κοντά στην πραγματικότητα και κατά συνέπεια ο δείκτης κατακλισμένης επιφάνειας θα έχει παρόμοιες τιμές για όλα τα μοντέλα. Επίσης, η ευαισθησία των αποτελεσμά-

των προσομοίωσης στις μεταβολές των τιμών διάφορων βασικών παραμέτρων των μοντέλων προσομοίωσης προτείνεται να ελέγχεται στο τέλος της διαδικασίας προσομοίωσης. Η επίδραση παραμέτρων, όπως είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning και ο αριθμός καμπύλης CN (curve number), στην εξαγωγή υδρογραφημάτων άμεσης απορροής και τη διόδυσή τους σε καθεστώς μόνιμης και μη μόνιμης ροής αναμένεται σημαντική.

Επομένως, πιο ουσιαστικά για την αξιολόγηση των μοντέλων θεωρούνται τα στατιστικά μέτρα απόδοσης για τα βάθη νερού. Από τη μία πλευρά παρατηρείται, ότι η γραμμική παρεμβολή και τα μοντέλα μονοδιάστατης ανάλυσης υπερεκτιμούν τα μικρά βάθη νερού αφού ρητά δεν λαμβάνουν υπόψη απώλεια όγκου πλημμυρικού νερού. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα ανάπτυξης πλημμυρικού πεδίου λόγω έλλειψης επαρκούς πληροφορίας για την γεωμετρία του καναλιού, συνήθως πάσχουν στη βαθμονόμησή τους και οδηγούν σε υποεκτίμηση των βαθών νερού [Arel et al. 2007]. Έτσι συχνά θεωρείται ως βέλτιστη απόδοση, αυτή της προσέγγισης (1D/2D) στην προσομοίωση πλημμύρας.

Όλα τα παραπάνω υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης πλημμύρας θεωρήθηκε ότι αναφέρονται σε μόνιμη ροή. Στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής, θα πρέπει να πραγματοποιούνται και συγκρίσεις μεταξύ μοντέλων του ίδιου τύπου, π.χ. μονοδιάστατης ροής. Σε αυτή την περίπτωση σημαντικό ρόλο παίζει και το μήκος της διαδρομής, κατά μήκος της οποίας προσομοιώνεται η διόδυση του πλημμυρικού κύματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μικρής διαδρομής διόδυσης (της τάξεως του 1 km), τα αποτελέσματα για το βάθος νερού μεταξύ μόνιμης και μη μόνιμης ροής συγκλίνουν.

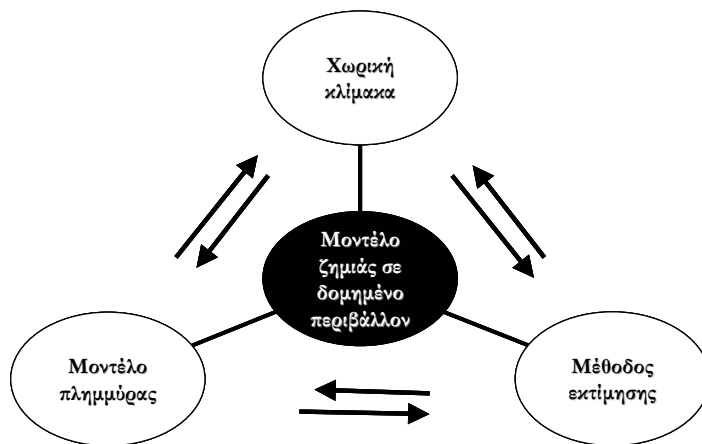
## Κεφάλαιο 7

# Μεγέθη πλημμύρας και ζημιάς και ανάλυση της σχέσης μεταξύ τους: Μοντέλο ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον

Με τον όρο «μοντέλο ζημιάς» εννοούμε την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας που οδηγεί στην εκτίμηση της άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές κατηγορίες πλημμύρας. Η άμεση ζημιά μπορεί να είναι είτε αποτέλεσμα ενός πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος είτε μπορεί να συμβεί υπό ένα σενάριο πλημμύρας σε μια ορισμένη χωρικά περιοχή. Τα στάδια ανάπτυξης ενός μοντέλου ζημιάς απαιτούν δεδομένα πραγματικής ζημιάς για την εφαρμογή των μεθόδων εκτίμησης της ζημιάς και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων τους.

Ένα μοντέλο ζημιάς αποσκοπεί στη μοντελοποίηση της εκτίμησης της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς, δηλαδή του μεγέθους ζημιάς που μπορεί να προκληθεί υπό σενάρια πλημμύρας στο δομημένο περιβάλλον μιας περιοχής υπό μελέτη. Στην περίπτωση αυτή, η ανάπτυξη μοντέλου ζημιάς βασίζεται στη μέθοδο της εμπειρικής στατιστικής ανάλυσης της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και άμεσης ζημιάς με στόχο την προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα. Αυτή η ανάπτυξη οδηγεί στην πρόγνωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε μια εν δυνάμει πληγείσα περιοχή. Στην περίπτωση όμως που η προσαρμογή συνάρτησης στα δεδομένα δεν είναι εφικτή, η ανάπτυξη του μοντέλου ζημιάς βασίζεται στη μέθοδο ανάπτυξης κριτηρίου ζημιάς με βάση πλημμυρικά μεγέθη με στόχο τη διάκριση ζωνών ζημιάς.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω ένα μοντέλο ζημιάς οδηγεί στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον είτε με απόλυτες τιμές είτε με ζώνες ποιοτικής περιγραφής της. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς αποτελεί προϋπόθεση για τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης της περιοχής. Βασικές διαστάσεις του προτεινόμενου μοντέλου ζημιάς αποτελούν το μοντέλο πλημμύρας, η μέθοδος εκτίμησης ζημιάς και η κατάλληλη χωρική κλίμακα για τους σκοπούς της ανάλυσης (βλέπε Εικόνα 7-1).



Εικόνα 7-1. Διαστάσεις μοντέλου ζημιάς

Δεδομένου ότι η δομή και η ανάπτυξη ενός μοντέλου πλημμύρας έχει αναλυθεί ήδη στο κεφάλαιο 6, τα πλημμυρικά μεγέθη είτε αποτελούν αποτελέσματα προσομοίωσης πλημμύρας είτε αποτελέσματα καταγραφής παρατηρημένων τιμών, θεωρούνται δεδομένα στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς. Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στα κριτήρια επιλογής και στην ανάπτυξη της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης άμεσης ζημιάς, η οποία υπαγορεύεται σε μεγάλο βαθμό από το πλημμυρικό μοντέλο και την χωρική κλίμακα ανάλυσης. Ανάλογα με τους σκοπούς της ανάλυσης και τα διαθέσιμα δεδομένα, το μοντέλο ζημιάς μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αποτίμηση της άμεσης ζημιάς. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται δύο στάδια για την οικονομική εκτίμηση της ζημιάς: (α) υπολογισμός της αρχικής αξίας του δομημένου περιβάλλοντος (πριν συμβεί πλημμυρική ζημιά σε αυτό) με οικονομικούς και νομισματικούς όρους και (β) υπολογισμός του ποσοστού ζημιάς επί της αρχικής αξίας.

Η χωρική κλίμακα ανάλυσης στο μοντέλο ζημιάς προσδιορίζει το περιεχόμενο του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση και κατά συνέπεια καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή της μεθόδου εκτίμησης ζημιάς. Επομένως τα μοντέλα ζημιάς χαρακτηρίζονται ανάλογα με την χωρική κλίμακα ανάλυσης σε:

- **Μοντέλο ζημιάς μακροκλίμακας.** Περιορίζεται σε ανάπτυξη απλής καμπύλης που συσχετίζει το βάθος νερού με το ποσοστό ζημιάς επί της αρχικής συνολικής αξίας του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση. Με άλλα λόγια δεν αναπτύσσονται δείκτες ευαλότητας της εξεταζόμενης περιοχής. Ως χωρική κλίμακα ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί η πληγείσα περιοχή (βλέπε εδάφιο 2.3.5).
- **Μοντέλο ζημιάς μεσοκλίμακας.** Βασίζεται σε κατηγοριοποίηση του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση ανάλογα με τους τύπους και τις χρήσεις κτηρίου που περιλαμβάνει, δηλαδή λαμβάνει υπόψη δείκτες ευαλότητας της εξεταζόμενης περιοχής. Ανάλογα με την κατηγορία πλημμύρας που εξετάζεται και τα διαθέσιμα δεδομένα ζημιάς, η μέθοδος εκτίμησης ζημιάς διακρίνεται είτε σε ανάπτυξη καμπυλών βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς ανά χρήση και τύπο κτηρίου είτε σε ζωνοποίηση της ζημιάς βάσει πλημμυρικών μεγεθών. Το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών αποτελεί ενδεδειγμένο περιβάλλον για την ανάλυση και προβολή των αποτελεσμάτων των μοντέλων ζημιάς μεσοκλίμακας. Ως χωρική κλίμακα ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί το διαμέρισμα (βλέπε εδάφιο 2.3.5).
- **Μοντέλο ζημιάς μικροκλίμακας.** Περιλαμβάνει είτε αναλυτική επιμέτρηση της πραγματικής άμεσης ζημιάς σε πληγέντα στοιχεία ενός κτηρίου είτε υπολογισμό συγκεκριμένων πλημμυρικών δράσεων σε πληγέντα στοιχεία ενός κτηρίου μέσω φυσικών μηχανισμών αστοχίας ανάλογα με την κατηγορία πλημ-



μύρας. Ως χωρική κλιμακία ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί το κτήριο (βλέπε εδάφιο 2.3.5).

Ο πίνακας στην Εικόνα 7-2 δείχνει τους συνδυασμούς των μοντέλων πλημμύρας υπό εξέταση και των μοντέλων ζημιάς ανάλογα με το βαθμό που ταιριάζει ως προς την πολυπλοκότητά τους. Με σκούρο χρώμα απεικονίζονται οι συνδυασμοί των μοντέλων που ταιριάζουν βέλτιστα μεταξύ τους ως προς την πολυπλοκότητα των υπολογισμών, ενώ με πιο ανοιχτό χρώμα απεικονίζονται οι συνδυασμοί των μοντέλων που δεν θεωρούνται ιδανικοί. Οι συνδυασμοί με σκούρο χρώμα αναμένεται να αποδίδουν βέλτιστα αποτελέσματα στην εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι τα μοντέλα ζημιάς μικροκλιμακίας δεν αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με πλημμυρικά μοντέλα γραμμικής παρεμβολής ή μονοδιάστατης (1D) προσομοίωσης πλημμύρας.

		πολυπλοκότητα →		
Μοντέλα πλημμύρας / Μοντέλα ζημιάς		Γραμμική παρεμβολή	1D προσομοίωση	1D/2D προσομοίωση
πολυπλοκότητα ↓	Μακροκλιμακίας			
	Μεσοκλιμακίας			
	Μικροκλιμακίας			

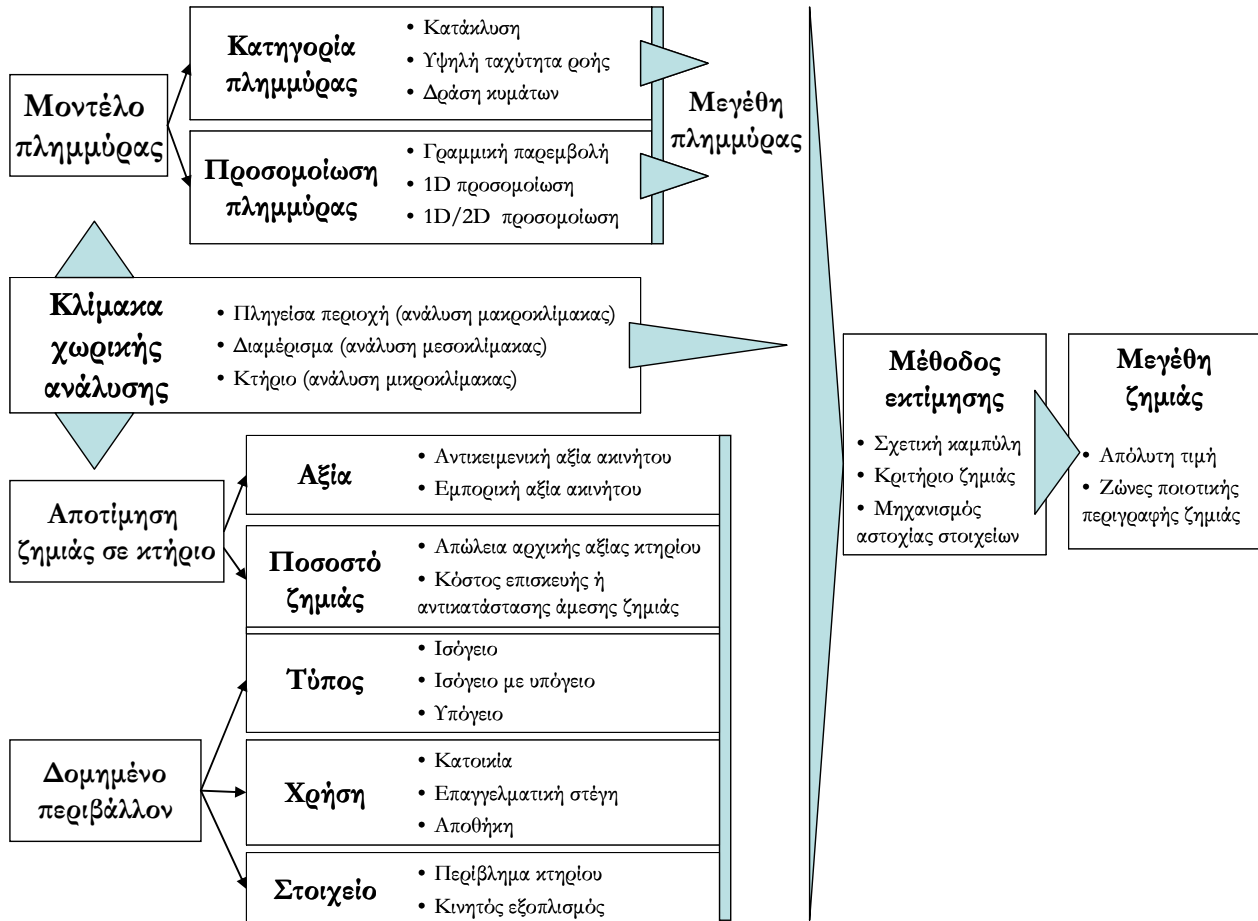
Εικόνα 7-2. Συνδυασμοί μοντέλων πλημμύρας και ζημιάς ως προς το ταιρίασμα του βαθμού πολυπλοκότητάς τους

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 6, τα πλημμυρικά μοντέλα υπό εξέταση στην παρούσα διατριβή αφορούν τη μονοδιάστατη (1D) και τη μονοδιάστατη/διδιάστατη (1D/2D) προσομοίωση πλημμύρας για να καλύψουν περιπτώσεις πλημμυρικών γεγονότων με κατάκλυση και με υψηλή ταχύτητα ροής. Στην Εικόνα 7-2 φαίνεται, ότι τα μοντέλα ζημιάς που δίνουν βέλτιστα αποτελέσματα για αυτά τα μοντέλα πλημμύρας είναι γενικά τα μοντέλα μεσοκλιμακίας και επιπλέον μόνον για τη 1D προσομοίωση τα μοντέλα μακροκλιμακίας.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε έξι υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 7.1 προτείνεται η δομή του μοντέλου ζημιάς μεσοκλιμακίας και περιγράφονται αναλυτικά οι παράγοντες που συντελούν στην ανάπτυξή του, εστιάζοντας σε δύο διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης ζημιάς, τη μέθοδο σχετικής καμπύλης και τη μέθοδο κριτηρίου ζημιάς. Το υποκεφάλαιο 7.2 αναφέρεται στα στάδια αποτίμησης της άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Το υποκεφάλαιο 7.3 αναφέρεται στην απαιτούμενη επεξεργασία των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που προηγείται της ταυτόχρονης στατιστικής ανάλυσης της σχέσης των δεδομένων μεταξύ τους, της οποίας τα βασικά στάδια περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 7.4. Το υποκεφάλαιο 7.5 παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο μιας εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου ζημιάς μεσοκλιμακίας σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ). Τέλος, στο υποκεφάλαιο 7.6 παρουσιάζεται η ενσωμάτωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιάς στο πλαίσιο εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

## 7.1 Μοντέλο ζημιάς

Η Εικόνα 7-3 παρουσιάζει τους βασικούς παράγοντες και τις υποκατηγορίες τους που συντελούν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς. Η επιλογή συγκεκριμένων υποκατηγοριών σε κάθε παράγοντα διαμορφώνει την κατηγορία του μοντέλου ζημιάς.



Εικόνα 7-3. Δομή μοντέλου ζημιάς

Στις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής εξετάζονται μοντέλα ζημιάς που ανήκουν ή διαθέτουν στοιχεία που προέρχονται και από τις τρεις προτεινόμενες κατηγορίες, δηλαδή μοντέλα μικροκλίμακας, μεσοκλίμακας και μακροκλίμακας. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 9 (βλέπε σελ. 9-2) εξετάζεται μοντέλο ζημιάς μεσοκλίμακας με στοιχεία μακροκλίμακας και μικροκλίμακας που αναφέρεται στην κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση και σε μοντέλο πλημμύρας γραμμικής παρεμβολής παρατηρημένων τιμών βάθους νερού. Το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς περιλαμβάνει διαδικασία αποτίμησης ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου, υπολογισμό του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» ως κόστος εργασιών επισκευής άμεσης ζημιάς και σε ό,τι αφορά το δομημένο περιβάλλον, διακρίνει τις δομημένες περιοχές σε χρήσεις και τύπους κτηρίου. Σε αυτό το μοντέλο ζημιάς η επιλεγμένη μέθοδος εκτίμησης ζημιάς είναι η μέθοδος σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς που έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της αναμενόμενης ζημιάς σε απόλυτη τιμή.

Στο κεφάλαιο 12 (βλέπε σελ. 12-2) εξετάζεται μοντέλο ζημιάς μεσοκλιμακίας που αναφέρεται στην κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και σε μοντέλο πλημμύρας μονοδιάστατης/διδιάστατης προσομοίωσης πλημμύρας. Το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς περιλαμβάνει διαδικασία αποτίμησης ζημιάς με βάση την εμπορική αξία ενός κτηρίου, τον υπολογισμό του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» ως απώλεια της αρχικής αξίας ενός κτηρίου, και σε ό,τι αφορά το δομημένο περιβάλλον εξετάζει μόνο κατοικίες χωρίς πρόσθετη διάκριση σε τύπους κτηρίου. Σ' αυτό το μοντέλο ζημιάς, η επιλεγμένη μέθοδος εκτίμησης ζημιάς είναι η μέθοδος κριτηρίου ζημιάς που έχει ως αποτέλεσμα τη διάκριση σε ζώνες ζημιάς.

Τέλος, στο κεφάλαιο 13 (βλέπε σελ. 13-1) εξετάζεται μοντέλο ζημιάς μικροκλιμακίας που αναφέρεται στην κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και σε μοντέλο πλημμύρας μονοδιάστατης προσομοίωσης πλημμύρας. Τα δεδομένα άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον στην περιοχή μελέτης περιορίζονται σε περιγραφή της παρατηρούμενης ζημιάς σε στοιχεία κτηρίου και δεν περιλαμβάνουν επιμέτρηση και αποτίμηση της ζημιάς. Επομένως, το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς περιορίζεται στη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας πληγέντων στοιχείων κτηρίου με βάση πλημμυρικά μεγέθη.

### 7.1.1 Κλίμακα χωρικής ανάλυσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, τα καθιερωμένα χωρικά επίπεδα ανάλυσης ζημιάς στη διεθνή βιβλιογραφία είναι τα επίπεδα (α) μακροκλιμακίας, (β) μεσοκλιμακίας και (γ) μικροκλιμακίας. Σε πλήρη αντιστοιχία με τα επίπεδα αυτά προσδιορίστηκαν στην παρούσα διατριβή τα ακόλουθα εναλλακτικά χωρικά επίπεδα ανάλυσης: (α) πληγείσα περιοχή, (β) διαμέρισμα και (γ) κτήριο. Από τον ορισμό των εναλλακτικών προσδιορισμών της κλιμακίας χωρικής ανάλυσης (βλέπε εδάφιο 2.3.5) αποσαφηνίζεται σε κάθε περίπτωση μελέτης το ακριβές περιεχόμενο του όρου «δομημένο περιβάλλον».

Η κλίμακα χωρικής ανάλυσης «πληγείσα περιοχή» περιορίζει το δομημένο περιβάλλον υπό εξέταση εντός των ορίων της κατακλυσμένης περιοχής και το αντιμετωπίζει ως ενιαίο σύνολο κτηρίων με ομοιόμορφη χωρική κατανομή χωρίς καμία διάκριση ως προς την χρήση, τον τύπο και την αξία του κτηρίου. Αντίθετα, η κλίμακα χωρικής ανάλυσης «κτήριο» ανάγει την ανάλυση ζημιάς είτε ανά κτήριο είτε ανά σύνολα κτηρίων που εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά ως προς το μέγεθος, τον αριθμό ορόφων, τα υλικά κατασκευής, την χρήση, την παλαιότητα και την αξία ακινήτου. Με άλλα λόγια η χωρική ανάλυση ζημιάς ανά κτήριο αξιοποιεί σε μέγιστο βαθμό τη διάκριση του δομημένου περιβάλλοντος.

Τέλος, η κλίμακα χωρικής ανάλυσης «διαμέρισμα» αποτελεί ενδιάμεση κατάσταση των δύο προηγούμενων κλιμάκων και βασίζεται σε ένα ελάχιστο βαθμό κατηγοριοποίησης του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση π.χ. ανά χρήση κτηρίου ή ανά πυκνότητα δόμησης. Συνήθως, σε αυτό το χωρικό επίπεδο ανάλυσης, η διάκριση του δομημένου περιβάλλοντος συνδέεται με μία ή και περισσότερες χρήσεις γης, και γι' αυτό συχνά, η ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλιμακία βρίσκει εφαρμογή σε υπολογιστικό περιβάλλον ΓΣΠ. Όμως, το ακριβές περιεχόμενο του χωρικού επιπέδου «διαμέρισμα» ποικίλλει ανάλογα με την ελάχιστη περιοχή μελέτης.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα όρια μεταξύ των παραπάνω κλιμάκων χωρικής ανάλυσης δεν είναι αυστηρά και ότι συχνά συμβαίνει στις περιοχές μελέτης η ανάλυση ζημιάς να ακολουθεί μια ενδιάμεση προσέγγιση που συνδυάζει στοιχεία από τις τρεις κλιμακίες χωρικής ανάλυσης.

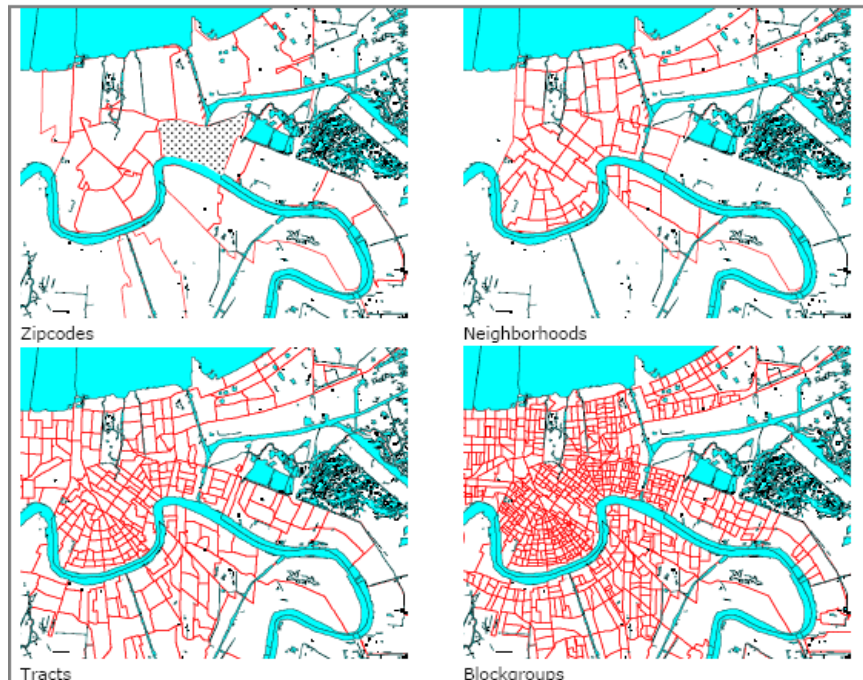
Στην παρούσα διατριβή στην περιοχή μελέτης της Αττικής εφαρμόζεται ένα μοντέλο ζημιάς μεσοκλιμακίας με στοιχεία μικροκλιμακίας (ανά κτήριο) και μακροκλιμακίας (πληγείσα περιοχή). Για παράδειγμα, τα οικονομικά δεδομένα άμεσης ζημιάς από την πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 υπολογίστηκαν σε κάθε πλημμυ-

ρόπληκτο κτήριο με αναλυτική επιμέτρηση σε απόλυτες τιμές και κατά συνέπεια η αποτίμηση ζημιάς διαφοροποιείται ανά κτήριο και τα δεδομένα θεωρούνται μικροκλίμακας. Παράλληλα, όμως, ο υπολογισμός της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου για τη μετατροπή της απόλυτης τιμής της ζημιάς σε ποσοστό ζημιάς ανά κτήριο, υλοποιήθηκε με βάση την κατηγοριοποίηση του δομημένου περιβάλλοντος ανά χρήση και τύπο κτηρίου και επομένως η ανάλυση ζημιάς θεωρείται μεσοκλίμακας με στοιχεία μικροκλίμακας.

Επίσης, στην περιοχή μελέτης της Νέας Ορλεάνης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ζημιάς μεσοκλίμακας εφαρμόζοντας όμως τρεις επιμέρους χωρικές μονάδες ανάλυσης που ανήκουν σε επίπεδο μεσοκλίμακας για λόγους σύγκρισης:

- τα διαμερίσματα (tracts)
- τις ομάδες οικοδομικών τετράγωνων (blockgroups)
- το οικοδομικό τετράγωνο (block)

Γενικά, υπάρχουν τα ακόλουθα πέντε χωρικά επίπεδα, τα οποία χρησιμοποιούνται από τις κρατικές αρχές για την υποδιαίρεση της πόλης της Νέας Ορλεάνης σε μικρότερες περιοχές: (α) οι ταχυδρομικοί κώδικες (zip codes), (β) οι συνοικίες (neighborhoods), (γ) τα διαμερίσματα (tracts), (δ) οι ομάδες οικοδομικών τετράγωνων (blockgroups) και (ε) το οικοδομικό τετράγωνο (block). Αυτές οι γεωγραφικές οντότητες αποτελούν βασικούς τύπους χωρικών μονάδων μέτρησης επιφάνειας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις απογραφές πληθυσμού στις ΗΠΑ [GARM 1994]. Συνεπώς, η χωρική διάκριση στα επίπεδα αυτά αφορά αποκλειστικά το πλήθος κτηρίων ή την επιφάνεια κάλυψης και δεν συνδέεται με την ποιοτική σύνθεση του δομημένου περιβάλλοντος (π.χ. χρήση και τύπος κτηρίου).



Εικόνα 7-4. Τέσσερα πρώτα χωρικά επίπεδα υποδιαίρεσης της πόλης της Νέας Ορλεάνης [Maaskant 2007]

Στην Εικόνα 7-4 διακρίνονται τα τέσσερα πρώτα χωρικά επίπεδα που είναι διαθέσιμα από τις κρατικές αρχές για την πόλη της Νέας Ορλεάνης.

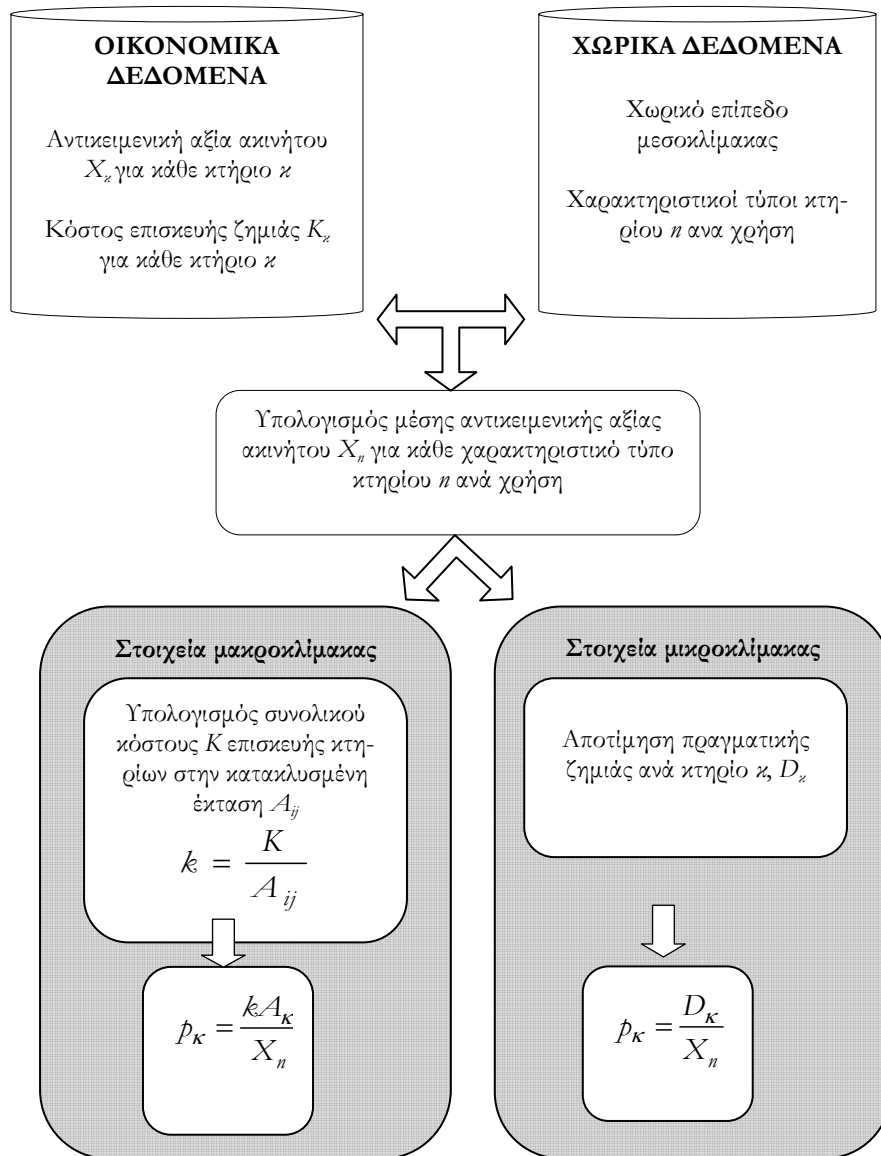
Για την ανάλυση ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον οι ταχυδρομικοί κώδικες και οι συνοικίες απορρίφθηκαν εξ αρχής ως ακατάλληλα χωρικά επίπεδα λόγω της πολύ μεγάλης επιφάνειας κάλυψης. Οι ανηγμένες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών στα επίπεδα αυτά εξαλείφουν σε σημαντικό βαθμό την κύμανση των προσομοιωμένων τιμών τους και επομένως οδηγούν σε υπεραπλοποιημένα αποτελέσματα προσομοίωσης πλημμύρας.

Τα χωρικά επίπεδα που επιλέχθηκαν και διερευνήθηκαν για τους σκοπούς της ανάλυσης ζημιάς είναι το διαμέρισμα, η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων και το οικοδομικό τετράγωνο. Σύμφωνα με την απογραφή του 1990 [GARM 1994], η στατιστική υπηρεσία όρισε ότι ο μέσος αριθμός οικιστικών μονάδων για κάθε διαμέρισμα οφείλει να προσεγγίζει περίπου τις 1500 μονάδες (περίπου 4 000 κάτοικοι), κυμαινόμενος από 600 έως 3 000 οικιστικές μονάδες (από 1500 έως 8 000 κάτοικοι αντίστοιχα). Επομένως, ένα διαμέρισμα καλύπτει επιφάνεια εμβαδού προσεγγιστικά ίση με 0.27 km<sup>2</sup>. Ομοίως, σύμφωνα με τις ίδιες οδηγίες [GARM 1994], μια ομάδα οικοδομικών τετραγώνων οφείλει να περιλαμβάνει περίπου 400 οικιστικές μονάδες, κυμαινόμενη από 250 μέχρι 550 οικιστικές μονάδες. Επομένως, μια ομάδα οικοδομικών τετραγώνων περιλαμβάνει προσεγγιστικά 15 οικοδομικά τετράγωνα και καλύπτει επιφάνεια εμβαδού ίση με 0.07 km<sup>2</sup>. Τα όρια μιας ομάδας οικοδομικών τετραγώνων θα πρέπει να ακολουθούν ευκρινή ορατά στοιχεία, όπως είναι οι δρόμοι, οι σιδηρόδρομοι και τα υδάτινα σώματα. Τέλος, σύμφωνα με τις ίδιες οδηγίες [GARM 1994], το οικοδομικό τετράγωνο περιλαμβάνει προσεγγιστικά 15 οικιστικές μονάδες και καλύπτει επιφάνεια εμβαδού περίπου ίση με 0.0028 km<sup>2</sup>.

Τέλος, στην περιοχή μελέτης κατάντη του φράγματος Μυλοπότα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ζημιάς μικροκλίμακας με στοιχεία μεσοκλίμακας, καθώς τα καταγεγραμμένα δεδομένα ζημιάς διαφοροποιούνται ανά κτήριο, ενώ τα δεδομένα πλημμύρας προκύπτουν από προσομοίωση πλημμύρας με στοιχεία μεσοκλίμακας.

### **7.1.2 Μέθοδος σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς**

Εάν υποθέσουμε την ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με βάση τη μέθοδο της σχετικής καμπύλης – ζημιάς τότε η μεθοδολογία εκτίμησης της αναμενόμενης ζημιάς υπό ένα σενάριο πλημμύρας διαφοροποιείται ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς. Στην Εικόνα 7-5 διακρίνεται η διαφοροποίηση στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο χρησιμοποιώντας στοιχεία μακροκλίμακας και μικροκλίμακας αντίστοιχα.



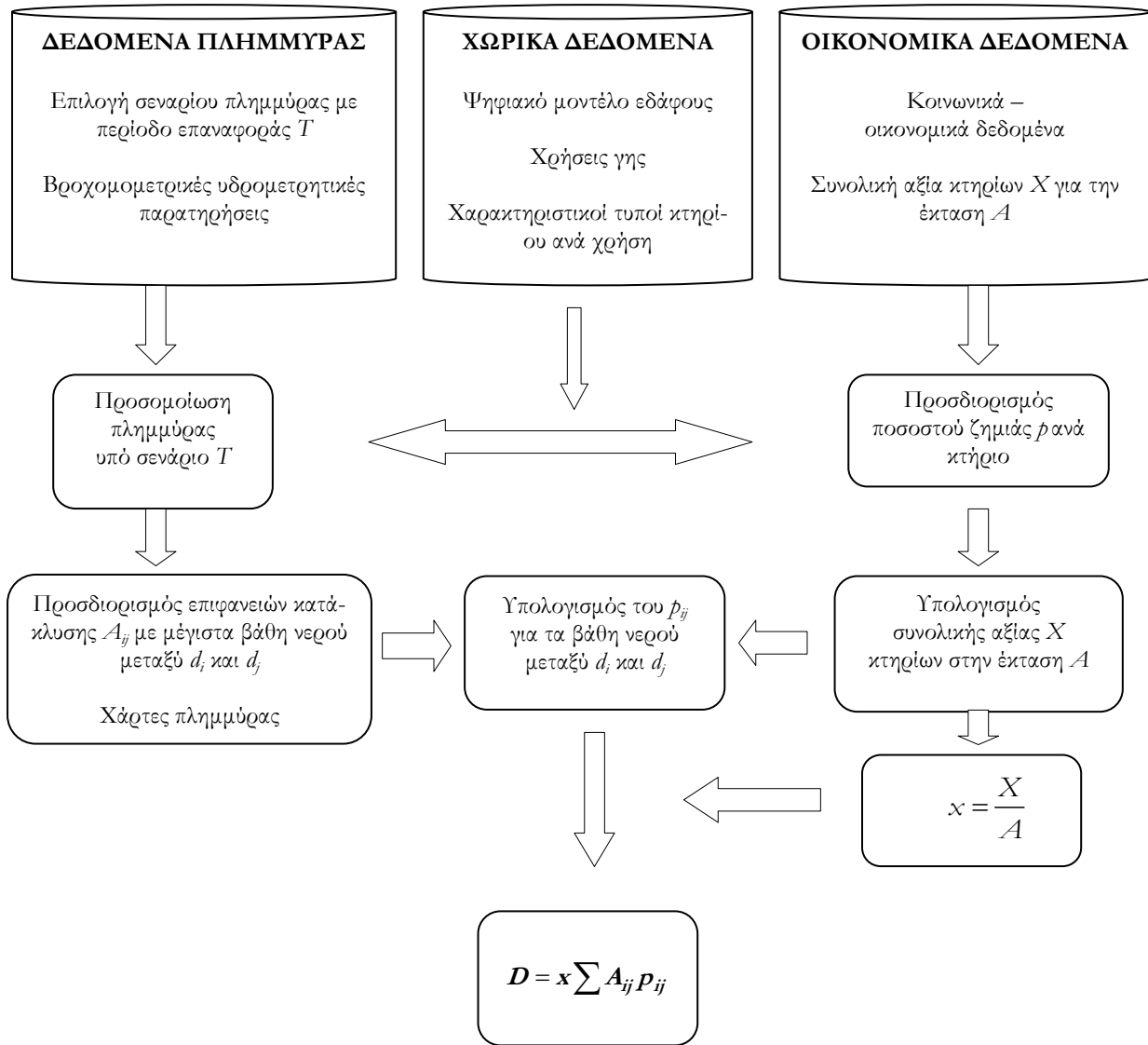
Εικόνα 7-5. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο

Η ανάλυση ζημιάς σε επίπεδο μεσοκλίμακας λαμβάνει υπόψη έως ένα βαθμό τοπικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση δομημένης περιοχής, αφού κατηγοριοποιεί το δομημένο περιβάλλον και διαμορφώνει χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου ανά χρήση. Ωστόσο, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, συχνά στην ανάλυση χρησιμοποιούνται είτε στοιχεία μικροκλίμακας, όπως είναι η αποτίμηση βάσει επιμέτρησης της πραγματικής ζημιάς ανά κτήριο είτε στοιχεία μακροκλίμακας, όπως είναι η αδρομερής εκτίμηση κόστους επισκευής ζημιάς ανά μονάδα κατακλυσμένης επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο διαφοροποιείται ο τρόπος υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο και η κλιμακωτή ανάλυση χαρακτηρίζεται ως μεσοκλιμακωτή με στοιχεία μικροκλίμακας ή μακροκλίμακας αντίστοιχα. Εάν λοιπόν θεωρήσουμε γνωστό το ποσοστό ζημιάς  $p$  σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο τότε προτείνεται η ακόλουθη μεθοδολογία για την ανάπτυξη μοντέλου ζημιάς με τη μέθοδο σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς.

Έστω μια δομημένη περιοχή υπό απειλή πλημμύρας, της οποίας η έκταση ισούται με  $A$ . Υποθέτουμε, ότι οι υπολογισμοί των μέγιστων τιμών βάθους νερού που προκύπτουν υπό σενάριο πλημμύρας  $T$  είναι διαθέσιμοι με τέτοιο τρόπο, ώστε η έκταση  $A_{ij}$  της  $A$ , η οποία είναι κατακλυσμένη με βάθη νερού που κυμαίνονται στο εύρος  $[d_i, d_j]$  να είναι γνωστή. Εάν υποθέσουμε ότι  $X$  είναι η ολική αξία του δομημένου περιβάλλοντος που ανήκει στην έκταση  $A$ , τότε μπορεί να εκτιμηθεί η ολική αξία του δομημένου περιβάλλοντος ανά μονάδα επιφάνειας  $x = \frac{X}{A}$ . Εάν το ποσοστό ζημιάς  $p$  σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο της δομημένης περιοχής, που προκλήθηκε από τιμές βάθους νερού που κυμαίνονται στο εύρος  $[d_i, d_j]$  είναι γνωστό, τότε η συνολική πλημμυρική ζημιά στη δομημένη περιοχή θα ισούται με  $D = x \sum A_{ij} p_{ij}$ .

Το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 7-6 απεικονίζει τη μεθοδολογία, η οποία απαιτεί για την εφαρμογή της πολλά και διαφορετικά είδη δεδομένων:

- Δεδομένα πλημμύρας, όπως είναι οι βροχομετρικές και υδρομετρικές παρατηρήσεις, το ποσοστό αδι-απέρατης επιφάνειας της ολικής έκτασης υπό μελέτη και άλλες υδραυλικές παραμέτρους. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της επιφάνειας κατάκλυσης και επίσης για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής του βάθους νερού, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι κατακλυσμένες εκτάσεις  $A_{ij}$ .
- Χωρικά δεδομένα, τα οποία διακρίνονται στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, τις χρήσεις γης, τους χαρακτη-ριστικούς τύπους κτηρίων στις δομημένες περιοχές υπό μελέτη και το ποσοστό κάλυψης κάθε τύπου κτη-ρίου σε σχέση με τη συνολική έκταση. Αυτή η κατηγορία δεδομένων είναι απαραίτητη τόσο για τους υ-δρολογικούς και υδραυλικούς υπολογισμούς όσο και για την οικονομική ανάλυση της περιοχής υπό μελέ-τη.
- Οικονομικά δεδομένα, τα οποία αφορούν τις οικονομικές συνθήκες της περιοχής υπό μελέτη. Η οικονο-μική ανάλυση επικεντρώνεται στην εκτίμηση μιας αντιπροσωπευτικής μέσης αξίας δομημένου περιβάλλο-ντος ανά μονάδα επιφάνειας  $x$ , εφόσον ο προσδιορισμός του ποσοστού ζημιάς  $p$  θεωρείται δεδομένος.



Εικόνα 7-6. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης ζημιάς με τη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς

### Αβεβαιότητα αποτελεσμάτων

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς είναι μια διεθνώς αποδεκτή προσέγγιση για την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου εξαρτάται από την κλιμακωτή χωρική ανάλυση. Για παράδειγμα, εάν η μέθοδος εφαρμοστεί σε μικροκλίμακα, δηλαδή ανά κτήριο οι διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς από κτήριο σε κτήριο μπορεί να είναι σημαντικές. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι η προσαρμογή της στις τοπικές συνθήκες της περιοχής μελέτης με την ανάπτυξη εμπειρικών σχετικών καμπύλων βάθους νερού – ζημιάς για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου ανά χρήση. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψη η ευαλωτότητα της εξεταζόμενης περιοχής με τη στενή έννοια του όρου. Γενικά, η ανάλυση ζημιάς με τη μέθοδο καμπύλης όταν υλοποιείται σε μεσοκλίμακα οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ενός μοντέλου ζημιάς με τη



μέθοδο της καμπύλης θεωρούνται ότι διαθέτουν ένα βαθμό αβεβαιότητας δεδομένου ότι η πρόκληση άμεσης ζημιάς θεωρείται ότι εξαρτάται αποκλειστικά από το βάθος νερού. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της επέκτασης της καμπύλης ή της πρόγνωσης μιας νέας τιμής ποσοστού ζημιάς από την καμπύλη αντιμετωπίζεται στατιστικά με τον υπολογισμό ορίων εμπιστοσύνης (βλέπε εδάφιο 7.4.3).

### 7.1.3 Μέθοδος κριτηρίου ζημιάς

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλιμακίας με βάση τη μέθοδο κριτηρίου ζημιάς εφαρμόζεται συνήθως για κατηγορίες πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και δράση κυμάτων, δηλαδή σε περιπτώσεις πλημμυρικών γεγονότων, στις οποίες μόνον το βάθος νερού δεν επαρκεί για την πρόκληση της παρατηρούμενης άμεσης ζημιάς στο δομημένο περιβάλλον. Συνεπώς, στη μέθοδο αυτή συμμετέχουν εκτός από το βάθος νερού και αλλά πλημμυρικά μεγέθη, όπως είναι η ταχύτητα ροής, το γινόμενο βάρους νερού και ταχύτητας ροής και ο ρυθμός ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης.

Πριν την ανάπτυξη κριτηρίου ζημιάς έχει ήδη προηγηθεί η εφαρμογή της μεθόδου της στατιστικής ανάλυσης της σχέσης πλημμυρικών μεγεθών και άμεσης ζημιάς που αποσκοπεί σε θεωρητική συνάρτηση πρόγνωσης της άμεσης ζημιάς. Όταν η προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης στα δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς δεν είναι εφικτή, τότε εφαρμόζεται η μέθοδος ανάπτυξης κριτηρίου ζημιάς. Η διαδικασία της στατιστικής ανάλυσης συνεισφέρει στην επιλογή του συνδυασμού των πλημμυρικών μεγεθών που θα συμμετέχουν στην ανάπτυξη του κριτηρίου ζημιάς. Μετά από μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμών επιλέγονται ορισμένες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών που έχουν ως αποτέλεσμα είτε τη ευκρινή κατηγοριοποίηση της άμεσης ζημιάς σε κλάσεις τιμών ποσοστού ζημιάς είτε τη γραφική απεικόνιση της ζωνοποίησής τους σε περιβάλλον ΓΣΠ. Οι παραγόμενες ζώνες που οριοθετούνται από τις ορισμένες τιμές των μεγεθών πλημμύρας χαρακτηρίζονται ανάλογα με τις ποιοτικές περιγραφές της άμεσης ζημιάς σε αυτές.

## 7.2 Αποτίμηση δεδομένων άμεσης ζημιάς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η αποτίμηση της ζημιάς σε απόλυτες τιμές υλοποιείται είτε με όρους νομισματικούς (financial) είτε με όρους οικονομικούς (economic). Στην πρώτη περίπτωση η αποτίμηση ζημιάς βασίζεται στο κόστος υλικών και εργασιών επισκευής ή αντικατάστασης σε μια πληγείσα ιδιοκτησία και μπορεί να εκφραστεί ως ένα μέρος του συνολικού κόστους αντικατάστασης των πληγέντων στοιχείων. Στη δεύτερη περίπτωση η αποτίμηση ζημιάς προσδιορίζεται ως η απώλεια της αρχικής αξίας (πριν το συμβάν του πλημμυρικού γεγονότος) της πληγείσας ιδιοκτησίας αντανακλώντας την αξία της χρήσης της πριν την πλημμύρα. Σύμφωνα με τους Black και Evans (1999) η αποτίμηση πλημμυρικής ζημιάς με νομισματικούς όρους είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές ζημιάς σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αντίστοιχης αποτίμησης με οικονομικούς όρους. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται και οι δυο τρόποι αποτίμησης ανάλογα με τη διαθεσιμότητα οικονομικών στοιχείων της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στην ενάστοτε μελέτη εφαρμογής.

### 7.2.1 Αξία ακινήτου

Η αξία μιας ιδιοκτησίας μπορεί να προσδιοριστεί με τις ακόλουθες μορφές:

- **Αντικειμενική Αξία ακινήτου**, η οποία προσδιορίζεται με βάση την αντικειμενική αξία του κτίσματος και την αντικειμενική αξία του οικοπέδου που το περιέχει.

- **Εμπορική αξία ακινήτου**, η οποία προσδιορίζεται με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου και τις συνθήκες προσφοράς και ζήτησης της κτηματομεσιτικής αγοράς. Αυτή η μορφή παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στον χρόνο.
- **Αντικειμενική αξία κτίσματος**, η οποία προσδιορίζεται κυρίως με βάση την κοστολόγηση των υλικών και των εργασιών κατασκευής του κτίσματος και δεν περιλαμβάνει την αξία οικοπέδου.

Κατά την οικονομική εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στο περίβλημα μιας ιδιοκτησίας ενδιαφέρει μόνο η εκτίμηση της απώλειας στη συνολική αξία της ιδιοκτησίας που προκαλείται λόγω της άμεσης ζημιάς. Με αυτό το σκεπτικό θεωρείται ότι η αντικειμενική αξία ακινήτου είναι το πιο κατάλληλο οικονομικό μέγεθος για να προσδιορίσει την αρχική αξία μιας ιδιοκτησίας πριν συμβεί η ζημιά λόγω πλημμύρας, αφού στην περίπτωση ζημιάς στην ιδιοκτησία χάνεται ένα ποσοστό της αξίας τόσο του κτίσματος όσο και του οικοπέδου που το περιέχει.

Ο υπολογισμός της αντικειμενικής αξίας ακινήτου εξαρτάται εξ ορισμού από αντικειμενικά κριτήρια, όπως είναι η χρήση, ο τύπος, το μέγεθος του κτηρίου και η τιμή ζώνης του οικοπέδου. Η διαδικασία όμως, υπολογισμού της αντικειμενικής αξίας ακινήτου μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά από χώρα σε χώρα και γι' αυτό, θα πρέπει να περιγράφεται συγκεκριμένα σε κάθε περίπτωση πληγείσας περιοχής ο υπολογισμός της αντικειμενικής αξίας ακινήτου που αντιστοιχεί είτε σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο είτε σε χαρακτηριστικό τύπο πλημμυρόπληκτου κτηρίου ανάλογα με την χωρική κλίμακα ανάλυσης που έχει επιλεγεί. Στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται η μέση τιμή της αντικειμενικής αξίας ακινήτου λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων που διαμορφώνουν έναν χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου.

Η επιλογή της αντικειμενικής αξίας ακινήτου για τον υπολογισμό του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» δεν ακολουθείται πάντα. Σε κάθε περίπτωση, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μετατροπής της απόλυτης τιμής σε ποσοστό ζημιάς βάσει αντικειμενικής ή εμπορικής αξίας συμβάλλει στην επιλογή της πιο κατάλληλης μορφής προσδιορισμού της αξίας ακινήτου.

Γενικά, η εμπορική αξία ενός ακινήτου καθορίζεται από πολλούς ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι το μέγεθος του κτηρίου, η ποιότητα κατασκευής, η αξία γης, η γεωγραφική θέση, η εγγύτητα σε μέσα μαζικής μεταφοράς κτλ. Ωστόσο, η εμπορική αξία ενός ακινήτου καθορίζεται και με βάση τους εφήμερους κανόνες προσφοράς και ζήτησης της αγοράς ακινήτων, οι οποίοι μεταβάλλονται συχνά και απρόβλεπτα και μπορεί να εξαρτώνται από τελείως διαφορετικούς παράγοντες άσχετους με την αντικειμενική αξία του ακινήτου.

## 7.2.2 Ποσοστό ζημιάς

Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά τις αρχές της δεκαετίας του 1970 από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (U.S. Army Corps of Engineers) και αποτελεί μια διαδεδομένη μορφή αποτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Γενικά, ως «ποσοστό ζημιάς» ορίζεται το κλάσμα με αριθμητή το κόστος των εργασιών αντικατάστασης ή επισκευής σε ένα πλημμυρόπληκτο κτήριο και παρονομαστή την αξία του κτηρίου πριν συμβεί η άμεση ζημιά σε αυτό:

$$\text{Ποσοστό ζημιάς} = \frac{\text{Κόστος εργασιών επισκευής πλημμυρόπληκτου κτηρίου}}{\text{Αρχική αξία κτηρίου πριν τη ζημιά}} \quad (7.1)$$

Οι τιμές του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» κυμαίνονται από 0 έως 1 (δηλαδή 0 - 100%). Είναι σημαντικό να

τονιστεί ότι το κόστος εργασιών αντικατάστασης ή επισκευής σε ένα κτήριο και η αξία του κτηρίου θα πρέπει να αναφέρονται στην ίδια χρονική περίοδο για τον υπολογισμό του ποσοστού ζημιάς. Ο ορισμός του ποσοστού ζημιάς από την εξίσωση (7.1) οδηγεί σε αποτίμηση ζημιάς με νομισματικούς όρους (κόστος υλικών και εργασιών αποκατάστασης ή αντικατάστασης μιας πληγείσας ιδιοκτησίας) ή με οικονομικούς όρους (απώλεια αρχικής αξίας ιδιοκτησίας).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο υπολογισμός του ποσοστού ζημιάς διαφοροποιείται ανάλογα με την πλημμυρόπληκτη περιοχή υπό εξέταση ως προς: (α) τη μορφή προσδιορισμού της αξίας κτηρίου και (β) την χωρική κλίμακα υπολογισμού της αξίας αυτής.

## 7.3 Επεξεργασία δεδομένων

### 7.3.1 Στατιστική περιγραφή

Το υπολογιστικό πρόγραμμα SPSS είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης δεδομένων, το οποίο παράγει πινακοποιημένες εκθέσεις, διαγράμματα και γραφήματα κατανομών και τάσεων, περιγραφικών στατιστικών χαρακτηριστικών και πολύπλοκης στατιστικής ανάλυσης. Στην παρούσα διατριβή το πρόγραμμα SPSS χρησιμοποιείται για τη στατιστική περιγραφή ενός δείγματος (π.χ. σύνολο τιμών ποσοστού ζημιάς) στην περίπτωση μιας πλημμυρόπληκτης περιοχής υπό εξέταση. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι οι τυπικές εκτιμήτριες που αναφέρονται σε στατιστικές ροπές ενός πληθυσμού, όπως είναι η δειγματική μέση τιμή και η δειγματική διασπορά. Επίσης, η στατιστική περιγραφή ενός δείγματος μπορεί να περιλαμβάνει και απλούστερους στατιστικούς δείκτες, των οποίων ο υπολογισμός προϋποθέτει τη διάταξη σε φθίνουσα ή αύξουσα σειρά, όπως είναι η διάμεσος και τα ποσοστιαία σημεία 25% και 75%. Το πρόγραμμα SPSS έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τα παραπάνω στατιστικά χαρακτηριστικά ενός δείγματος είτε με αριθμητικό είτε με γραφικό τρόπο με την παραγωγή γραφημάτων σε στήλες και συνοπτικών παραστάσεων δείγματος (box plots).

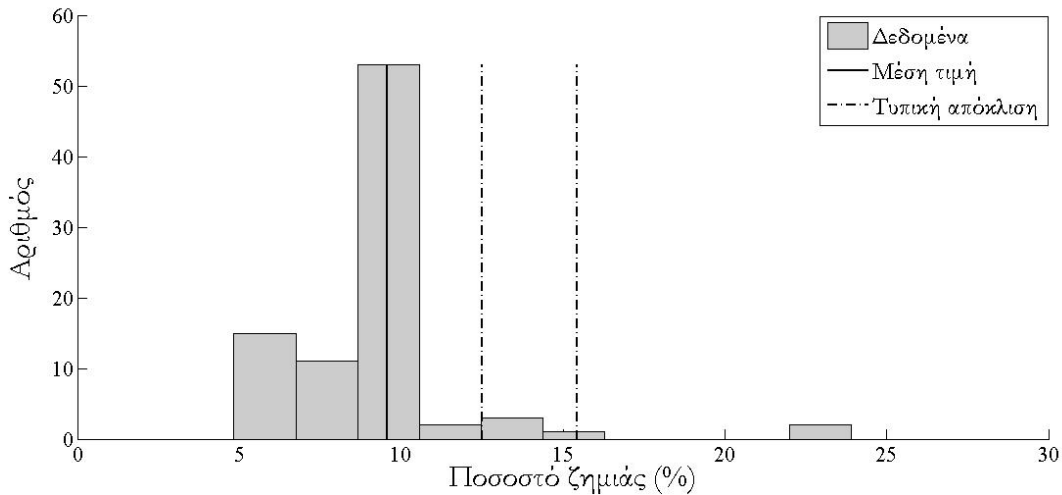
Αποτέλεσμα της στατιστικής περιγραφής είναι η συμπύκνωση του δείγματος σε στατιστικά χαρακτηριστικά και δείκτες που συνοψίζουν τις πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες του. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προκύψουν ποιοτικά συμπεράσματα για παράγοντες που επηρεάζουν την πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Η στατιστική περιγραφή εφαρμόζεται σε κάθε σύνολο δεδομένων χωριστά και αποτελεί αναγκαίο στάδιο επεξεργασίας δεδομένων, το οποίο συνεισφέρει στην ακόλουθη ανάλυση της σχέσης δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς μεταξύ τους.

### 7.3.2 Πρωτογενής επεξεργασία

Η πρωτογενής επεξεργασία σε ένα δείγμα αφορά την αφαίρεση στοιχείων από το δείγμα είτε επειδή είναι ακραίες τιμές είτε επειδή βρίσκονται εντός των ορίων του ανθρώπινου σφάλματος.

Μια κοινή μέθοδος για την αναγνώριση εξωδειγματικών τιμών είναι να θεωρήσει κανείς ακραίες τιμές τις τιμές που είναι μεγαλύτερες από ένα συγκεκριμένο αριθμό τυπικών αποκλίσεων  $\sigma$  από τη δειγματική μέση τιμή  $\mu$ . Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το ιστόγραμμα απόλυτης συχνότητας του δείγματος. Στην Εικόνα 7-7 απεικονίζονται το ιστόγραμμα ενός συνόλου τιμών ποσοστού ζημιάς και οι τιμές του ποσοστού ζημιάς στις θέσεις της δειγματικής μέσης τιμής  $\mu$  και  $\mu + n\sigma$  για  $n=1, 2$  [Stuart 1999]. Όσες τιμές ποσοστού ζημιάς προκύπτουν έξω από τα όρια  $\mu \pm n\sigma$  για  $n=2$  θεωρούνται εξωδειγματικές τιμές του δείγματος και αφαιρούνται

από το αρχικό σύνολο.



Εικόνα 7-7. Μέθοδος αναγνώρισης των εξωδειγματικών τιμών ενός συνόλου δεδομένων ζημιάς

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή για την αφαίρεση εξωδειγματικών τιμών σε όλες τις περιπτώσεις επεξεργασίας συνόλων δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς.

Η αφαίρεση τιμών με τη μορφή νέφους από ένα σύνολο δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς συμβαίνει στην περίπτωση της ενσωμάτωσης ανθρώπινου σφάλματος στο σύνολο δεδομένων και αφορά τις τιμές που βρίσκονται στα όρια του σφάλματος αυτού. Επομένως, η διαδικασία αυτή προϋποθέτει την ποσοτικοποίηση του σφάλματος με ένα εύρος τιμών. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα βάθους νερού από την προσομοίωση μιας πλημμύρας υποτίθεται ότι φέρουν σταθερό σφάλμα από την παραγωγή του απαιτούμενου ψηφιακού μοντέλου εδάφους, ενώ η καταγραφή παρατηρήσεων βάθους νερού στο πεδίο υποτίθεται ότι φέρει σταθερό σφάλμα λόγω ανθρώπινου λάθους.

### 7.3.3 Εξομάλυνση δεδομένων

Η στατιστική εξομάλυνση πειραματικών δεδομένων οδηγεί στην ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες δεν έχουν γενική ισχύ αλλά ισχύουν μόνο για το συγκεκριμένο τοπικό σύστημα από το οποίο προέκυψαν πειραματικά. Συνήθως αυτός ο τρόπος επεξεργασίας δεδομένων εφαρμόζεται όταν η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων στην αρχική τους μορφή δεν κατέστη δυνατή. Βασική υπόθεση της εξομάλυνσης δεδομένων είναι ότι, όταν η σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής εξομαλύνεται ο θόρυβος μειώνεται, και επομένως η εξομαλυσμένη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής θεωρείται καλύτερη εκτίμηση της αρχικής τιμής. Κάθε εξομαλυσμένη τιμή εξαρτημένης μεταβλητής προκύπτει από τις γειτονικές αρχικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που ορίζει το βήμα. Η επιλογή μεγάλου βήματος αυξάνει την εξομάλυνση αλλά μειώνει τη διακρισιμότητα του εξομαλυσμένου συνόλου, ενώ αντίθετα η επιλογή μικρού βήματος μειώνει την εξομάλυνση αλλά αυξάνει τη διακρισιμότητα. Με την εξομάλυνση προκύπτει μια νέα τιμή (εξομαλυσμένη) της εξαρτημένης μεταβλητής για κάθε αρχική τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής.

Δυο είναι οι επικρατέστεροι τύποι μεθόδων εξομάλυνσης: (α) αυτή του φιλτραρίσματος με μέσους όρους (moving average) και (β) αυτή της τοπικά σταθμισμένης παλινδρόμησης. Η διαδικασία εξομάλυνσης της τοπικά σταθμισμένης παλινδρόμησης αφορά μια σταθμισμένη συνάρτηση παλινδρόμησης που ορίζεται για τις τιμές που περιέχονται στο επιλεγμένο βήμα εξομάλυνσης. Η μέθοδος αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον

τύπο συνάρτησης που χρησιμοποιείται στην παλινδρόμηση σε: (α) μέθοδο «Lowess» (Locally weighted scatter plot smooth) που χρησιμοποιεί γραμμική πολυωνυμική συνάρτηση και σε (β) μέθοδο «Loess» που χρησιμοποιεί μη γραμμική πολυωνυμική συνάρτηση 2<sup>ου</sup> βαθμού.

Στην παρούσα διατριβή η διαδικασία της εξομάλυνσης εφαρμόστηκε σε σύνολα δεδομένων βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς σε ορισμένες περιπτώσεις πλημμυρόπληκτων περιοχών υπό εξέταση με τη βοήθεια του εργαλείου προσαρμογής καμπύλης (curve fitting tool) της στατιστικής εργαλειοθήκης (statistical toolbox) σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab v. 2008a. Ως εξαρτημένη μεταβλητή θεωρείται το μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» και ως ανεξάρτητη μεταβλητή θεωρείται το πλημμυρικό μέγεθος «βάθος νερού».

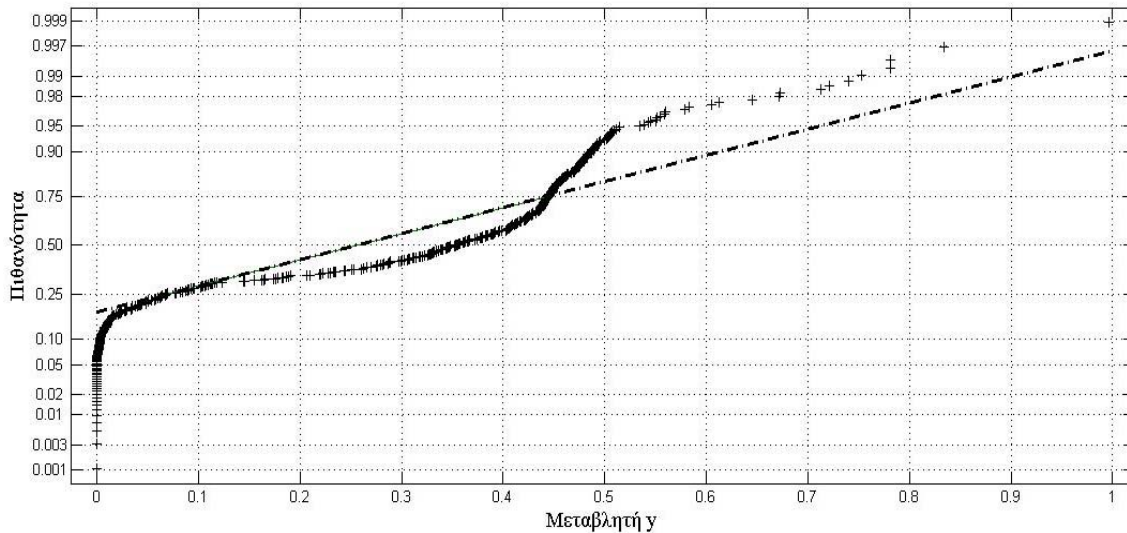
Από τις διαθέσιμες μεθόδους εξομάλυνσης για το εργαλείο επιλέχθηκε η εφαρμογή της τοπικά σταθμισμένης παλινδρόμησης με γραμμική πολυωνυμική συνάρτηση, δηλαδή η μέθοδος «Lowess». Το βήμα εξομάλυνσης ορίστηκε ίσο με το 25% του ολικού αριθμού στοιχείων του αρχικού συνόλου δεδομένων. Όταν το σύνολο δεδομένων υπό εξέταση περιέχει ακραίες τιμές οι εξομαλυσμένες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής μπορεί να διαταραχθούν και να μην αντανακλούν τη συμπεριφορά του όγκου των γειτονικών τιμών. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η ανθεκτική εκδοχή της μεθόδου «Lowess» η μέθοδος «Robust Lowess», στην οποία η τοπικά σταθμισμένη συνάρτηση παλινδρόμησης είναι ανθεκτική στις ακραίες τιμές δεδομένων. Λεπτομερής πληροφορία για τις μεθόδους στατιστικής εξομάλυνσης δεδομένων παρατίθεται στο εγχειρίδιο βοήθειας του εργαλείου προσαρμογής καμπύλης στο υπολογιστικό περιβάλλον του Matlab.

Η στατιστική εξομάλυνση δεδομένων εφαρμόστηκε για τα σύνολα δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που αναπτύχθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής (Δήμος Μοσχάτου και Δήμοι περιοχών Ανατολικής Αττικής) λόγω πλημμυρικών γεγονότων κατάκλυσης (βλέπε υποκεφάλαιο 9.2).

### 7.3.4 Έλεγχος κανονικότητας δεδομένων

Προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος στατιστικής συνάρτησης κατανομής που συσχετίζει βέλτιστα δύο σύνολα δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς (π.χ. σύνολα στοιχείων βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς), θα πρέπει πρώτα να ελεγχθεί εάν τηρούνται οι προϋποθέσεις σε αυτά τα σύνολα δεδομένων για τον τύπο στατιστικής συνάρτησης που έχει επιλεγεί. Για παράδειγμα, αν και η κανονικότητα των δεδομένων δεν αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την προσαρμογή σε μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, ωστόσο επηρεάζει τους ελέγχους υπόθεσης (hypothesis tests) και τα διαστήματα εμπιστοσύνης, που δεν αποδίδουν αξιόπιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται σε σύνολα δεδομένων που δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Έτσι, μετά το στάδιο της αφαίρεσης εξωδειγματικών τιμών και το στάδιο της ενδεχόμενης στατιστικής εξομάλυνσης στα δεδομένα ακολουθεί ο έλεγχος κανονικότητας των δεδομένων.

Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται το εργαλείο προσαρμογής κατανομής συνάρτησης (distribution fitting tool) στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab και εφαρμόζεται η γραφική μέθοδος σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας (normal probability plot). Σ' αυτό το χαρτί το διάγραμμα είναι οπωσδήποτε αύξουσα συνάρτηση και σε μεγάλα δείγματα που προέρχονται από κανονικό πληθυσμό το διάγραμμα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Συνεπώς, στην περίπτωση υπέρθεσης της κατανομής πιθανότητας του εξεταζόμενου δείγματος στο διάγραμμα, οι σημαντικές αποκλίσεις του δείγματος από την ευθεία γραμμή αποτελούν έναν σαφή τρόπο γραφικής απεικόνισης της μη κανονικότητας του εξεταζόμενου δείγματος. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 7-8 η γραφική μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε ένα δείγμα τιμών μιας εξαρτημένης μεταβλητής  $y$ . Παρατηρείται ότι η κατανομή πιθανότητας του δείγματος αποκλίνει σημαντικά από την ευθεία της κανονικής κατανομής και επομένως συμπεραίνεται ότι το δείγμα τιμών  $y$  δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή.



Εικόνα 7-8. Γραφική μέθοδος σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας για τον έλεγχο κανονικότητας μεταβλητών

Γενικά, στις περιπτώσεις που ένα δείγμα δεν πληροί τις προϋποθέσεις του επιλεγμένου τύπου στατιστικής συνάρτησης εξετάζεται το ενδεχόμενο μετασχηματισμού (transformation) των δεδομένων του δείγματος, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε μια απλοποιημένη σχέση μεταξύ της μετασχηματισμένης ανεξάρτητης μεταβλητής και της μετασχηματισμένης εξαρτημένης μεταβλητής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απλοποίηση της πρόγνωση της σχέσης. Συνηθισμένες μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό δεδομένων περιλαμβάνουν τον λογάριθμο  $\ln(y)$  και τις απλές δυναμοσυναρτήσεις της μορφής  $y^{1/2}$ ,  $y^l$ . Οι συναρτήσεις μετασχηματισμού πρέπει να είναι πλήρως αναστρέψιμες και συνεχείς. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους μετασχηματισμούς μπορεί κανείς να γραμμικοποιήσει ένα μη γραμμικό μοντέλο, να συμπυκνώσει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής ή να απλοποιήσει το μοντέλο ώστε να περιλαμβάνει λιγότερες παραμέτρους.

Υπάρχουν ωστόσο, συγκεκριμένα μειονεκτήματα που συνδέονται με τους μετασχηματισμούς δεδομένων:

- Στο μετασχηματισμό δεδομένων μέσω λογαρίθμησης ή τετραγωνικής ρίζας, τυχόν αρνητικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής δεν μπορούν να συμμετέχουν
- Σε όλους τους μετασχηματισμούς δεδομένων, η βασική υπόθεση της σταθερής διασποράς των καταλοίπων (residuals) ανυψώνεται. Συνεπώς, απαιτείται έλεγχος στην επιλογή και αποδοχή ενός μετασχηματισμού δεδομένων. Εάν απεικονιστούν τα κατάλοιπα των μετασχηματισμένων δεδομένων σε γράφημα μετασχηματισμένης κλίμακας και διαπιστωθεί ότι τα λάθη είναι τυχαία με ελάχιστη διασπορά, τότε ο μετασχηματισμός δεδομένων θεωρείται επιτυχής.

### 7.3.5 Μέθοδος bootstrapping

Η στατιστική μέθοδος «bootstrapping» εφαρμόζεται για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας (π.χ. εκτίμηση τυπικού σφάλματος, διαστήματος εμπιστοσύνης) μιας διαδεδομένης στατιστικής παραμέτρου (π.χ. μέση δειγματική τιμή) ενός συνόλου εμπειρικών δεδομένων. Η μέθοδος εφαρμόζεται στην περίπτωση που ένα σύνολο δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από ένα ανεξάρτητο και ομοιόμορφα κατανομημένο πληθυσμό (αρχικό σύνολο). Λαμβάνοντας τιμές με τυχαία δειγματοληψία από το αρχικό σύνολο μπορεί να δημιουργείται κάθε φορά ένα καινούργιο σύνολο δεδομένων στο οποίο υπολογίζεται η μέση δειγματική τι-

μή, θεωρώντας ότι αυτή ακολουθεί την κανονική κατανομή σύμφωνα με το κεντρικό οριακό θεώρημα. Επαναλαμβάνοντας την ανάπτυξη νέου συνόλου δεδομένων εκατοντάδες φορές, παρατηρείται η διακύμανση τιμών της μέσης τιμής και έτσι ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα στην εκτίμησή της. Για παράδειγμα, το διάστημα εμπιστοσύνης με επίπεδο σημαντικότητας 90% προσδιορίζεται με τον υπολογισμό των ποσοστημοίων (percentile) 97.5 % και 2.5 % ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{percentile}97.5\% &= \mu + 1.64\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \\ \text{percentile}2.5\% &= \mu - 1.64\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \end{aligned} \quad (7.2)$$

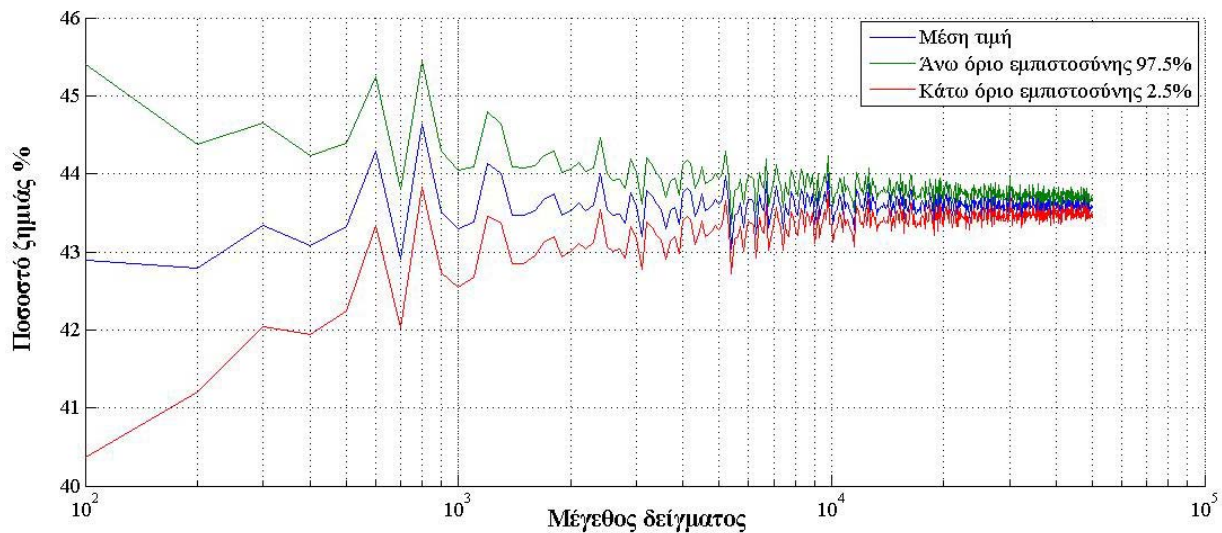
όπου  $\mu$  = μέση τιμή του συνόλου μέσων τιμών

$\sigma$  = τυπική απόκλιση του συνόλου μέσων τιμών

$n$  = πλήθος στοιχείων στο δείγμα

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα στην εφαρμογή με άμεσα αποτελέσματα και το βασικό μειονέκτημα είναι ότι αυτή η προφανής απλότητα μπορεί να αποκρύψει σημαντικές υποθέσεις που προϋποθέτει η εφαρμογή της μεθόδου, όπως είναι η ανεξαρτησία των συνόλων μεταξύ τους.

Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου «bootstrapping» αποτελεί η εκτίμηση του τυπικού σφάλματος και των ορίων εμπιστοσύνης της μέσης τιμής του ποσοστού ζημιάς για ένα δείγμα 100 πλημμυρόπληκτων κατοικιών στην πόλη της νέας Ορλεάνης. Η Εικόνα 7-9 δείχνει τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου «bootstrapping». Παρατηρείται ότι όταν οι πλημμυρόπληκτες κατοικίες είναι μόλις 100 (αρχικό σύνολο), η μέση τιμή του ποσοστού ζημιάς παρουσιάζει τυπικό σφάλμα  $\pm 2.5\%$ , ενώ, όταν οι πλημμυρόπληκτες κατοικίες αυξηθούν σε 50 000, τότε το τυπικό σφάλμα στην εκτίμηση της μέσης τιμής του ποσοστού ζημιάς ελαχιστοποιείται. Ως γνωστόν, η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της δειγματικής μέσης τιμής ενός συνόλου μειώνεται όσο το πλήθος στοιχείων στο σύνολο αυξάνει.



Εικόνα 7-9. Εφαρμογή μεθόδου «bootstrapping» για τη μέση τιμή δείγματος ποσοστού ζημιάς

## 7.4 Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο περιγράφηκαν αναλυτικά τα αναγκαία στάδια στατιστικής επεξεργασίας σε σύνολα δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς στις υπό εξέταση πληγείσες περιοχές. Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται η ταυτόχρονη στατιστική ανάλυση των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που διακρίνεται στα παρακάτω στάδια:

- Επιλογή και προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης κατανομής: επιλογή τύπου κατανομής, επιλογή συνάρτησης κατανομής και εκτίμηση παραμέτρων κατανομής.
- Έλεγχος καταλληλότητας της συνάρτησης κατανομής: προσδιορισμός του συντελεστή συσχέτισης και έλεγχος σημαντικότητας στο συντελεστή συσχέτισης.
- Στατιστική πρόγνωση: η εκτίμηση της τιμής μεταβλητής για συγκεκριμένες συνθήκες. Η εκτίμηση μπορεί να είναι είτε σημειακή είτε εκτίμηση διαστήματος.
- Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας αποτελεσμάτων πρόγνωσης: προσδιορισμός ορίων εμπιστοσύνης της πρόγνωσης.

### 7.4.1 Επιλογή τύπου και προσαρμογή συνάρτησης κατανομής

Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης (curve-fitting tool) της εργαλειοθήκης στατιστικής ανάλυσης (statistical toolbox) στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab R2008a εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή για την επιλογή τύπου και την προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης κατανομής σε δείγματα δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς για κάθε περίπτωση μελέτης εφαρμογής. Ως εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  θεωρείται η αδιάστατη μεταβλητή του ποσοστού ζημιάς, και ως ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  θεωρείται το πλημμυρικό μέγεθος υπό εξέταση, το οποίο μπορεί να είναι το βάθος νερού, ο ρυθμός ανύψωσης της στάθμης πλημμύρας και το γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής. Από τους διαθέσιμους τύπους συναρτήσεων κατανομής διερευνήθηκαν γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης, τα οποία διακρίνονται σε συναρτήσεις πολυωνυμικής μορφής ( $1^{\circ}$ ,  $2^{\circ}$ ,  $m$  βαθμού) και σε δυναμοσυναρτήσεις (power functions) αντίστοιχα.

Η προσαρμογή απαιτεί ένα παραμετρικό μοντέλο, το οποίο σχετίζει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής με τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής μέσω ενός ή περισσότερων παραμέτρων. Η γενική μορφή ενός μοντέλου παλινδρόμησης δίνεται από την εξίσωση:

$$y_i = f(x_i, \beta) + \varepsilon_i \quad (7.3)$$

όπου  $y_i$  = εξαρτημένη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$x_i$  = ανεξάρτητη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$\beta$  = συντελεστές παλινδρόμησης

$\varepsilon_i$  = σφάλμα στην πρόγνωση της εξαρτημένης μεταβλητής  $y_i$

Στο εργαλείο προσαρμογής καμπύλης η εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης για τη βέλτιστη προσαρμογή μιας θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στο πληθυσμό υλοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares), η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων (residuals). Ως κατάλοιπο  $r_i$  για το στοιχείο  $i$  ορίζεται η διαφορά μεταξύ της παρατηρημένης τιμής  $y_i$  της ε-



ξαρτημένης μεταβλητής και της αντίστοιχης εκτιμώμενης τιμής  $\hat{y}_i$  και θεωρείται ως το σφάλμα που προκύπτει από την προσαρμογή της συνάρτησης στα δεδομένα.

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (7.4)$$

Επομένως, το άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων δίνεται από τον τύπο:

$$SSE = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7.5)$$

όπου  $n$  = το πλήθος των στοιχείων του πληθυσμού

$SSE$  = εκτιμητής του αθροίσματος των τετραγώνων λόγω σφάλματος

Για την προσαρμογή των δεδομένων γίνονται δύο σημαντικές υποθέσεις σε ό,τι αφορά τα σφάλματα. Θεωρείται ότι: (α) σφάλματα υπάρχουν μόνον στο σύνολο τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής και (β) είναι τυχαία και ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή ίση με το 0 και σταθερή και ίδια διασπορά, δηλαδή  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ .

Παρόλο που η προσαρμογή δεδομένων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δεν απαιτεί κανονικά κατανεμημένα σφάλματα για την εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης, η μέθοδος αυτή αποδίδει βέλτιστα (θεώρημα Gauss-Markov) όταν τα δεδομένα δεν περιέχουν μεγάλο αριθμό σφαλμάτων με ακραίες τιμές. Η κανονική κατανομή αποτελεί μία από τις κατανομές πιθανότητας στην οποία τα ακραία τυχαία σφάλματα είναι σπάνια. Ωστόσο, τα στατιστικά αποτελέσματα των ορίων εμπιστοσύνης και πρόγνωσης της συνάρτησης παλινδρόμησης απαιτούν τα σφάλματα να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης υπολογίζει και τα όρια εμπιστοσύνης για κάθε εκτίμηση συντελεστή παλινδρόμησης με ορισμένο συντελεστή εμπιστοσύνης ίσο με 90%.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων είναι η ευαισθησία της στις ακραίες τιμές δεδομένων. Οι ακραίες τιμές έχουν μεγάλη επιρροή στην προσαρμογή, διότι τα κατάλοιπα υψωμένα στη δύναμη του 2 μεγεθύνουν την επίδραση των εξωδευγματικών τιμών. Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των εξωδευγματικών τιμών κατά την προσαρμογή, το εργαλείο δίνει τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου των ανθεκτικών (robust) ελαχίστων τετραγώνων. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την επεξεργασία δεδομένων εφαρμόζεται μέθοδος αναγνώρισης και αφαίρεσης των εξωδευγματικών τιμών.

Οι τύποι της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του εργαλείου για την εκτίμηση συντελεστών παλινδρόμησης διακρίνονται σε: (α) μέθοδο γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Linear Least Squares), και σε (β) μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Nonlinear Least Squares), ανάλογα με το επιλεγμένο μοντέλο παλινδρόμησης.

### Μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης

Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης στο Matlab χρησιμοποιεί τη μέθοδο γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων για να προσαρμόσει ένα γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης στα δεδομένα. Ως γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης ορίζεται η συνάρτηση που είναι γραμμική ως προς τους συντελεστές, όπως είναι μια συνάρτηση πολυωνυμικής μορφής. Η γενική μορφή ενός γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης (πολυωνυμική συνάρτηση 1<sup>ου</sup> βαθμού) δίνεται από την εξίσωση:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (7.6)$$

όπου  $y_i$  = εξαρτημένη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$x_i$  = ανεξάρτητη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$\beta_0, \beta_1$  = συντελεστές παλινδρόμησης

$\varepsilon_i$  = σφάλμα στην πρόγνωση της εξαρτημένης μεταβλητής  $y_i$

Στην περίπτωση μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης και με την προϋπόθεση ότι τα κατάλοιπα της συνάρτησης ακολουθούν κανονική κατανομή, η μέθοδος γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων θεωρείται ότι αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο εκτίμησης συντελεστών της συνάρτησης (θεώρημα Gauss-Markov).

### Μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης

Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης στο Matlab χρησιμοποιεί τη μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων για να προσαρμόσει ένα μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης στα δεδομένα. Ως μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης ορίζεται η συνάρτηση που είναι μη γραμμική ως προς τους συντελεστές, όπως είναι μια δυναμοσυνάρτηση. Η απλοποιημένη μορφή ενός μη γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης (δυναμοσυνάρτηση) δίνεται από την εξίσωση:

$$y_i = \alpha x_i^\beta + \varepsilon_i \quad (7.7)$$

όπου  $y_i$  = εξαρτημένη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$x_i$  = ανεξάρτητη μεταβλητή στοιχείου  $i$

$\alpha, \beta$  = συντελεστές παλινδρόμησης

$\varepsilon_i$  = σφάλμα στην πρόγνωση της εξαρτημένης μεταβλητής  $y_i$

Η διαδικασία εκτίμησης συντελεστών παλινδρόμησης στην περίπτωση μη γραμμικών μοντέλων είναι πιο πολύπλοκη και περιλαμβάνει επαναληπτική διαδικασία δοκιμών.

### Σταθερή συνάρτηση

Σε περιπτώσεις που η προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης κατανομής σε ένα σύνολο δεδομένων δεν αντανακλά τη φύση των δεδομένων, χρησιμοποιείται η «λύση» της σταθερής συνάρτησης για τη στατιστική πρόγνωση της εξαρτημένης μεταβλητής. Η σταθερή συνάρτηση αποτελεί μια απλοποιημένη μορφή της κλιμακωτής συνάρτησης.

Μια συνάρτηση  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ονομάζεται κλιμακωτή συνάρτηση, όταν εκφράζεται από την εξίσωση:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i X_{A_i}(x) \quad (7.8)$$

όπου  $n \geq 0$ ,  $a_i$  = πραγματικοί αριθμοί

$A_i =$  διαστήματα τιμών

$X_{A_i} =$  η δείκτρια συνάρτηση του  $A_i$ , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$X_{A_i}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A_i \\ 0 & \end{cases} \quad (7.9)$$

Στον ορισμό τα διαστήματα  $A_i$  θεωρείται ότι έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

(α) τα διαστήματα είναι ανεξάρτητα  $A_i \cap A_j = \emptyset$  για  $i \neq j$

(β) η ένωση των διαστημάτων είναι όλο το ρητό σύνολο  $\cup_{i=1}^n A_i = \mathbb{R}$

Μια κλιμακωτή συνάρτηση  $f: A \rightarrow B$  είναι σταθερή συνάρτηση, όταν ισχύει:

$$f(x) = f(y) \quad \text{όπου} \quad x, y \in A$$

Με άλλα λόγια η στατιστική πρόγνωση μιας σταθερής συνάρτησης είναι μια σταθερή τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής για όλες τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Συνήθως η σταθερή τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής θεωρείται ίση με τη δειγματική μέση τιμή των εμπειρικών δεδομένων της εξαρτημένης μεταβλητής στο δείγμα.

## 7.4.2 Έλεγχος καταλληλότητας της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής

Η αβεβαιότητα στην πρόγνωση μιας νέας τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής από τη θεωρητική συνάρτηση κατανομής εξαρτάται από το βαθμό καταλληλότητας της προσαρμογής της συνάρτησης στο σύνολο δεδομένων. Κατάλληλη προσαρμογή μιας συνάρτησης σε δεδομένα θεωρείται η προσαρμογή για την οποία μπορεί να ισχύουν τα παρακάτω: (α) η εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης έχει μικρή αβεβαιότητα, (β) τα δεδομένα μπορεί να παραχθούν από τη συνάρτηση δεδομένου των παραδοχών της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και (γ) η συνάρτηση εξηγεί μεγάλο ποσοστό της διασποράς των δεδομένων.

Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης στο Matlab εφαρμόζει έλεγχο καταλληλότητας (goodness-fit) της επιλεγμένης θεωρητικής συνάρτησης με γραφικά και υπολογιστικά εργαλεία. Τα υπολογιστικά και γραφικά εργαλεία του ελέγχου καταλληλότητας προσαρμογής μιας συνάρτησης είναι όλα γνωστά από την επιστήμη της στατιστικής. Η ανάλυση της γραφικής απεικόνισης των καταλοίπων (residuals) αποτελεί γραφική μέθοδο ελέγχου καταλληλότητας της συνάρτησης. Εάν η προσαρμογή της συνάρτησης είναι κατάλληλη, τα κατάλοιπα θα πρέπει να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά των τυχαίων σφαλμάτων, δηλαδή στη γραφική τους απεικόνιση τα κατάλοιπα αναμένεται να εμφανίζονται τυχαία τοποθετημένα γύρω από την τιμή 0. Αντίθετα, όταν στη γραφική τους απεικόνιση τα κατάλοιπα ακολουθούν ένα συστηματικό μοτίβο, αυτό θεωρείται ως σαφής ένδειξη ότι η θεωρητική συνάρτηση κατανομής δεν περιγράφει το δείγμα ικανοποιητικά.

Επίσης, το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης χρησιμοποιεί τα εξής υπολογιστικά εργαλεία για τον έλεγχο καταλληλότητας της προσαρμογής:

(α) Το άθροισμα των τετραγώνων λόγω λάθους (Sum of Squares due to Error - SSE). Αυτός ο δείκτης υπολογίζει την ολική απόκλιση των παρατηρημένων τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής από τις αντίστοιχες προσαρμοσμένες τιμές της μεταβλητής. Ταυτίζεται με το άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων και δι-

νεται από την εξίσωση (7.5). Όσο ο δείκτης SSE τείνει στο 0 τόσο πιο κατάλληλη θεωρείται η προσαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής.

(β) Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) και ο διορθωμένος συντελεστής προσδιορισμού (adjusted  $R^2$ ). Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  ισούται με το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  μεταξύ των παρατηρημένων τιμών και των εκτιμώμενων τιμών των μεταβλητών το οποίο ορίζεται από την εξίσωση:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (7.10)$$

όπου  $x_i, y_i =$  οι παρατηρημένες τιμές των μεταβλητών στοιχείου  $i$

$\hat{x}_i, \hat{y}_i =$  οι εκτιμώμενες τιμές των μεταβλητών στοιχείου  $i$

$\bar{x}, \bar{y} =$  οι μέσες τιμές των παρατηρημένων τιμών των μεταβλητών

Οι τιμές του  $R^2$  κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1 και όσο πιο πολύ ο συντελεστής  $R^2$  προσεγγίζει το 1 τόσο πιο κατάλληλη θεωρείται η προσαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  δείχνει πόσο καλά η στατιστική συνάρτηση εξηγεί τη διασπορά των δεδομένων. Επομένως, το  $1 - R^2$  δίνει το μέτρο αβεβαιότητας της προσαρμογής της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής. Εάν αυξηθεί ο αριθμός των συντελεστών παλινδρόμησης στο μοντέλο, ο συντελεστής  $R^2$  αυξάνεται χωρίς να έχει βελτιωθεί πραγματικά η προσαρμογή. Για να αποφευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση ο διορθωμένος συντελεστής  $R^2$ .

Τέλος, είναι σημαντικό να υλοποιηθεί και ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  στη συσχέτιση των μεταβλητών. Ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης, δηλαδή της υπόθεσης  $H_0: \rho = 0$ , αποτελεί ένα διαδεδομένο τρόπο αυτού του ελέγχου. Εάν η  $H_0$  αληθεύει, τότε οι δύο μεταβλητές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Ο έλεγχος της υπόθεσης αυτής γίνεται με τον έλεγχο  $t$ , δηλαδή για  $t = \frac{\rho}{\sqrt{\frac{1-\rho^2}{N-2}}}$ ,

όπου  $N - 2$  οι βαθμοί ελευθερίας. Η υπόθεση  $\rho = 0$  απορρίπτεται αν:  $|t| \geq t_{a/2, N-2}$ , όπου  $a$  το επίπεδο σημαντικότητας (significance level). Ένας πιο απλοποιημένος τρόπος ελέγχου στατιστικής σημαντικότητας του  $R^2$ , σύμφωνα με τους Stuart et. al (1999) αποτελεί το κρίσιμο όριο  $R_c$ . Εάν θεωρήσουμε γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και επίπεδο σημαντικότητας  $a = 5\%$ , το κρίσιμο όριο  $R_c$  του  $R^2$  ισούται με:

$$R_c = \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (7.11)$$

Συνεπώς, εάν ισχύει  $|R^2| > R_c$  τότε θεωρείται ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

(γ) Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνισμένου σφάλματος (Root Mean Square Error). Αυτός ο δείκτης είναι, επίσης, γνωστός ως τυποποιημένο σφάλμα λόγω παλινδρόμησης. Πρόκειται για μια εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της τυχαιότητας των δεδομένων και όσο τείνει στην τιμή 0 τόσο πιο κατάλληλη θεωρείται

η προσαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης.

### 7.4.3 Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας αποτελεσμάτων πρόγνωσης

Η αβεβαιότητα στη στατιστική πρόγνωση μιας νέας τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής οφείλεται στην αβεβαιότητα λόγω της προσαρμοσμένης συνάρτησης και στην αβεβαιότητα λόγω τυχαίου σφάλματος. Ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας είναι ο υπολογισμός των ορίων εμπιστοσύνης της νέας τιμής ή της προσαρμοσμένης συνάρτησης. Όσο ο συντελεστής εμπιστοσύνης τείνει στη τιμή 1, δηλαδή αυξάνει η αξιοπιστία της πρόγνωσης, τόσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα εμπιστοσύνης. Αντίθετα, εάν μικρύνει ο συντελεστής εμπιστοσύνης, τόσο πιο «συγκεντρωμένη πρόγνωση» προκύπτει, αλλά τότε αυξάνεται ο βαθμός αβεβαιότητας. Η προεπιλεγμένη τιμή του συντελεστή εμπιστοσύνης που χρησιμοποιείται στην ανάλυση είναι ίση με 0.95.

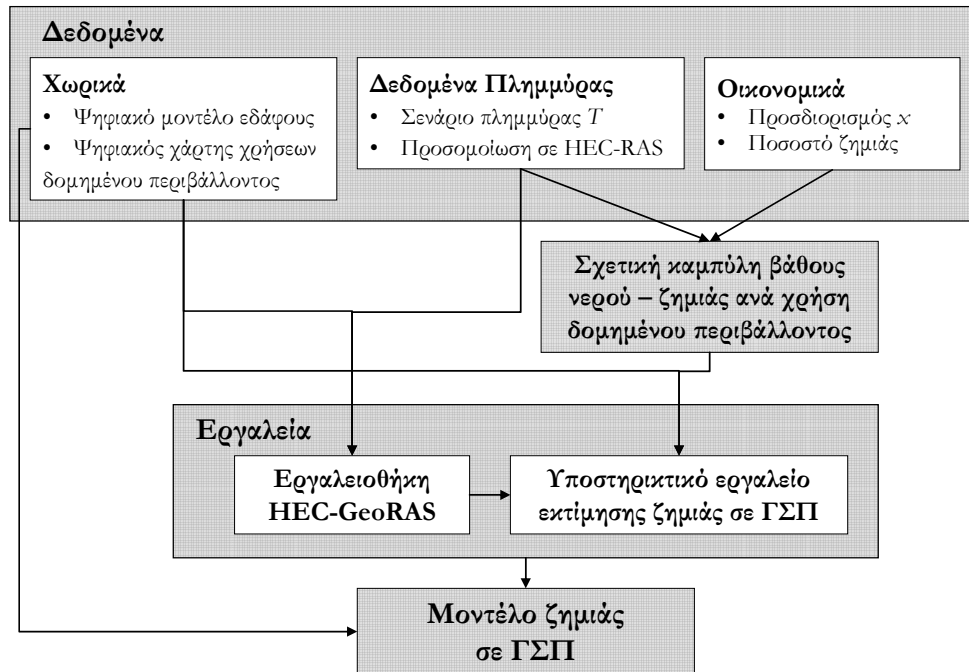
Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης στο Matlab δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν αριθμητικά και γραφικά τα όρια εμπιστοσύνης για τις νέες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής ή της προσαρμοσμένης συνάρτησης λαμβάνοντας υπόψη είτε όλο το σύνολο των τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής είτε μιας μόνο τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής. Έστω, ότι θέλουμε να προσδιοριστεί η πρόγνωση μιας νέας τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής για μια οποιαδήποτε τιμή ανεξάρτητης μεταβλητής, τότε θα δίνεται από την εξίσωση:

$$y_{n+1}(x) = f(x) + \varepsilon \quad (7.12)$$

Το εργαλείο προσαρμογής καμπύλης έχει τη δυνατότητα να εξάγει όρια εμπιστοσύνης και για την προσαρμοσμένη συνάρτηση  $f(x)$  και για την πρόγνωση της τιμής  $y_{n+1}(x)$  με αριθμητικό και γραφικό τρόπο αντίστοιχα.

## 7.5 Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εφαρμογή ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με τη μέθοδο σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 7-10 παρουσιάζει τις κατηγορίες δεδομένων, που απαιτούνται για την εφαρμογή αυτή και τα υποστηρικτικά εργαλεία που λειτουργούν σε περιβάλλον ΓΣΠ και είναι απαραίτητα ως ενδιάμεσα στάδια για την εισαγωγή ορισμένων δεδομένων στο περιβάλλον ΓΣΠ. Τα δεδομένα εισάγονται είτε απευθείας είτε μέσω των υποστηρικτικών εργαλείων σε περιβάλλον ΓΣΠ και αναλύονται χωρικά με τη μορφή κανναβικής δομής.



Εικόνα 7-10. Διάγραμμα ροής εφαρμογής μοντέλου ζημιάς με τη μέθοδο σχετικής καμπύλης σε περιβάλλον ΓΣΠ

Σύμφωνα με την Εικόνα 7-10 διακρίνουμε τις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες δεδομένων:

- Χωρικά δεδομένα: ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) και ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης. Το ΨΜΕ καθορίζει το βήμα καννάβου των υπόλοιπων δεδομένων και ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης, τις χρήσεις δομημένου περιβάλλοντος για τις οποίες θα αναπτυχθεί η μέθοδος σχετικής καμπύλης και θα αποτιμηθεί η άμεση πλημμυρική ζημιά. Εισάγονται απευθείας στο περιβάλλον ΓΣΠ.
- Δεδομένα πλημμύρας: χάρτης περιβάλλουσας βάθους νερού υπό σενάριο πλημμύρας περιόδου επαναφοράς  $T$ . Εισάγεται μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS (βλέπε εδάφιο 6.4.4).
- Οικονομικά δεδομένα: προσδιορισμός της ολικής αξίας δομημένου περιβάλλοντος ανά μονάδα επιφάνειας  $x$  για κάθε χρήση δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση. Εισάγεται μέσω του υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε ΓΣΠ.
- Σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς. Αναπτύσσεται ανά χρήση δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση. Εισάγεται μέσω του υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε ΓΣΠ.

Έτσι, η μεθοδολογία εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς με τη μέθοδο της σχετικής καμπύλης που περιγράφηκε στην Εικόνα 7-6, προσαρμόζεται κατά την εφαρμογή της σε περιβάλλον ΓΣΠ ως εξής:

Για κάθε σενάριο πλημμύρας  $T$  εισάγεται στο υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ ο αντίστοιχος χάρτης πλημμυρικού πεδίου, ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων δομημένης περιοχής, και η αντίστοιχη εμπειρική σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς για κάθε χρήση δομημένου περιβάλλοντος, και υπολογίζεται σε απόλυτη τιμή η ολική, άμεση πλημμυρική ζημιά για κάθε χρήση δομημένου περιβάλλοντος σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$D_T = x \sum (A_{ij}^{(n)})_T (P_{ij}^{(n)})_T \quad (7.13)$$

όπου  $D_T$  = το άθροισμα ολικής πλημμυρικής ζημιάς σε (Μ€) για όλες τις χρήσεις  $n$  υπό σενάριο  $T$

$x$  = ολική επικαιροποιημένη αξία δομημένου περιβάλλοντος ανά χρήση και ανά μονάδα επιφάνειας

$A_{ij}$  = κατακλυσμένη επιφάνεια από τιμές βάθους νερού της περιβάλλουσας που ανήκουν στο  $[d_i, d_j]$

$T$  = περίοδος επαναφοράς σεναρίου πλημμύρας

$n$  = χρήση δομημένου περιβάλλοντος

$p_{ij}$  = οι τιμές ποσοστού ζημιάς που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς για την επιφάνεια  $A_{ij}$

### 7.5.1 Υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς σε ΓΣΠ

Η ανάπτυξη του υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης άμεσης ζημιάς σε ΓΣΠ υλοποιήθηκε στο πλαίσιο εκπόνησης του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Ανάπτυξη λογισμικού για την εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου - FLAS» του Κέντρου Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων στη Σχολή των Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ που ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2007 με συντονιστή του προγράμματος τον Καθηγητή κ. Γ. Τσακίρη. Η συγγραφέας υπήρξε υπεύθυνη για το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάπτυξης του εργαλείου, ενώ ο προγραμματισμός του εργαλείου υλοποιήθηκε από τον ερευνητή Δρ. Η. Κλαμπάνο.

Η ανάπτυξη του εργαλείου έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.NET και βασίστηκε στο πρόγραμμα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (ΓΣΠ) Arc-View έκδοσης 9.1. Λειτουργεί αποκλειστικά σε περιβάλλον ΓΣΠ και χαρακτηρίζεται ως υποστηρικτικό εργαλείο, διότι «τρέχει» μόνο στο πρόγραμμα αυτό ως πρόσθετη διαδικασία υπολογισμού. Η λειτουργία του γίνεται με παραθυρικό περιβάλλον, φιλικό προς τον χρήστη.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το εργαλείο χρησιμοποιεί δεδομένα εισόδου ψηφιδωτής μορφής (αρχεία ΓΣΠ) και συγκεκριμένα η λειτουργία του απαιτεί: (α) έναν χάρτη πλημμυρικού πεδίου ψηφιδωτής μορφής (αρχείο ΓΣΠ), (β) έναν χάρτη χρήσεων γης ψηφιδωτής μορφής (αρχείο ΓΣΠ) και (γ) την εισαγωγή εμπειρικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για κάθε χρήση γης. Το εργαλείο εξάγει ως αριθμητικά αποτελέσματα την αποτίμηση της ολικής άμεσης ζημιάς σε απόλυτες τιμές για κάθε χρήση δομημένου περιβάλλοντος και ως γραφικά αποτελέσματα την προβολή της χωρικής κατανομής των αριθμητικών αποτελεσμάτων στο περιβάλλον ΓΣΠ. Τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής είναι απαραίτητο να διαθέτουν όλα το ίδιο βήμα καννάβου και κατά συνέπεια και ο εξαγόμενος χάρτης αναμενόμενης ζημιάς θα διαθέτει το ίδιο βήμα καννάβου.

Το εργαλείο αυτοματοποιεί τον υπολογισμό της ολικής ζημιάς στη δομημένη περιοχή κάθε χρήσης υπό ένα σενάριο πλημμύρας και ταυτόχρονα έχει τη δυνατότητα να προβάλλει την χωρική κατανομή της ζημιάς στο περιβάλλον ΓΣΠ. Για να το πετύχει αυτό, το εργαλείο εφαρμόζει τις εμπειρικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς, οι οποίες εισάγονται στο εργαλείο με παραθυρικό περιβάλλον. Οι καμπύλες αφορούν τις κατηγορίες χρήσεων δομημένου περιβάλλοντος, οι οποίες περιλαμβάνονται στον ψηφιακό χάρτη χρήσεων γης. Έτσι, για κάθε χρήση δομημένου περιβάλλοντος αντιστοιχεί μια εμπειρική καμπύλη, η οποία δίνει αριθμητικό αποτέλεσμα εκτίμησης ολικής ζημιάς σε εκατομμύρια ευρώ (Μ€) ανά μονάδα επιφάνειας (π.χ. το τετραγωνικό μέτρο). Αυτό προκύπτει όταν κάθε τιμή ποσοστού ζημιάς που καθορίζεται από την τιμή βάθους νερού στην καμπύλη πολλαπλασιαστεί με την ολική αρχική αξία δομημένου περιβάλλοντος για την ορισμένη χρήση δομημένου περιβάλλοντος (π.χ. κατοικία). Στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται το αριθμητικό αποτέλεσμα εκτίμη-

σης ολικής ζημιάς σε Μ€ ανά μονάδα επιφάνειας με την αντίστοιχη επιφάνεια κατακλυσμένης δομημένης περιοχής που ανήκει στην ορισμένη χρήση και προκύπτει τελικά το αριθμητικό αποτέλεσμα της ολικής ζημιάς σε Μ€ ανά χρήση δομημένου περιβάλλοντος.

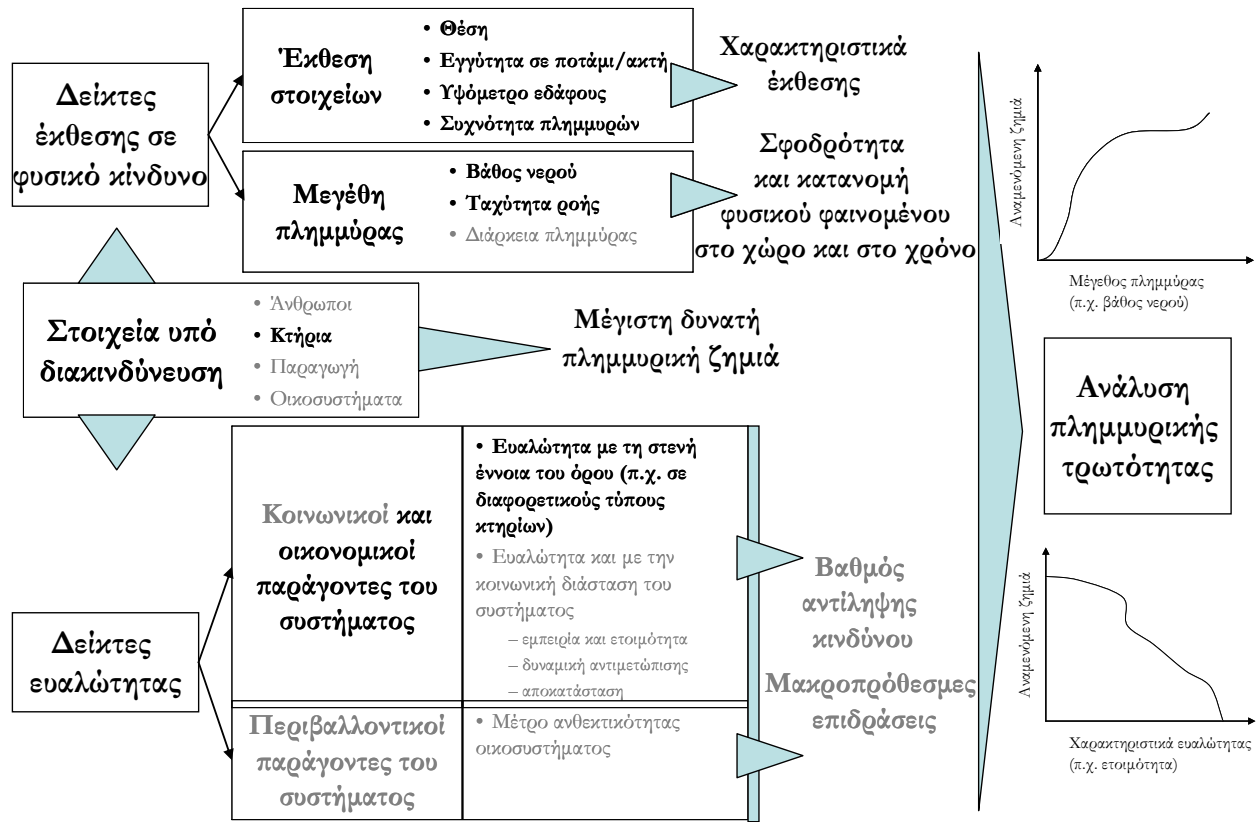
Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της ζημιάς ανά φαντίο καννάβου του χάρτη πλημμύρας και ανάλογα παραδείγματα παρατίθενται στο εγχειρίδιο χρήστη του εργαλείου [FLAS 2007]. Επίσης, υποκεφάλαιο Π17.1 (Τόμος II) παρατίθενται εικόνες του παραθυρικού περιβάλλοντος του εργαλείου (snapshots).

## 7.6 Μοντέλο ζημιάς στο πλαίσιο εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης

Στο υποκεφάλαιο 3.1 η διατριβή αναφέρεται στη σχέση μεταξύ πλημμυρικής ζημιάς, τρωτότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης με στόχο να αποσαφηνίσει βασικές εισαγωγικές έννοιες που σχετίζονται με την πλημμυρική διακινδύνευση και να αναδείξει τη σημασία της εκτίμησης πλημμυρικής ζημιάς στη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η πλημμυρική διακινδύνευση ορίστηκε στη διατριβή ως μια συνάρτηση πιθανοτήτων και αναμενομένων ζημιών που προκύπτουν από ένα σύνολο ανεπιθύμητων γεγονότων του φυσικού κινδύνου της πλημμύρας. Συνεπώς, η εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς αποτελεί προϋπόθεση για την εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Στο υποκεφάλαιο όμως αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τρωτότητα που αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του υπό εξέταση συστήματος προσδιορίζεται ρητά από τον τρόπο ανάπτυξης του μοντέλου ζημιάς. Δηλαδή, ένα στοιχείο υπό την απειλή να πάθει ζημιά είναι τόσο πιο τρωτό όσο πιο εκτεθειμένο βρίσκεται σε έναν φυσικό κίνδυνο και όσο πιο ευάλωτο είναι στην επίδραση του κινδύνου. Συνεπώς, η τρωτότητα έναντι πλημμύρας προσδιορίζεται με την ανάπτυξη δεικτών έκθεσης σε κίνδυνο και ευαλότητας του συστήματος. Το σχήμα της Εικόνας 7-11 απεικονίζει παραδείγματα δεικτών έκθεσης και ευαλότητας του συστήματος που απαιτούνται για την εκτίμηση της πλημμυρικής τρωτότητας.





Εικόνα 7-11. Συμβολή ενός μοντέλου ζημιάς στην εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης

Επειδή κάθε στοιχείο υπό απειλή είναι λίγο έως πολύ εκτεθειμένο σε πλημμυρικά γεγονότα και είναι λίγο έως πολύ ευάλωτο σε αυτά, οι δείκτες έκθεσης και ευαλότητας σχετίζονται πάντα με τα στοιχεία υπό απειλή. Επομένως, καθοριστικό σημείο αποτελεί ο προσδιορισμός των στοιχείων υπό απειλή πλημμύρας με τελικό στόχο την εκτίμηση της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς υπό σενάριο πλημμύρας. Στο σχήμα της Εικόνας 7-11 έχει τονιστεί με έντονα γράμματα η ανάπτυξη μοντέλου ζημιάς για την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, στην οποία προφανώς το στοιχείο υπό απειλή είναι το δομημένο περιβάλλον. Οι δείκτες έκθεσης στην πλημμύρα του συστήματος υπό εξέταση προσδιορίζονται αυτόματα κατά τη διαδικασία εκτίμησης της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς. Αντίθετα, οι δείκτες ευαλότητας του συστήματος έναντι πλημμύρας με τη στενή έννοια του όρου, χωρίς, δηλαδή την κοινωνική διάσταση προσδιορίζονται πρόσθετα με την κατηγοριοποίηση του δομημένου περιβάλλοντος και τη χωρική μονάδα ανάλυσής του. Για παράδειγμα, δείκτης ευαλότητας ενός συστήματος μπορεί να θεωρηθεί η διάκριση του δομημένου περιβάλλοντος σε χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου ανά χρήση.

Όταν στην ανάλυση ζημιάς λαμβάνεται υπόψη η τρωτότητα του υπό εξέταση συστήματος, τότε μπορεί να εκτιμηθεί το ποσοστό της δυνητικής ζημιάς που τελικά θα υποστεί το σύστημα, δηλαδή η αναμενόμενη πλημμυρική ζημιά. Επιπλέον, όταν το αποτέλεσμα αυτό εκτιμηθεί για ένα επιλεγμένο εύρος σεναρίων πλημμύρας, τότε μπορεί να προσδιοριστεί η καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς που αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα μέτρα πλημμυρικής διακινδύνευσης.



## Κεφάλαιο 8

# Δεδομένα άμεσης ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Αττική

Το κεφάλαιο εστιάζει στη δημιουργία, στατιστική περιγραφή και επεξεργασία μιας βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς που συλλέχθηκαν αμέσως μετά από ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Τα επεξεργασμένα δεδομένα ζημιάς χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο 9 για την ανάπτυξη εμπειρικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον για την περίπτωση μελέτης στην Αττική. Επομένως, το κεφάλαιο αποτελεί το αναγκαίο στάδιο για την ανάλυση της σχέσης μεταξύ δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς, με στόχο την ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με τη μέθοδο καμπύλης για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση και περιοχή εφαρμογής την Αττική.

Τα δεδομένα άμεσης ζημιάς προέρχονται από δύο πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης που έλαβαν χώρα σε αστικές και περιαστικές περιοχές της ευρύτερης Αττικής. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν παρατηρήσεις άμεσης ζημιάς σε πλημμυρόπληκτα κτήρια στα ακόλουθα γεγονότα κατάκλυσης: (α) το πλημμυρικό γεγονός στις 8 Ιουλίου 2002 σε περιοχές της Νομαρχίας Αθηνών και (β) το πλημμυρικό γεγονός στις 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 σε περιοχές της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής. Αυτά τα πλημμυρικά γεγονότα έπληξαν περιαστικές και αστικές περιοχές στο νομό Αττικής με κοινά χαρακτηριστικά σύνθεσης και κατασκευής του δομημένου περιβάλλοντος και επιπλέον είναι πρόσφατα γεγονότα με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι οι χρήσεις γης στις περιοχές μελέτης δεν έχουν μεταβληθεί σημαντικά μέχρι σήμερα.

Δεδομένης της κοινής προέλευσης κατηγορίας πλημμύρας και πολλών ομοιοτήτων στο πληγέν δομημένο περιβάλλον, οι δύο περιπτώσεις καταγραφής στοιχείων άμεσης ζημιάς σε κτήρια θεωρούνται συγκρίσιμες και γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο συμμετέχουν και οι δύο στην ανάπτυξη της βάσης δεδομένων ζημιάς. Στο μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου αυτού τα δύο σύνολα δεδομένων ζημιάς που προέρχονται από τα δύο πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης, εξετάζονται από κοινού και μόνον στη στατιστική περιγραφή των δεδομένων αντιμετωπίζονται χωριστά.

Το κεφάλαιο αυτό διαρθρώνεται σε έξι υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 8.1 δίνει γενικές πληροφορίες για τα

γεγονότα κατάκλυσης και τον τρόπο συλλογής και καταγραφής των δεδομένων άμεσης ζημιάς αμέσως μετά το πέρας των γεγονότων. Το υποκεφάλαιο 8.2 περιγράφει τη σύνθεση του πληγέντος δομημένου περιβάλλοντος και τη διαμόρφωση χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου ανά χρήση κτηρίου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλίμακα. Το υποκεφάλαιο 8.3 αναφέρεται στο περιεχόμενο της βάσης δεδομένων που αναπτύχθηκε βάσει των δυο συνόλων δεδομένων ζημιάς που καταγράφηκαν στα πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης. Στο υποκεφάλαιο 8.4 περιγράφεται η διαδικασία για την αποτίμηση των δεδομένων άμεσης ζημιάς, δηλαδή ο τρόπος υπολογισμού της αρχικής αξίας ακινήτου και ο τρόπος υπολογισμού του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» για κάθε στοιχείο της βάσης δεδομένων ζημιάς. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 8.5 πραγματοποιείται στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων ζημιάς και στο υποκεφάλαιο 8.6 συγκεντρώνονται τα ανακεφαλαιωτικά σχόλια αυτού του κεφαλαίου.

## 8.1 Γενική πληροφορία

### 8.1.1 Πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης

Η πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 έπληξε Δήμους σε περιοχές της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Αθηνών και Πειραιώς. Σύμφωνα με την καταγραφή του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ) στη Νίκαια, το ολικό ύψος βροχόπτωσης που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του γεγονότος είναι ίσο με 105 mm με μέση ένταση βροχής ίση με 40 mm/h. Η σημειακή περίοδος επαναφοράς εκτιμήθηκε ίση με 180 yr. Ο ποταμός Κηφισός υπερχείλισε σε θέσεις στένωσης της διατομής του λόγω έργων που εκτελούνταν εκείνη την εποχή στις θέσεις αυτές για την μετατροπή της διατομής του ποταμού από ανοιχτή σε κλειστή. Γι' αυτόν το λόγο κατακλύστηκαν Δήμοι της Αθήνας και του Πειραιά που βρίσκονται κατά μήκος του ποταμού και ιδιαίτερα επλήγησαν τα ισόγεια και υπόγεια των παρακείμενων κτηρίων στον ποταμό Κηφισό. Η κατάκλυση επιδεινώθηκε τοπικά σε περιοχές όπου το δίκτυο αποχέτευσης όμβριων υδάτων ήταν από κακοσυντηρημένο έως ανεπαρκές, και επίσης συνολικά από τα ελλιπή μέτρα έκτακτα μέτρα αντιμετώπισης του πλημμυρικού φαινομένου από την πολιτεία.

Η πλημμύρα της 23 - 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 έπληξε Δήμους σε περιοχές της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής μερικές από τις οποίες δέχθηκαν κατά τη διάρκεια δύο 24ώρων ύψη βροχόπτωσης που ξεπέρασαν τα μέσα βροχομετρικά ύψη του μήνα Νοέμβρη. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης καταγράφηκαν στην περιοχή της Πεντέλης, του Διονύσου, του Μαραθώνα και της Βάρης. Σημειώνεται ότι στο βροχομετρικό σταθμό της Πεντέλης (ανήκει στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) καταγράφηκε ολικό ύψος βροχής ίσο με 210 mm, ενώ στο σταθμό του Διονύσου (ανήκει στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) το αντίστοιχο ύψος έφτασε τα 200 mm με μέγιστη ένταση βροχής ίση με 33 mm/h. Η σημειακή περίοδος επαναφοράς εκτιμήθηκε ίση με 50 yr. Τα μεγαλύτερα προβλήματα λόγω πλημμύρας παρατηρήθηκαν στην πεδινή περιοχή του Μαραθώνα από την υπερχείλιση του ρέματος Βρανά, το οποίο έχει ελάχιστη διοχετευτικότητα στα τελευταία δύο χιλιόμετρα προς την έξοδο του στην θάλασσα και σε μερικές θέσεις εκφυλλίζεται, χωρίς να διαθέτει συγκεκριμένη κοίτη. Στο συγκεκριμένο γεγονός ο όγκος της πλημμύρας κατέκλυσε μια μεγάλη πεδινή έκταση στη πεδιάδα του Μαραθώνα προκαλώντας σημαντικές υλικές ζημιές σε ιδιοκτησίες και σε αγροτικές καλλιέργειες. Σημαντική άμεση πλημμυρική ζημιά σε ιδιοκτησίες παρατηρήθηκε επίσης στην νοτιοανατολική Αττική, κυρίως εξαιτίας του ανεπαρκέστατου δικτύου αποχέτευσης όμβριων υδάτων της περιοχής.

### 8.1.2 Πηγή προέλευσης δεδομένων άμεσης ζημιάς

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά η τυπική διαδικασία χορήγησης αποζημίωσης στους πληγέντες για την αποκατάσταση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Η περιγραφή της τυπικής διαδικασίας κρίθηκε αναγκαία για την αποσαφήνιση βασικών σημείων στη διαδικασία αποτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 8.4.

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις καταγεγραμμένων πλημμυρικών γεγονότων μέχρι σήμερα στην Ελλάδα, οι άμεσες ζημιές που καταγράφηκαν και αποζημιώθηκαν αφορούσαν ζημιές στο περιβάλλον και όχι στον κινητό εξοπλισμό του κτηρίου. Επίσης, στην πλειοψηφία των πλημμυρόπληκτων κτηρίων προκλήθηκαν μη δομικές ζημιές στο περίβλημα κτηρίου, οι οποίες δεν επηρεάζουν τη γενική ευστάθεια του κτηρίου και κατά συνέπεια είναι ζημιές που κρίνονται επισκευάσιμες και είναι δυνατόν να αποκατασταθούν. Οι ζημιές αυτές αφορούν φθορά σε δάπεδα, κουφώματα, πόρτες εξωτερικές και εσωτερικές, επιχρίσματα, ελαιοχρωματισμούς, σε Η/Μ εξοπλισμό, και σε υδραυλικές και αποχετευτικές εγκαταστάσεις.

Η υπηρεσία αποκατάστασης σεισμοπλήκτων (ΥΑΣ) που υπάγεται στο πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ, είναι η αρμόδια δημόσια υπηρεσία για την αποκατάσταση άμεσης ζημιάς σε κτήρια που έχουν πληγεί από φυσική καταστροφή. Η τυπική διαδικασία που ακολουθείται στην περίπτωση πλημμύρας για την κοστολόγηση των εργασιών αποκατάστασης της άμεσης ζημιάς περιγράφεται με χρονολογική σειρά στα παρακάτω βήματα:

(α) Αμέσως μετά το πέρας του πλημμυρικού γεγονότος προσδιορίζονται τα χωρικά όρια της πληγείσας περιοχής βάσει ταχείας καταμέτρησης των πλημμυρόπληκτων κτηρίων. Σε περίπτωση όπου η στάθμη πλημμύρας δεν έχει υποχωρήσει εντελώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή διαθέσιμες αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες της πληγείσας περιοχής.

(β) Το επόμενο βήμα είναι η έκδοση κοινής υπουργικής απόφασης (ΚΥΑ) για την οριοθέτηση της πληγείσας περιοχής, που βασίζεται στα διοικητικά όρια των πληγέντων Δήμων. Η ΚΥΑ καθορίζει τις προϋποθέσεις παροχής στεγαστικής συνδρομής (Σ.Σ.) για την ανακατασκευή ή/και επισκευή ενός πληγέντος κτίσματος, ορίζει τους δικαιούχους της Σ.Σ. και τον τρόπο χορήγησης και εξόφλησης αυτής [ΚΥΑ 2002, 2006]. Ως στεγαστική συνδρομή (Σ.Σ.) ορίζεται το άτοκο δάνειο και η δωρεάν κρατική αρωγή που δικαιούνται οι πληγέντες. Η δαπάνη για τις εργασίες αποκατάστασης στα πληγέντα στοιχεία υπολογίζεται με δύο διακριτούς τρόπους: (1) με αναλυτική προμέτρηση των υλικών κατασκευής και τη σύνταξη προϋπολογισμού του κόστους των εργασιών αποκατάστασης βάσει αναλυτικού τιμολογίου που παρέχεται από το πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ και (2) με βάση την κατηγοριοποίηση της άμεσης ζημιάς σε ζημιά επισκευής ή ζημιά ανακατασκευής, την χρήση κτηρίου και το εμβαδό της κατακλυσμένης επιφάνειας χωρίς να έχει προηγηθεί λεπτομερής επιμέτρηση πραγματικής ζημιάς στο πεδίο. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στην επιμέτρηση της πραγματικής ζημιάς δεν περιλαμβάνεται η ζημιά που προκλήθηκε στον κινητό εξοπλισμό ενός πληγέντος κτίσματος.

(γ) Κατόπιν υποβολής αίτησης από τους ενδιαφερόμενους στην υπηρεσία, διενεργείται αυτοψία στο πληγέν κτίσμα από μηχανικούς της αρμόδιας υπηρεσίας και εκδίδεται πόρισμα χαρακτηρισμού του. Στη συνέχεια, ανάλογα με τους όρους της Σ.Σ., το εμβαδόν του πληγέντος κτίσματος και τη χρήση αυτού εκτιμάται από την υπηρεσία το ύψος της Σ.Σ.

(δ) Η αρμόδια υπηρεσία χορηγεί στους δικαιούχους την άδεια επισκευής ή την βεβαίωση καθορισμού στεγαστικής συνδρομής για ανακατασκευή ή αυτοστέγαση ή αποπεράτωση, με την οποία προσδιορίζεται το ύψος της απαιτούμενης δαπάνης επισκευής ή το ποσό που δικαιούται ο ενδιαφερόμενος για ανακατασκευή ή αυτοστέγαση ή αποπεράτωση. Στην άδεια επισκευής αναφέρεται το ποσόν της δωρεάν κρατικής αρωγής καθώς και του άτοκου δανείου.

Η παραπάνω τυπική διαδικασία παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ως προς τον τρόπο κοστολόγησης της δαπάνης αποκατάστασης της άμεσης ζημιάς ανάλογα με την ένταση της υλικής ζημιάς και την ένταση του φυσικού φαινομένου. Έτσι για την περίπτωση του πλημμυρικού γεγονότος της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, το ύψος της Σ.Σ. στις άδειες επισκευής των πλημμυρόπληκτων κτηρίων που εκδόθηκαν, υπολογίστηκε με βάση την αναλυτική επιμέτρηση των υλικών κατασκευής και των αντίστοιχων εργασιών για την αποκατάσταση της άμεσης ζημιάς. Η επιμέτρηση αυτή είναι αποτέλεσμα των επιτόπιων αυτοψιών που διενεργήθηκαν από κλιμάκια μηχανικών της αρμόδιας υπηρεσίας ΥΑΣ αμέσως μετά την πλημμύρα. Ο υπολογισμός της δαπάνης της αποκατάστασης της καταγεγραμμένης ζημιάς βασίστηκε στον προϋπολογισμό που συντάχθηκε με τη χρήση αναλυτικού τιμολογίου επισκευών, το οποίο εκδόθηκε ειδικά για το συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός από το πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ [ΚΥΑ 2002]. Το τυπικό δελτίο ταχείας αυτοψίας των πληγέντων στοιχείων ενός πλημμυρόπληκτου κτηρίου παρατίθεται στο υποκεφάλαιο Π8.1 (Τόμος II).

Στην περίπτωση της πλημμύρας της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 το ύψος της Σ.Σ. υπολογίστηκε με βάση το εμβαδόν και την χρήση του πληγέντος κτηρίου. Η ΚΥΑ [ΚΥΑ 2006] που εκδόθηκε για την οριοθέτηση της πληγείσας περιοχής για το συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός προσδιόρισε το ύψος της Σ.Σ. ανά τετραγωνικό μέτρο κατακλυσμένης επιφάνειας ανάλογα με την χρήση του κτηρίου και τον τύπο της άμεσης ζημιάς (εάν δηλαδή απαιτείται επισκευή ή ανακατασκευή της πληγείσας ιδιοκτησίας). Έτσι, η κοστολόγηση των εργασιών αποκατάστασης της άμεσης ζημιάς στα πληγέντα κτήρια υλοποιήθηκε χωρίς να έχει προηγηθεί λεπτομερής επιμέτρηση της πραγματικής ζημιάς στο πεδίο. Η αρμόδια υπηρεσία που διενέργησε τις επιτόπιες αυτοψίες στα πληγέντα κτήρια είναι η διεύθυνση τεχνικών έργων στη Νομαρχία Ανατολικής Αττικής .

## 8.2 Δομημένο περιβάλλον

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται αρχικά η σύνθεση του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση και στη συνέχεια οι τύποι και οι χρήσεις κτηρίου που επιλέχθηκαν για την ανάπτυξη των χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου. Ωστόσο επειδή η ανάπτυξη των χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου εξαρτάται από την αντικειμενική αξία ακινήτου, οι χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου περιγράφονται λεπτομερώς στο υποκεφάλαιο 8.4, το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αποτίμησης των δεδομένων ζημιάς.

Στο σύνολο των πλημμυρόπληκτων κτηρίων που καταμετρήθηκαν εξαιτίας των πλημμυρικών γεγονότων κατάκλυσης, η άμεση ζημιά αφορά αποκλειστικά εργασίες επισκευής και όχι ανακατασκευής κτηρίου. Επομένως, ως πληγέν στοιχείο ενός πλημμυρόπληκτου κτηρίου προσδιορίστηκε το περίβλημα κτηρίου, χωρίς να ληφθεί υπόψη ο κινητός εξοπλισμός του. Επίσης, σημειώνεται ότι η καταμέτρηση πλημμυρόπληκτων κτηρίων στους ακόλουθους συγκεντρωτικούς πίνακες περιλαμβάνει μόνο τα κτήρια στα οποία διενεργήθηκε επιτόπια αυτοψία κατόπιν αιτήσεως του ιδιοκτήτη. Συνεπώς, ο πραγματικός αριθμός πλημμυρόπληκτων κτηρίων πιθανόν να είναι μεγαλύτερος από τον επίσημα καταγεγραμμένο.

Ο συγκεντρωτικός Πίνακας 8-1 δίνει την εικόνα καταστροφής στους πληγέντες Δήμους της Νομαρχίας Αθηνών και Πειραιά λόγω της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 σε αριθμούς κτηρίων ανά χρήση.

Πίνακας 8-1. Συγκεντρωτικός πίνακας πλημμυρόπληκτων κτηρίων για την πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002

Δήμος	ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ 2002					
	Κατοικίες	Επαγγελμ. χώροι	Αποθήκες	Εκκλησίες	Χωρίς δηλωθείσα χρήση	Άλλες χρήσεις
Αθήνα	258	255	108	1	43	14
Αχαρνάι	3	4	2			
Καλλιθέα	2	4	2			
<b>Μοσχάτο</b>	<b>669</b>	<b>257</b>	<b>238</b>	<b>1</b>		<b>2</b>
Νέο Φάληρο	236	127	161		33	15
Πειραιάς	2	1	1			
Ρέντη	184	429	55			1
Ταύρος	11	16	8	1		
Σύνολο	1365	1093	575	3	76	32

Από τον Πίνακα 8-1 διαπιστώνεται ότι ο Δήμος Μοσχάτου υπέφερε την πιο εκτεταμένη ζημιά και ειδικά σε κατοικίες με μεγάλη διαφορά από τους άλλους Δήμους. Επιπλέον, στο Δήμο Μοσχάτου καταγράφηκε η πλειοψηφία των μεγαλύτερων τιμών βάθους νερού λόγω κατάκλυσης. Το πλεονέκτημα του περιορισμού του συνόλου δεδομένων εντός των ορίων ενός μόνο Δήμου είναι ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή ομοιογένεια του δείγματος ως προς τον τύπο, την χρήση και την αντικειμενική αξία ακινήτου ενός πληγέντος κτηρίου. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ζημιάς το σύνολο δεδομένων ζημιάς που καλύπτει μόνο το Δήμο Μοσχάτου για το συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός.

Λόγω χρονικού περιορισμού από την ΥΑΣ στην πρόσβαση στο αρχείο καταγραφής της άμεσης ζημιάς, συλλέχθηκε τελικά στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής περίπου το μισό σε μέγεθος πλήθος στοιχείων από το αρχείο αδειών επισκευής που υπάγονται στο Δήμο Μοσχάτου. Το αρχείο αδειών επισκευής αφορά μόνον στις άδειες επισκευής, που ενέκρινε και εξέδωσε η ΥΑΣ σύμφωνα με την περιγραφή που δόθηκε στο εδάφιο 8.1.2. Συνεπώς το αρχείο αυτό περιέχει ακόμη πιο μικρό πλήθος κτηρίων σε σχέση με τον καταγεγραμμένο αριθμό κτηρίων του Πίνακα 8-1. Ο τελικός αριθμός των αδειών επισκευής που συλλέχθηκαν αντιστοιχεί σε 129 κτήρια, από τα οποία 87 είναι κατοικίες, 17 είναι επαγγελματικοί χώροι και 25 είναι αποθήκες. Η αρχική κατηγοριοποίηση ως προς την χρήση διατηρήθηκε και κατά την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων ζημιάς, δηλαδή τα κτήρια ως προς την χρήση διακρίνονται σε:

- Κατοικίες
- Επαγγελματικούς χώρους
- Αποθήκες

Επιπλέον, έγινε κατηγοριοποίηση των πλημμυρόπληκτων κτηρίων ως προς τον τύπο κτηρίου σε:

- Ισόγειο
- Υπόγειο

- Ισόγειο με υπόγειο

Η πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 στο Δήμο Μοσχάτου έπληξε μόνο ισόγεια και υπόγεια κτηρίων. Σημειώνεται ότι ειδικά στην Ελλάδα, η άμεση ζημιά καταγράφεται στο ισόγειο ή στο υπόγειο ενός κτηρίου στη συντριπτική πλειοψηφία ιστορικών πλημμυρικών γεγονότων κατάκλυσης. Συνεπώς, η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση ως προς τον τύπο κτηρίου δικαιολογείται και κρίνεται αναγκαία για να διακρίνει τη διαφορά σε μέγεθος πραγματικής άμεσης ζημιάς που παρατηρείται ανάμεσα στο υπόγειο και ισόγειο ενός κτηρίου.

Ο συγκριτικός Πίνακας 8-2 δίνει την εικόνα καταστροφής σε αριθμούς κτηρίων στα διοικητικά όρια των Δήμων Καλυβίων, Μαραθώνα, Μαρχόπουλου Μεσογείων, Αρτέμιδος και Κορωπίου της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής από την πλημμύρα της 23 - 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005.

Πίνακας 8-2. Συγκριτικός πίνακας πλημμυρόπληκτων κτηρίων για την πλημμύρα της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005

Δήμος / Κοινότητα	ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2005		
	Κατοικίες	Επαγγελματικοί χώροι	Αποθήκες
Αρτέμιδα	4		
Κορωπί	2		
Μαραθώνας	6	4	1
Μαρχόπουλο	10		
Κουβαράς			2
Καλύβια	15	17	

Από τον Πίνακα 8-2 παρατηρείται ότι το αρχείο καταγραφής ζημιάς για το συγκεκριμένο γεγονός είναι εξαιρετικά περιορισμένο σε πλήθος πλημμυρόπληκτων κτηρίων. Υπενθυμίζεται ότι καταμετρήθηκαν μόνον τα πλημμυρόπληκτα κτήρια, στα οποία έγινε επιτόπια αυτοψία από αρμόδια κλιμάκια μηχανικών κατόπιν αιτήσεως του ιδιοκτήτη.

Τα δεδομένα ζημιάς που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής περιλαμβάνουν στοιχεία περιγραφής κτίσματος και παρατηρήσεις άμεσης πλημμυρικής ζημιάς από τις εκθέσεις αυτοψίας που διενεργήθηκαν από κλιμάκια μηχανικών της Νομαρχίας. Ο αριθμός πλημμυρόπληκτων κτηρίων με πλήρη έκθεση αυτοψίας (δηλαδή καταγεγραμμένες παρατηρήσεις βάθους νερού και εμβαδού κατακλυσμένης επιφάνειας) είναι μόλις 24 κατοικίες. Σε ό,τι αφορά τους επαγγελματικούς χώρους, καταγράφηκε μόνο η πλημμυρική ζημιά σε εμπορεύματα και κινητό εξοπλισμό και όχι στο περιβλήμα κτηρίου. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, δεν συμπεριλήφθηκαν οι επαγγελματικοί χώροι στην ανάλυση. Σε ό,τι αφορά τις αποθήκες, δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση λόγω μη πληρότητας της έκθεσης αυτοψίας.

Συνεπώς το σύνολο δεδομένων άμεσης ζημιάς λόγω της πλημμύρας της 23 - 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου περιλαμβάνει μόνο κτήρια με χρήση κατοικίας, τα οποία διακρίνονται ως προς τον τύπο κτηρίου σε: (α) ισόγειο, (β) ισόγειο με υπόγειο και (γ) υπόγειο.

### 8.3 Βάση δεδομένων άμεσης ζημιάς

Γενικά, τα δεδομένα άμεσης ζημιάς που καταγράφηκαν και συλλέχθηκαν λόγω των πλημμυρικών γεγονότων κατάκλυσης στην περιοχή της Αττικής ανήκουν στην κατηγορία της μη δομικής ζημιάς. Προκειμένου να τυ-



ποποιηθεί αρχικά η διαδικασία αποτίμησης και στη συνέχεια η στατιστική επεξεργασία των καταγεγραμμένων στοιχείων άμεσης ζημιάς δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων ζημιάς σε υπολογιστικό φύλλο του EXCEL για τη συστηματική καταχώριση των δεδομένων που συλλέχθηκαν και από τα δύο πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης με βάση την παρακάτω ταξινόμηση:

- Περιγραφικά στοιχεία πλημμυρόπληκτου κτηρίου (αριθμός αυτοψίας, περιοχή, Δήμος, διεύθυνση)
- Χρήση κτηρίου
- Τύπος κτηρίου
- Μέγεθος ιδιοκτησίας [m<sup>2</sup>]
- Υλικό κατασκευής κτηρίου (οπλισμένο σκυρόδεμα, φέρουσα τοιχοποιία)
- Έτη χρήσεως ιδιοκτησίας
- Αριθμός ορόφων κτηρίου
- Ύψος στεγαστικής συνδρομής (Σ.Σ.) σε τιμές του 2002
- Άμεσης ζημιά στο κεντρικό σύστημα θέρμανσης (σύστημα λέβητα – καυστήρα)

Η άμεση ζημιά του συστήματος λέβητα – καυστήρα λήφθηκε υπόψη ξεχωριστά στην καταγραφή της ζημιάς διότι: (α) η αποκατάσταση του συγκεκριμένου είδους ζημιάς απαιτεί υψηλή δαπάνη αντικατάστασης και όχι επισκευής (περίπου 500€ ανά τεμάχιο σε τιμές του 2002) και (β) το σύστημα λέβητα - καυστήρα βρίσκεται εγκατεστημένο σε υπόγειο ή σε ισόγειο χώρο ενός κτηρίου. Επομένως, η ζημιά σε σύστημα λέβητα - καυστήρα αποτελεί μια ειδική δαπάνη αποκατάστασης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που συναντάται επανειλημμένα σε πλημμυρόπληκτα κτήρια. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιείται ο όρος «ειδική ζημιά» για τη συγκεκριμένη δαπάνη.

Τα έτη χρήσεως ιδιοκτησίας, τα οποία προκύπτουν από το συμβόλαιο κτήσεως του ακινήτου, καταγράφηκαν γιατί δίνουν μια ενδεικτική εκτίμηση της παλαιότητας του ακινήτου, η οποία λαμβάνεται υπόψη στην αποτίμηση της αξίας ενός ακινήτου (βλέπε εδάφιο 8.4.1). Επίσης, ο αριθμός ορόφων ενός κτηρίου καταγράφηκε, αν και δεν φαίνεται να επηρεάζει το μέγεθος της άμεσης ζημιάς στη συγκεκριμένη κατηγορία πλημμύρας.

Η καταχώριση της παραπάνω πληροφορίας για τα πλημμυρόπληκτα κτήρια υλοποιήθηκε ανά κατηγορία χρήσεως κτηρίου. Δείγμα της βάσης δεδομένων που διαμορφώθηκε στο EXCEL, παρατίθεται στο υποκεφάλαιο Π8.3 (Τόμος II).

Τέλος, για να γίνει εφικτή η καταχώριση των στοιχείων ζημιάς, έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Θεωρήθηκε ότι το εμβαδόν της κατακλυσμένης επιφάνειας ταυτίζεται με το εμβαδόν του ισόγειου ενός κτηρίου, εκτός εάν αυτό σημειώνεται διαφορετικά στις παρατηρήσεις της έκθεσης της επιτόπιας αυτοψίας. Η παραδοχή θεωρείται λογική, αφού το νερό εξαπλώνεται και παραμένει στάσιμο σε οριζόντια στάθμη.
- Θεωρήθηκε ότι το έτος κτήσης ενός ακινήτου ταυτίζεται με το έτος κατασκευής του για την εκτίμηση της ελάχιστης δυνατής παλαιότητας ενός κτηρίου.
- Θεωρήθηκε ότι οι ημιυπόγειες κατοικίες ανήκουν στην κατηγορία των ισόγειων κατοικιών υποθέτοντας ότι η είσοδος τους είναι ισόγεια.

- Θεωρήθηκε ότι οι κοινόχρηστοι χώροι και τα λεβητοστάσια δεν ανήκουν στο σύνολο των πλημμυρόπληκτων κτηρίων και έτσι δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση.

## 8.4 Αποτίμηση δεδομένων άμεσης ζημιάς

Για την περίπτωση της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, το ύψος Σ.Σ. υπολογίστηκε με αναλυτική επιμέτρηση της πραγματικής ζημιάς σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο στο πεδίο και σύνταξη αντίστοιχου προϋπολογισμού βάσει τιμολογίου υλικών κατασκευής και εργασιών αποκατάστασης. Επομένως, για αυτό το πλημμυρικό γεγονός η άμεση ζημιά εκτιμήθηκε με τη μορφή απόλυτης τιμής σε μικροκλίμακα. Για την περίπτωση της πλημμύρας της 23 - 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 το ύψος Σ.Σ. σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο υπολογίστηκε ανά μονάδα επιφάνειας της κατακλυσμένης περιοχής και κατά συνέπεια για αυτό το πλημμυρικό γεγονός η άμεση ζημιά εκτιμήθηκε με τη μορφή απόλυτης τιμής σε μακροκλίμακα.

Τα δεδομένα άμεσης ζημιάς ανά κτήριο με τη μορφή απόλυτης τιμής δεν χρησιμοποιήθηκαν ούτε στην στατιστική επεξεργασία ούτε στην ανάλυση για την ανάπτυξη σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς στην παρούσα διατριβή. Κρίθηκε προτιμότερο οι απόλυτες τιμές των δεδομένων άμεσης ζημιάς να μετατραπούν σε τιμές ποσοστού ζημιάς για την ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλίμακα. Το μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» αποσυνδέει τις απόλυτες τιμές ζημιάς από την απαιτούμενη επικαιροποίηση της αξίας και κατά συνέπεια το μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» σε σύγκριση με την απόλυτη τιμή θεωρείται σχετικά αμετάβλητο στον χρόνο [Appelbaum 1985].

Στα ακόλουθα εδάφια παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού για την εκτίμηση της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου και η διαδικασία υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς ανά κτήριο.

### 8.4.1 Αξία ακινήτου

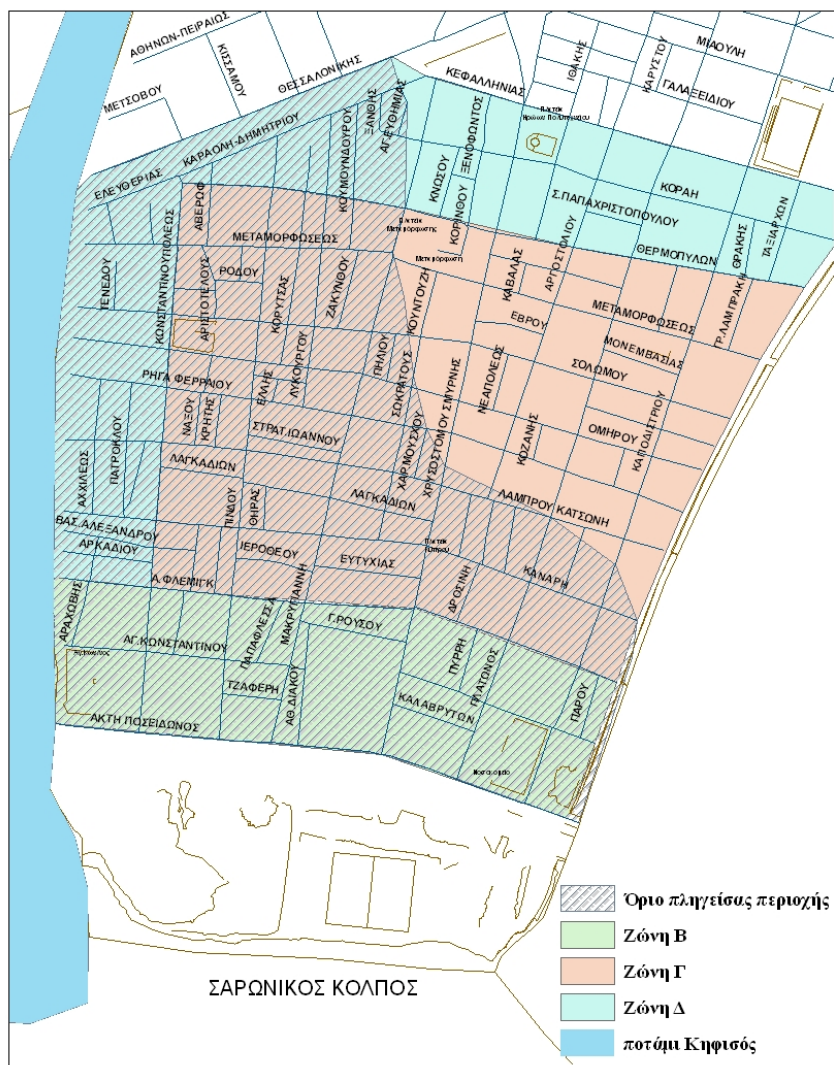
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 7.2.1, η αντικειμενική αξία ακινήτου θεωρήθηκε το πιο κατάλληλο οικονομικό μέγεθος για να προσδιορίσει την αρχική αξία μίας ιδιοκτησίας πριν συμβεί η ζημιά λόγω πλημμύρας, αφού σε περίπτωση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς χάνεται ένα ποσοστό της αξίας τόσο του κτίσματος όσο και του οικοπέδου που περιέχει την ιδιοκτησία.

Ο υπολογισμός της αντικειμενικής αξίας ακινήτου υλοποιήθηκε με βάση τις τυποποιημένες φόρμες του πρώην Υπουργείου Οικονομικών με τίτλο «Υπολογισμός Αξίας Ακινήτου σε Οικόπεδο εντός Σχεδίου ή σε Οικισμό» οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την χρήση κτηρίου, όπως είναι η κατοικία, ο επαγγελματικός χώρος και η αποθήκη. Δείγμα αυτών παρατίθεται στο υποκεφάλαιο Π8.2 (Γόμος ΙΙ). Έτσι, για τον υπολογισμό της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω στοιχεία:

- Χρήση και τύπος κτηρίου
- Μέγεθος [m<sup>2</sup>] και αριθμός ορόφων κτηρίου
- Παλαιότητα
- Υλικά κατασκευής
- Τιμή ζώνης οικοπέδου

- Συντελεστής εμπορικότητας οικοπέδου ανάλογα με τη θέση πρόσοψης του κτίσματος που περιέχει

Η τιμή ζώνης οικοπέδου αναφέρεται στην αξία γης όπως αυτή προσδιορίζεται σήμερα από το υφιστάμενο χωροταξικό και πολεοδομικό σχέδιο πόλης. Για παράδειγμα, η Εικόνα 8-1 απεικονίζει την χωρική ταξινόμηση των οικοπέδων σε ζώνες διαφορετικής αξίας γης (Ζώνη Β, Γ και Δ) εντός των ορίων της πληγείσας περιοχής στο Δήμο Μοσχάτου λόγω της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002.



Εικόνα 8-1. Ζώνες αξίας οικοπέδου εντός των ορίων της πληγείσας περιοχής λόγω της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η διαδικασία αυτή οδηγεί στον προσδιορισμό της σημερινής (2009) μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου. Συνολικά, οι τιμές των παραπάνω στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βάση δεδομένων άμεσης ζημιάς για τον υπολογισμό της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου σε όλους τους πληγέντες Δήμους και από τα δύο πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης φαίνονται στον Πίνακα 8-3.

Πίνακας 8-3. Τιμές παραμέτρων για τον προσδιορισμό της αντικειμενικής αξίας ακινήτου στους πληγέντες Δήμους της Αττικής

Δήμος	Χρήση κτηρίου	Τύπος κτηρίου	Μέγεθος (m <sup>2</sup> )	Τιμή Ζώνης Οικοπέδου 2009 (€/m <sup>2</sup> )	Υλικό κατασκευής	Συντελεστής εμποριότητας	Παλαιότητα κτηρίου (yr)
Μοσχάτο	Κατοικία	Ισόγειο	75	1100, 1200, 1300	Ο/Σ, Φ/Γ	1	21- 25
		Ισόγειο με υπόγειο	120				
		Υπόγειο	50				
	Επαγγελματικός χώρος	Ισόγειο	80		1, 1.3		
	Αποθήκη	Ισόγειο	50		1, 1.8		
		Ισόγειο με υπόγειο	50				
Αρτέμιδα	Κατοικία	Ισόγειο	75	1050	Ο/Σ	1	16 - 20
Καλύβια		Ισόγειο	75	1150, 1350, 2100			
		Ισόγειο με υπόγειο	120				
		Υπόγειο	75				
Κρωπία		Ισόγειο	75	1000, 1250			
Μαραθώνας		Ισόγειο	75	750, 850			
Μαρκόπουλο	Κατοικία	Ισόγειο	75	1000, 1050, 1850	Ο/Σ	1	16 - 20

## 8.4.2 Χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιλέχθηκε η μεσοκλίμακα ως χωρική κλίμακα ανάλυσης των δεδομένων άμεσης ζημιάς για την περίπτωση των πληγείσων περιοχών στην Αττική. Επομένως, ο υπολογισμός της σημερινής αντικειμενικής αξίας ακινήτου υλοποιήθηκε για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου ανά χρήση και όχι για κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο. Οι χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου διαμορφώνονται ανά χρήση κτηρίου και ανά πλημμυρόπληκτο Δήμο με βάση τις τιμές των στοιχείων που δίνονται στον Πίνακα 8-3. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές σημερινής (2009) αντικειμενικής αξίας ακινήτου για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου. Οι αναλυτικοί πίνακες υπολογισμού της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου στο Δήμο Μοσχάτου και στους λοιπούς Δήμους της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής παρατίθενται στο υποκεφάλαιο Π8.4 (Τόμος II).

## 8.4.3 Ποσοστό ζημιάς

Για την περίπτωση μελέτης στην Αττική, το μέγεθος του ποσοστού ζημιάς υπολογίζεται από την εξίσωση (7.1) προσαρμοσμένη στην περίπτωση μελέτης ως εξής:

$$\text{Ποσοστό ζημιάς} = \frac{\text{Επικαιροποιημένο ύψος στεγαστικής συνδρομής}}{\text{Αντικειμενική αξία ακινήτου (2009)}} \quad (8.1)$$

Επομένως, το ποσοστό ζημιάς προκύπτει από την αποτίμηση ζημιάς με νομισματικούς όρους. Για την επικαιροποίηση του ύψους της στεγαστικής συνδρομής (Σ.Σ.) που υπολογίστηκε από τις αρμόδιες δημόσιες υπηρεσίες σε κάθε πλημμυρικό γεγονός, εφαρμόστηκε η ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Τιμή ύψους Σ.Σ. (2009)} = (\text{Αρχική τιμή ύψους Σ.Σ.}) (1+i)^n \quad (8.2)$$

όπου  $i$  = συντελεστής αναγωγής σε παρούσα αξία

$n$  = ο αριθμός ετών που μεσολάβησαν από το συμβάν μιας πλημμύρας έως 2009

Κατά παραδοχή, ως συντελεστής αναγωγής θεωρείται μια μέση τιμή πραγματικού επιτοκίου από το 2002 έως το 2009 (κατά το οποίο υλοποιήθηκε η παρούσα ανάλυση), η οποία σύμφωνα με τους γενικούς δείκτες της μακροοικονομίας εκτιμήθηκε ότι προσεγγίζει την τιμή 3.1 % [Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών 2005]. Οι τιμές της μεταβλητής «ποσοστό ζημιάς» προκύπτουν από την εξίσωση (8.1) ότι κυμαίνονται από 0 έως 1 (δηλαδή 0 - 100%).

Έτσι, με βάση τις μέσες τιμές της σημερινής αντικειμενικής αξίας ακινήτου που αντιστοιχούν σε κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου και τις εξισώσεις (8.1) και (8.2), οι απόλυτες τιμές της Σ.Σ. μετατράπηκαν σε επικαιροποιημένες τιμές ποσοστού ζημιάς που αντιστοιχούν σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο στην περιοχή της Αττικής. Η εκτιμώμενη τιμή ποσοστού ζημιάς που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο της βάσης δεδομένων ζημιάς στο EXCEL παρατίθεται αναλυτικά σε πίνακες ανά Δήμο στο υποκεφάλαιο Π8.6 (Τόμος II).

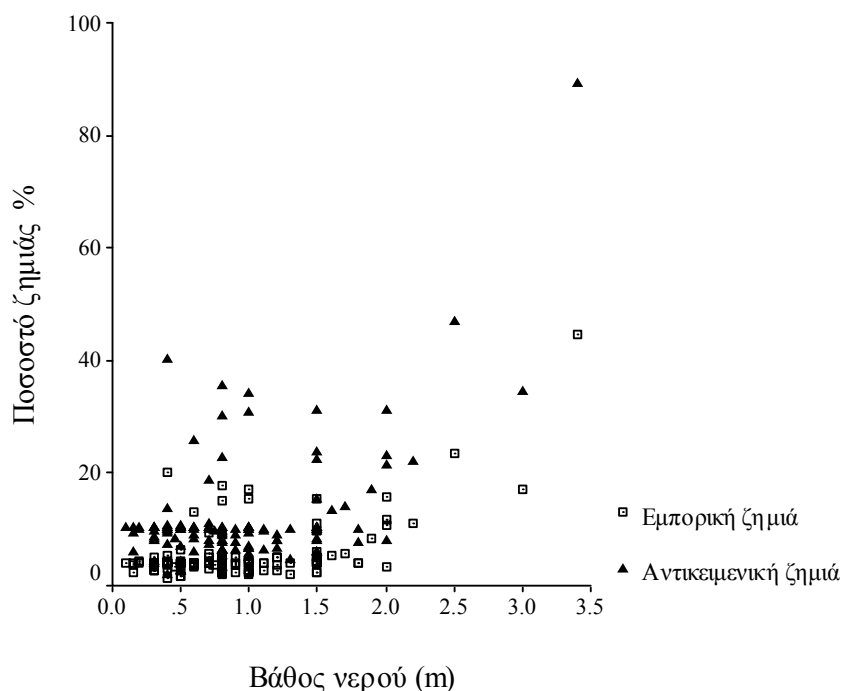
Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ενδιάμεσες διερευνήσεις του υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς με βάση τις σημερινές τιμές: (α) της εμπορικής αξίας ακινήτου και (β) της αντικειμενικής αξίας κτίσματος. Η πρόσθετη αυτή διερεύνηση υλοποιήθηκε για λόγους πληρότητας της διαδικασίας υπολογισμού των τιμών του ποσοστού ζημιάς.

Στην περίπτωση υπολογισμού ποσοστού ζημιάς με βάση την εμπορική αξία ακινήτου επιχειρείται να ληφθούν υπόψη και οι κανόνες προσφοράς και ζήτησης της μεσιτικής αγοράς, σήμερα, στις ήδη υπολογισμένες μέσες αντικειμενικές αξίες ακινήτου για τους χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου. Πραγματοποιήθηκε, επομένως, δειγματοληπτική έρευνα στο διαδίκτυο σε δημοσιευμένα στοιχεία γνωστών εταιρειών εκτίμησης ακινήτων και διαπιστώθηκε ότι οι τιμές πώλησης (δηλαδή η εμπορική αξία) των χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου για το έτος 2009 είναι πολλαπλάσιες της αντίστοιχης αντικειμενικής τους αξίας. Έτσι, προσδιορίστηκε ένας πολλαπλασιαστικός συντελεστής ανά χρήση κτηρίου, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη μέση δειγματική τιμή των αποτελεσμάτων της έρευνας και εκφράζει τη σημερινή πολλαπλάσια εμπορική αξία ακινήτου επί της αντικειμενικής αξίας.

Πίνακας 8-4. Τιμές πολλαπλασιαστικού συντελεστή αναγωγής της αντικειμενικής σε εμπορική αξία ακινήτου

Χρήση κτηρίου	Πολλαπλασιαστικός Συντελεστής
Κατοικία	2.5
Επαγγελματικός χώρος	1.6
Αποθήκη	2.0

Η σύγκριση μεταξύ των τιμών ποσοστού ζημιάς που προέκυψαν με βάση τη μέση εμπορική αξία ακινήτου και αυτών που προέκυψαν με βάση τη μέση αντικειμενική αξία ακινήτου απεικονίζεται στην Εικόνα 8-2. Οι τιμές ποσοστού ζημιάς βάσει της αντικειμενικής αξίας ακινήτου προκύπτουν πολλαπλάσιες από εκείνες βάσει της εμπορικής αξίας ακινήτου αναλογικά με τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή.

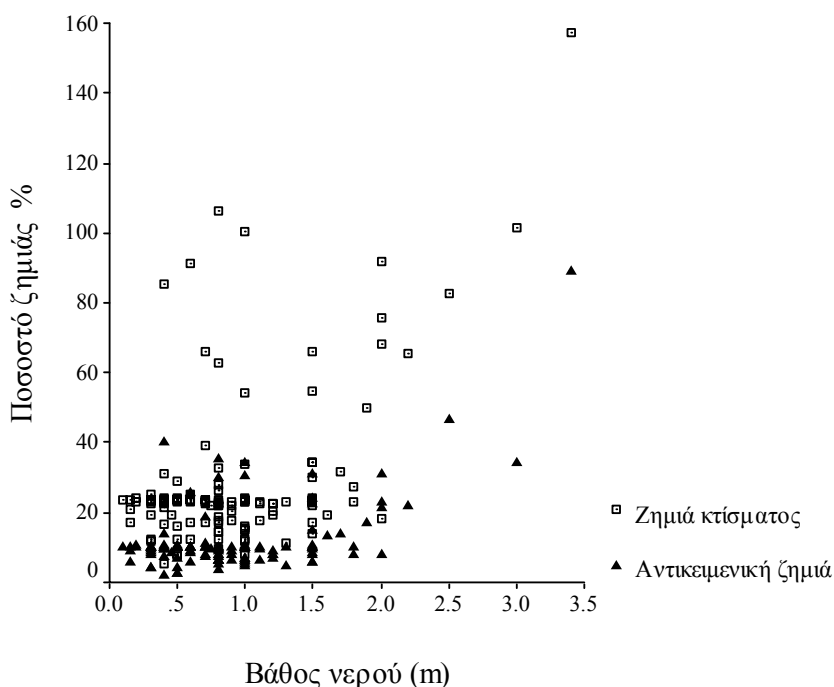


Εικόνα 8-2. Διάγραμμα διασποράς για τιμές ποσοστού ζημιάς με βάση την εμπορική και την αντικειμενική αξία

Αποτρεπτικός παράγοντας για τη χρήση των τιμών ποσοστού ζημιάς βάσει εμπορικής αξίας ακινήτου αποτελεί ο εξαιρετικά αβέβαιος και εφήμερος χαρακτήρας του πολλαπλασιαστικού συντελεστή στον Πίνακα 8-4,

αφού οι κανόνες προσφοράς και ζήτησης της μεσιτικής αγοράς είναι εξαιρετικά ευμετάβλητοι με τον χρόνο και τη γεωγραφική θέση του ακινήτου. Στην περίπτωση υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία κτίσματος, ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με ειδικές φόρμες του Υπουργείου Οικονομικών που είναι διαθέσιμες για το σκοπό αυτό. Ο υπολογισμός αφορά τη μέση αντικειμενική αξία κτίσματος για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου ανά χρήση. Αναλυτικός πίνακας υπολογισμού της μέσης αντικειμενικής αξίας κτίσματος ανά χρήση, μόνο για τους χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου στο Δήμο Μοσχάτου παρατίθεται στο υποκεφάλαιο Π8.5 (Τόμος II).

Εφόσον η αντικειμενική αξία κτίσματος δεν περιλαμβάνει την αξία γης του οικοπέδου έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές ποσοστού ζημιάς σε σύγκριση με αυτές που υπολογίστηκαν με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου. Η Εικόνα 8-3 απεικονίζει τη σύγκριση αυτή και παρατηρείται ότι η διασπορά των τιμών ποσοστού ζημιάς βάσει αντικειμενικής αξίας κτίσματος είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή των τιμών που προέκυψαν με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου, γεγονός που αποτελεί ένα σημαντικό πρόσθετο λόγο για να μην χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στην ανάλυση οι τιμές ποσοστού ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία κτίσματος.



Εικόνα 8-3. Διάγραμμα διασποράς για τιμές ποσοστού ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου και την αντικειμενική αξία κτίσματος

## 8.5 Στατιστική περιγραφή δεδομένων άμεσης ζημιάς

Τα στατιστικά περιγραφικά στοιχεία της βάσης δεδομένων ζημιάς υπολογίστηκαν με το υπολογιστικό πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης SPSS Release 8.0. Για το σύνολο των 129 πλημμυρόπληκτων κτηρίων στο Δήμο Μοσχάτου λόγω της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, τα αποτελέσματα της στατιστικής περιγραφής δίνονται στον Πίνακα 8-5.

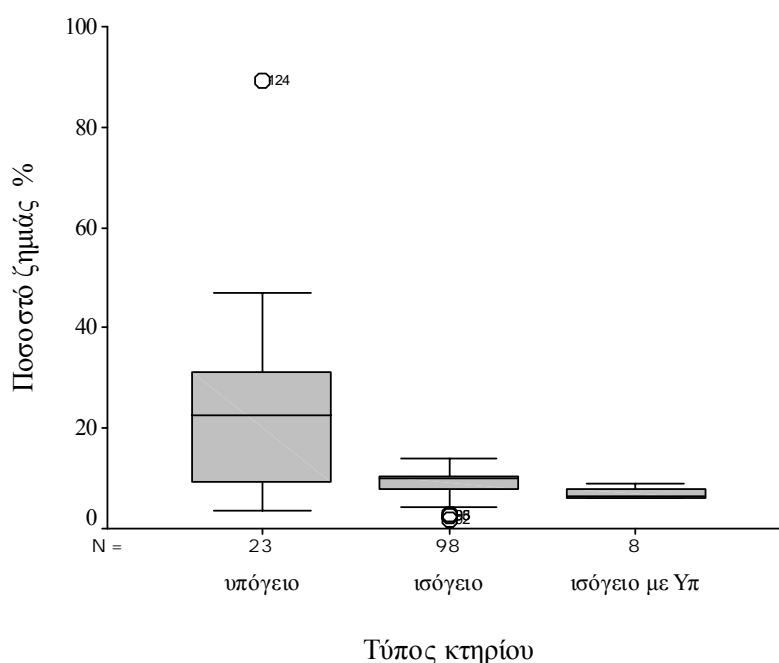
Πίνακας 8-5. Στατιστικά χαρακτηριστικά του συνόλου δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου

	Μέση τιμή	Ποσοστιαίο σημείο 25%	Διάμεσος	Ποσοστιαίο σημείο 75%
Απόλυτη ζημιά [€]	4433	3437	5250	5415
Ποσοστό ζημιάς [%]	12.1	7.8	10.1	10.4

Παρατηρείται ότι η δειγματική μέση τιμή της απόλυτης τιμής και του ποσοστού ζημιάς είναι μικρή σε σχέση με την αξία ακινήτου, γεγονός που συμφωνεί με την παρατήρηση πεδίου ότι η αποκατάσταση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς απαιτεί μόνο εργασίες επισκευής. Ακολουθεί η χωριστή ανάλυση των δεδομένων ζημιάς αρχικά για το Δήμο Μοσχάτου ως προς τον τύπο και στη συνέχεια ως προς την χρήση κτηρίου. Σε κάθε περίπτωση δίνεται ο πίνακας περιγραφικών στατιστικών χαρακτηριστικών και η αντίστοιχη συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς.

Πίνακας 8-6. Στατιστικά χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε τύπο κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου

Τύπος κτηρίου	Αριθμός κτηρίων	Μέση τιμή ποσοστού ζημιάς [%]	Τυπική απόκλιση ποσοστού ζημιάς [%]
Ισόγειο	100	9.77	4.90
Ισόγειο με υπόγειο	8	6.95	1.23
Υπόγειο	21	25.39	9.45



Εικόνα 8-4. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε τύπο κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου

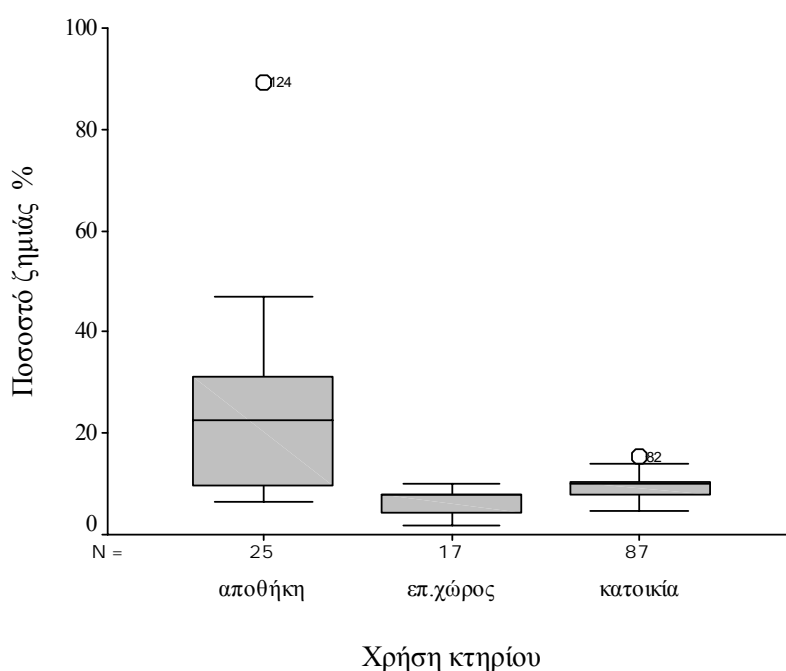
Στην Εικόνα 8-4 από το διατεταρτημοριακό πλάτος της συνοπτικής παράστασης και την τιμή της τυπικής απόκλισης διαπιστώνεται ότι ο τύπος «υπόγειο» παρουσιάζει μεγάλη διασπορά τιμών ποσοστού ζημιάς σε σύγκριση με τους τύπους «ισόγειο» και «ισόγειο με υπόγειο» αντίστοιχα. Ομοίως, στην Εικόνα 8-5, από το



διατεταρτημοριακό πλάτος της συνοπτικής παράστασης και την τιμή της τυπικής απόκλισης διαπιστώνεται, ότι η χρήση «αποθήκη» παρουσιάζει μεγάλη διασπορά τιμών ποσοστού ζημιάς σε σύγκριση με τις χρήσεις «κατοικία» και «επαγγελματικό χώρο» αντίστοιχα.

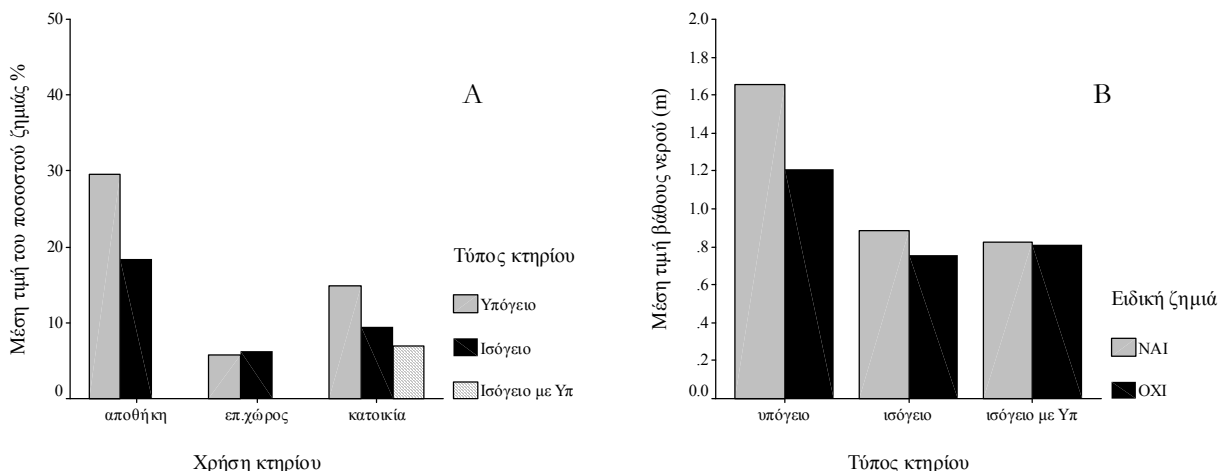
Πίνακας 8-7. Στατιστικά χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου

Χρήση κτηρίου	Αριθμός κτηρίων	Μέση τιμή ποσοστού ζημιάς [%]	Τυπική απόκλιση ποσοστού ζημιάς [%]
Κατοικία	87	9.58	2.93
Επαγγελματικός Χώρος	17	6.13	2.54
Αποθήκη	25	25.09	17.31



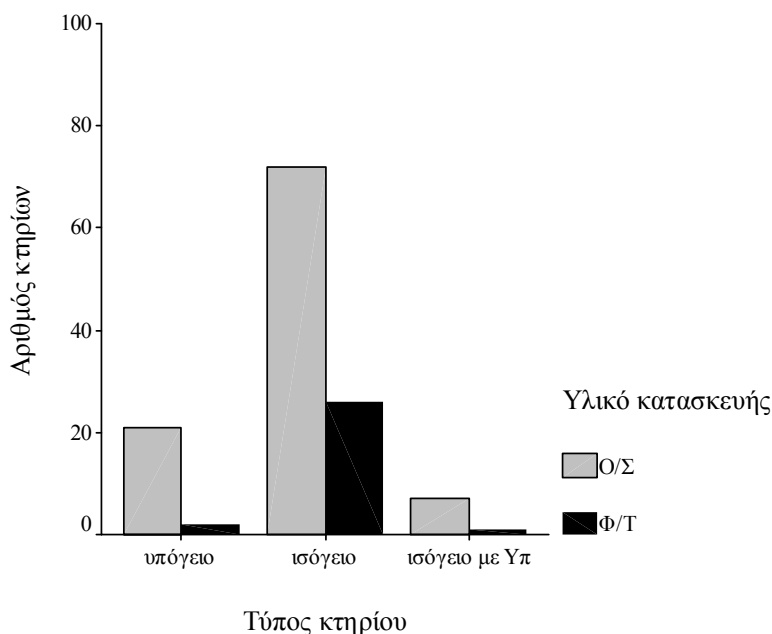
Εικόνα 8-5. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου

Το γράφημα (Α) στην Εικόνα 8-6 συνδυάζει τις κατηγορίες των τύπων και χρήσεων κτηρίου και δείχνει ότι η μεγαλύτερη τιμή ποσοστού ζημιάς εμφανίζεται στην κατηγορία «υπόγεια αποθήκη». Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται μερικώς από το γεγονός ότι το ποσοστό ζημιάς περιλαμβάνει τη ζημιά μόνο στο περίβλημα κτηρίου και όχι στον κινητό εξοπλισμό. Εξαιρέση στον κανόνα αυτό αποτελεί η «κειδική» ζημιά, δηλαδή η ζημιά στο σύστημα κεντρικής θέρμανσης (σύστημα λέβητας - καυστήρας) ενός κτηρίου, η οποία λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς και επιπλέον παρατηρείται συνήθως, σε υπόγειο χώρο με χρήση αποθήκης. Ακόμη η αντικειμενική αξία ακινήτου στην περίπτωση της υπόγειας αποθήκης είναι η πιο μικρή με μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Τέλος, από το γράφημα (Β), φαίνεται ότι στον τύπο «υπόγειο» παρατηρήθηκαν τα μεγαλύτερα βάρη νερού. Για όλους τους παραπάνω λόγους δικαιολογείται ότι η τιμή ποσοστού ζημιάς στην κατηγορία «υπόγεια αποθήκη» είναι η μεγαλύτερη.



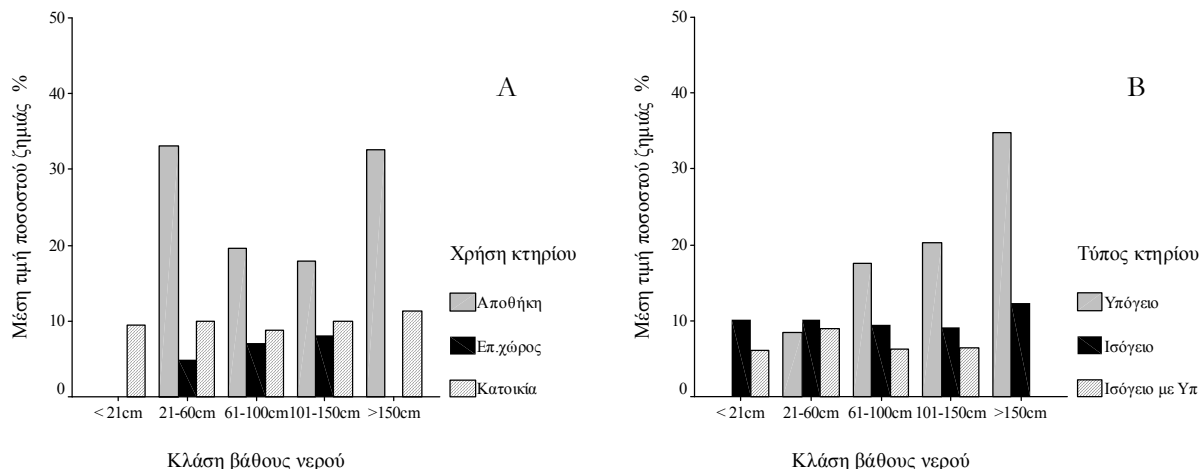
Εικόνα 8-6. Α. Γράφημα συνδυασμού τύπου και χρήσης κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου και Β. Γράφημα σχέσης βάθους νερού και ειδικής ζημιάς ανά τύπο κτηρίου για το Δήμο Μοσχάτου

Ακόμη το γράφημα της Εικόνας 8-7 δείχνει ότι το υλικό κατασκευής δεν επηρεάζει την πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων ζημιάς.



Εικόνα 8-7. Γράφημα σε στήλες του υλικού κατασκευής ανά τύπο κτηρίου

Τα γραφήματα Α και Β της Εικόνας 8-8 δείχνουν ότι για τις κατοικίες και για τους ισόγειους χώρους η μέση τιμή ποσοστού ζημιάς προκύπτει παρόμοια (10 %) σε όλες τις κλάσεις βάθους νερού. Δηλαδή φαίνεται ότι η αποτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς προκύπτει σχεδόν ανεξάρτητη από το βάθος νερού. Επίσης, παρατηρείται ότι η χρήση «αποθήκη» παρουσιάζει μεγάλες τιμές ποσοστού ζημιάς (> 30 %) είτε για πολύ μικρά (21 - 60 cm) είτε για πολύ μεγάλα βάθη νερού (> 150 cm). Ένας λόγος που εξηγεί την παρατήρηση αυτή είναι ο συνυπολογισμός της «ειδικής ζημιάς» στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς που παρατηρείται σε κτήρια με χρήση αποθήκης.



Εικόνα 8-8. Γραφήματα σε στήλες του ποσοστού ζημιάς σε σχέση με τις κλάσεις βάθους νερού ανά τύπο και χρήση κτηρίου

Συνοψίζοντας, μία βασική παρατήρηση που προκύπτει από τη στατιστική περιγραφή για το σύνολο δεδομένων ζημιάς στο Δήμο Μοσχάτου είναι ότι οι τιμές του ποσοστού ζημιάς σε όλες τις κλάσεις βάθους νερού για την κατοικία και τους ισόγειους χώρους είναι παρόμοιες. Αυτή η παρατήρηση υποδηλώνει ότι και άλλα πλημμυρικά μεγέθη, εκτός από το βάθος νερού συνέβαλαν στην πρόκληση της άμεσης ζημιάς, όπως είναι η διάρκεια του γεγονότος κατάκλυσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές του ποσοστού ζημιάς για την χρήση αποθήκης και ιδιαίτερα για την κατηγορία «υπόγεια αποθήκη» προκύπτουν μεγάλες και επιπλέον ότι η μέση τιμή του ποσοστού ζημιάς στις κλάσεις βάθους νερού παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Αυτή η παρατήρηση δικαιολογείται από: (α) το συνυπολογισμό της ειδικής ζημιάς στο σύστημα λέβητας – καυστήρας, (β) τη μικρή αντικειμενική αξία ακινήτου αυτής της χρήσης κτηρίου και (γ) τις μεγάλες τιμές σε βάθος νερού που παρατηρήθηκαν σε υπόγειους χώρους.

Για το σύνολο των 24 κατοικιών στους πληγέντες Δήμους της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής λόγω της πλημμύρας της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 τα αποτελέσματα της στατιστικής περιγραφής δίνονται στον Πίνακα 8-8.

Πίνακας 8-8. Στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων ζημιάς για το Δήμους της Νομαρχίας Ανατολική Αττικής

	Μέση τιμή	Ποσοστιαίο σημείο 25%	Διάμεσος	Ποσοστιαίο σημείο 75%
Απόλυτη ζημιά [€]	4559	3290	4734	5264
Ποσοστό ζημιάς [%]	7.4	5.6	7.0	8.1

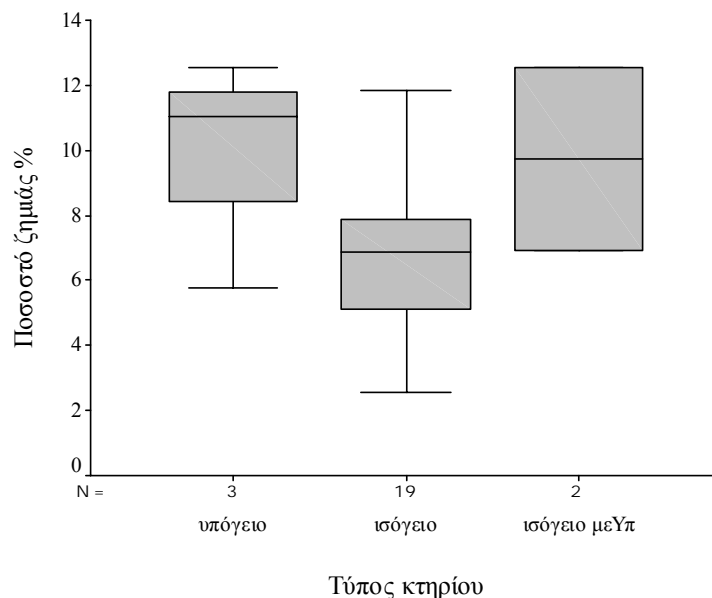
Παρατηρείται ότι η δειγματική μέση τιμή τόσο της απόλυτης τιμής όσο και του ποσοστού ζημιάς είναι μικρή, γεγονός που συμφωνεί με την παρατήρηση πεδίου ότι η αποκατάσταση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς απαιτεί μόνο εργασίες επισκευής. Επιπλέον, παρατηρείται ότι αυτά τα στατιστικά περιγραφικά χαρακτηριστικά εμφανίζουν μικρότερες τιμές ποσοστού ζημιάς σε σύγκριση με το σύνολο δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου. Αυτή η παρατήρηση οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι τα οικόπεδα στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής έχουν μεγαλύτερη αξία σε σύγκριση με εκείνα στο Δήμο Μοσχάτου.

Ακολουθεί ανάλυση των δεδομένων ζημιάς ως προς τον τύπο κτηρίου και δίνεται αντίστοιχα ο πίνακας περιγραφικών στατιστικών χαρακτηριστικών (βλέπε Πίνακα 8-9) και η συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων

ζημιάς (βλέπε Εικόνα 8-9).

Πίνακας 8-9. Στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων ζημιάς για τους Δήμους στην Νομαρχία Ανατολικής Αττικής

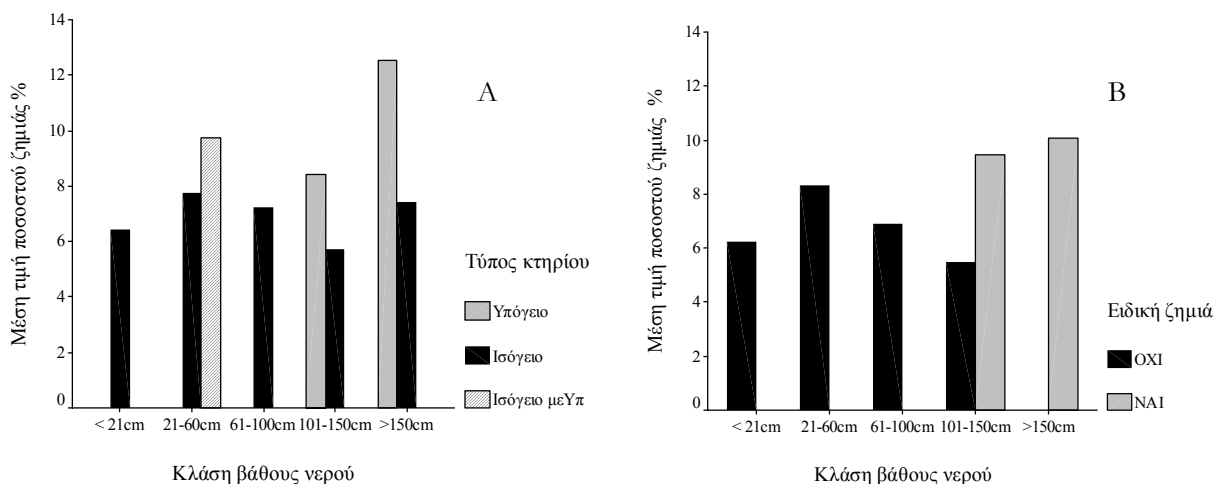
Τύπος κτηρίου	Αριθμός Κτηρίων	Μέση τιμή ποσοστού Ζημιάς [%]	Τυπική απόκλιση ποσοστού Ζημιάς [%]
Ισόγειο	19	6.80	2.41
Ισόγειο με υπόγειο	2	9.74	3.97
Υπόγειο	3	9.79	3.57



Εικόνα 8-9. Συνοπτική παράσταση συνόλου δεδομένων ζημιάς για τους Δήμους στην Νομαρχία Ανατολικής Αττικής

Παρατηρείται ότι σε όλους τους τύπους κατοικίας δεν υπάρχουν ακραίες τιμές του ποσοστού ζημιάς. Ειδικά για τις ισόγειες κατοικίες πάνω από το 50 % των στοιχείων εμφανίζουν ποσοστό ζημιάς μεταξύ των τιμών 6 – 8%. Οι τύποι κατοικίας «υπόγειο» και «ισόγειο με υπόγειο» αναφέρονται σε ελάχιστο αριθμό πλημμυρόπληκτων κτηρίων και επομένως δεν μπορούν να εξάγουν ασφαλή συμπεράσματα. Επίσης η κατηγοριοποίηση ανά υλικό κατασκευής έδειξε ότι στη συντριπτική πλειοψηφία τα κτήρια είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα και επομένως η παράμετρος «υλικό κατασκευής» δεν επηρεάζει την πρόκληση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στο συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός. Τα γραφήματα σε στήλες Α και Β της Εικόνας 8-10 δείχνουν ότι μεγάλες τιμές σε βάθος νερού (> 1 m) και συγκέντρωση της «ειδικής ζημιάς» καταγράφονται σε «υπόγειο» τύπο κατοικίας.

Συνοψίζοντας τη στατιστική επεξεργασία αυτού του συνόλου δεδομένων ζημιάς προκύπτει ότι η διακύμανση της μέσης τιμής του ποσοστού ζημιάς είναι μικρή της τάξης του 2<sup>ο</sup> και κατά συνέπεια οι διαφορές στην τιμή του ποσοστού ζημιάς μεταξύ των κλάσεων βάθους νερού ανά τύπο κτηρίου προκύπτουν αμελητέες. Σημειώνεται, ακόμη, ότι ο τύπος κατοικίας «υπόγειο» συγκέντρωσε τις μεγαλύτερες τιμές βάθους νερού και τις μεγαλύτερες τιμές ποσοστού ζημιάς.



Εικόνα 8-10. Γραφήματα ποσοστού ζημιάς σε σχέση με κλάσεις βάθους νερού ανά τύπο κτηρίου και ειδικής ζημιάς

## 8.6 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια

Το κεφάλαιο αναφέρεται στην καταγραφή και στατιστική επεξεργασία δυο συνόλων δεδομένων άμεσης ζημιάς σε κτήρια που προέκυψαν από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Η κατάκλυση και στις δύο περιπτώσεις πλημμυρικών γεγονότων προέκυψε λόγω υπερχειλίσσης ρέματος, η οποία χαρακτηρίζεται από σταδιακή ανύψωση της στάθμης πλημμύρας και μικρή ταχύτητα ροής. Ως χωρική κλίμακα ανάλυσης ζημιάς επιλέχθηκε η μεσοκλίμακα με στοιχεία μικροκλίμακας και μακροκλίμακας. Η ανάγκη αναγωγής των δεδομένων ζημιάς σε χωρικό επίπεδο της μεσοκλίμακας οδήγησε στη διαμόρφωση χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου ανά χρήση. Για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου υπολογίστηκε μια μέση αντικειμενική αξία ακινήτου και με αυτόν τον τρόπο μετατράπηκε η απόλυτη τιμή άμεσης ζημιάς σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο σε τιμή ποσοστού ζημιάς. Το μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» προσδιορίστηκε ως το κλάσμα του επικαιροποιημένου ύψους Σ.Σ. για την αποκατάσταση της καταγεγραμμένης πλημμυρικής άμεσης ζημιάς σε κτήρια, προς τη σημερινή μέση αντικειμενική αξία ακινήτου για τους χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου. Η στατιστική περιγραφή των δυο συνόλων δεδομένων άμεσης ζημιάς με τη μορφή ποσοστού ζημιάς υλοποιήθηκε για κάθε πλημμυρικό γεγονός συνολικά αλλά και χωριστά ως προς τους ακόλουθους τύπους και χρήσεις κτηρίου.

Πίνακας 8-10. Χρήσεις και τύποι κτηρίου στην περιοχή της Αττικής

Χρήση κτηρίου	Τύπος κτηρίου		
	Κατοικία – Ισόγειο	Κατοικία – Ισόγειο με υπόγειο	Κατοικία – Υπόγειο
Επαγγελματικός χώρος – Ισόγειο	Επαγγελματικός χώρος – Ισόγειο με υπόγειο	Επαγγελματικός χώρος – Υπόγειο	
Αποθήκη – Ισόγειο	Αποθήκη – Ισόγειο με υπόγειο	Αποθήκη – Υπόγειο	

Διαπιστώθηκε η πληρότητα ως προς τους τύπους και τις χρήσεις κτηρίου του συνόλου δεδομένων ζημιάς που προέκυψε λόγω της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 στο Δήμο Μοσχάτου σε αντίθεση με το σύνολο δεδομένων λόγω πλημμύρας της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005, το οποίο περιλαμβάνει ζημιές μόνο σε κατοικίες και είναι εξαιρετικά περιορισμένο σε πλήθος. Τα ποιοτικά συμπεράσματα της στατιστικής περιγραφής έδειξαν ότι οι υπόγειοι χώροι και οι αποθήκες υπέφεραν τη μεγαλύτερη άμεση πλημμυρική ζημιά λόγω κατάκλυσης.



## Κεφάλαιο 9

# Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Αττική

Το κεφάλαιο εστιάζει στην ταυτόχρονη στατιστική ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που συλλέχθηκαν από πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης σε περιοχές της Αττικής. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον για συγκεκριμένους χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου στην Αττική.

Η κατηγορία πλημμύρας υπό εξέταση είναι η πλημμύρα με κατάκλυση λόγω υπερχείλισης ρέματος, η οποία χαρακτηρίζεται από σταδιακή ανύψωση πλημμυρικής στάθμης και μικρή ταχύτητα ροής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα κεφάλαια 2 και 5, σε αυτή την κατηγορία πλημμύρας το πλημμυρικό μέγεθος που θεωρείται ότι παίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης ζημιάς είναι το βάθος νερού. Επομένως, το βάθος νερού είναι το πλημμυρικό μέγεθος που θα συμμετέχει στην ανάλυση αυτού του κεφαλαίου. Τα οικονομικά δεδομένα άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που συμμετέχουν στην ανάλυση έχουν μετατραπεί σε τιμές ποσοστού ζημιάς. Σε αυτό το κεφάλαιο, η ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς στηρίζεται στη δημιουργία και στατιστική περιγραφή της βάσης οικονομικών δεδομένων άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Έτσι, τα μεγέθη πλημμύρας και ζημιάς προέρχονται από: (α) την πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 στο Δήμο Μοσχάτου και (β) την πλημμύρα της 23<sup>ης</sup> και 24<sup>ης</sup> Νοέμβριου 2005 σε Δήμους της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής. Το αρχείο δεδομένων για το πλημμυρικό γεγονός κατάκλυσης της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 επιλέχθηκε για ανάλυση διότι: (α) είναι το μοναδικό με τόσο μεγάλο πλήθος καταγεγραμμένων πλημμυρόπληκτων κτηρίων στην Ελλάδα και (β) είναι το μοναδικό αρχείο στην Ελλάδα το οποίο περιλαμβάνει αναλυτική επιμέτρηση της πραγματικής άμεσης ζημιάς σε πλημμυρόπληκτα κτήρια στο πεδίο από κλιμάκια μηχανικών του πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ. Επομένως, το αρχείο αυτό περιέχει όλους τους τύπους και χρήσεις κτηρίου που διερευνήθηκαν στο κεφάλαιο 8 και επιπλέον η αποτίμηση της άμεσης ζημιάς σε μορφή απόλυτης τιμής πραγματοποιήθηκε

βάσει αναλυτικής επιμέτρησης ανά κτήριο, δηλαδή σε μικροκλίμακα.

Αντίθετα, το αρχείο δεδομένων για το πλημμυρικό γεγονός κατάκλυσης της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 είναι πολύ πιο περιορισμένο σε πλήθος πλημμυρόπληκτων κτηρίων αλλά και σε περιγραφικά στοιχεία καταγραφής της άμεσης ζημιάς και επιπλέον, η αποτίμηση της άμεσης ζημιάς σε μορφή απόλυτης τιμής πραγματοποιήθηκε κατ' εκτίμηση ανά μονάδα κατακλυσμένης επιφάνειας, δηλαδή σε μακροκλίμακα. Για τους παραπάνω λόγους, η ανάπτυξη των σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς σε αυτό το κεφαλαίο βασίστηκε κυρίως στο αρχείο από το πλημμυρικό γεγονός της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, ενώ τα δεδομένα από την πλημμύρα της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για λόγους σύγκρισης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς οδηγεί στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας σύμφωνα με τη μορφή της Εικόνας 7-3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, το μοντέλο ζημιάς μεσοκλίμακας αναφέρεται στην κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση και σε μοντέλο πλημμύρας γραμμικής παρεμβολής παρατηρημένων τιμών βάθους νερού. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο συνδυασμός αυτού του μοντέλου πλημμύρας με μοντέλο ζημιάς μεσοκλίμακας οδηγεί σε μέτριο ταιριασμα του βαθμού πολυπλοκότητας των μοντέλων (βλέπε Εικόνα 7.2). Το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς περιλαμβάνει διαδικασία αποτίμησης ζημιάς με βάση την αντικειμενική αξία ακινήτου και υπολογισμό του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» ως κόστος εργασιών επισκευής άμεσης ζημιάς. Σε ό,τι αφορά το δομημένο περιβάλλον, το μοντέλο ζημιάς διακρίνει τις δομημένες περιοχές σε χρήσεις και τύπους κτηρίου και η άμεση ζημιά αφορά μόνο το περιβλήμα ενός κτηρίου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς ως καταλληλότερη μέθοδος εκτίμησης ζημιάς επιλέγεται η μέθοδος σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς που έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της αναμενόμενης πλημμυρικής ζημιάς σε απόλυτη τιμή.

Το κεφαλαίο αυτό διαθρώνεται σε επτά υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 9.1 αναφέρεται στην περιγραφή των δεδομένων πλημμύρας, ενώ το υποκεφάλαιο 9.2 στην κλίμακα χωρικής ανάλυσης του μοντέλου ζημιάς. Στο υποκεφάλαιο 9.3 πραγματοποιείται η πρωτογενής επεξεργασία των δεδομένων για την αφαίρεση εξωδευματικών τιμών. Το υποκεφάλαιο 9.4 περιγράφει τη στατιστική ανάλυση της σχέσης των μεγεθών ανά χρήση κτηρίου και στο τελευταίο εδάφιο συνοψίζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Στο υποκεφάλαιο 9.5 υλοποιείται η ανάπτυξη των σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς ανά χρήση δομημένης περιοχής για την Αττική, ενώ στο υποκεφάλαιο 9.6 συγκρίνεται η σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς για κατοικίες με αντίστοιχες καμπύλες για κατοικίες που αναπτύχθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία σε ισοδύναμες συνθήκες. Το υποκεφάλαιο 9.7 συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα αυτού του κεφαλαίου.

## 9.1 Δεδομένα πλημμύρας

Δεδομένα πλημμύρας στην παρούσα ανάλυση αποτελούν οι παρατηρημένες τιμές του βάθους νερού, οι οποίες καταγράφηκαν στο πεδίο κατά τη διάρκεια των επιτόπιων αυτοψιών. Πρόκειται για τιμές που καταγράφηκαν στο εσωτερικό των πλημμυρόπληκτων κτηρίων με επίπεδο αναφοράς το δάπεδο του ισογείου ή του υπογείου ανάλογα με τον τύπο κτηρίου. Κατά παραδοχή, θεωρήθηκε ότι πρόκειται για μέγιστες τιμές του βάθους νερού.

## 9.2 Κλίμακα χωρικής ανάλυσης

Η ανάπτυξη τοπικού μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας στην Αττική προϋποθέτει την αναγωγή των δεδομένων στο χωρικό επίπεδο της μεσοκλίμακας. Γενικά, ως επίπεδο χωρικής ανάλυσης σε μεσοκλίμακα έχει οριστεί



το «διαμέρισμα». Στην περίπτωση των περιοχών μελέτης στην Αττική, το επίπεδο χωρικής ανάλυσης διαμορφώνουν οι χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου ανά χρήση. Οι χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου αντιπροσωπεύουν τις τοπικές συνθήκες της σύνθεσης του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση, δηλαδή συγκεντρώνουν κοινά χαρακτηριστικά κατασκευής των πλημμυρόπληκτων κτηρίων και ανάλυση της χρήσης και, με βάση αυτά, υπολογίζεται η μέση αντικειμενική αξία ακινήτου για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κτηρίου. Η μέση αντικειμενική αξία αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της αντικειμενικής αξίας του υποσύνολου πλημμυρόπληκτων κτηρίων ίδιας χρήσης κτηρίου.

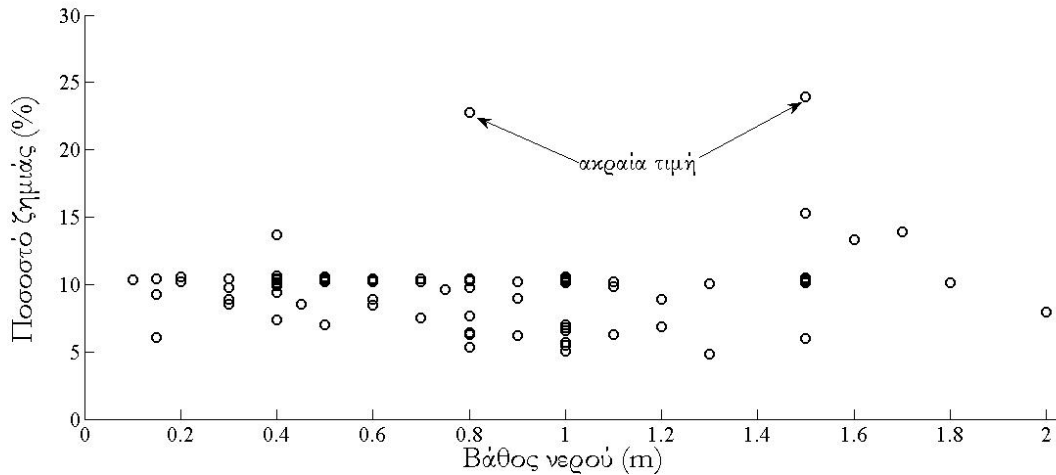
Στην περίπτωση των περιοχών μελέτης στην Αττική, τα οικονομικά δεδομένα άμεσης ζημιάς ανά κτήριο παρουσιάζουν διαφοροποίηση ως προς τον τρόπο υπολογισμού. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, το ύψος Σ.Σ. υπολογίστηκε με αναλυτική επιμέτρηση της πραγματικής ζημιάς σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο και σύνταξη αντιστοίχου προϋπολογισμού βάσει τιμολογίου υλικών κατασκευής και εργασιών αποκατάστασης. Επομένως, τα οικονομικά δεδομένα άμεσης ζημιάς εκτιμήθηκαν με τη μορφή απόλυτης τιμής σε χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας. Για την περίπτωση της πλημμύρας της 23 - 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005, το ύψος Σ.Σ. σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο υπολογίστηκε ανά μονάδα επιφάνειας της κατακλυσμένης περιοχής και κατά συνέπεια τα οικονομικά δεδομένα άμεσης ζημιάς εκτιμήθηκαν με τη μορφή απόλυτης τιμής σε χωρικό επίπεδο μακροκλίμακας. Συνοψίζοντας λοιπόν, η ανάπτυξη του τοπικού μοντέλου ζημιάς στην Αττική με βάση τα συγκεκριμένα πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης θα υλοποιηθεί σε επίπεδο μεσοκλίμακας με στοιχεία μικροκλίμακας και μακροκλίμακας αντίστοιχα.

### 9.3 Πρωτογενής επεξεργασία δεδομένων

Στο υποκεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται το στάδιο της πρωτογενούς επεξεργασίας στο σύνολο δεδομένων ποσοστού ζημιάς με σκοπό την αφαίρεση των εξωδευγματικών τιμών από το σύνολο, όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών περιγράφηκε στο εδάφιο 7.3.2. και εφαρμόστηκε στο σύνολο τιμών ποσοστού ζημιάς, γιατί αυτά τα δεδομένα είναι αποτελέσματα υπολογισμών με παραδοχές και επομένως θεωρείται ότι φέρουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα.

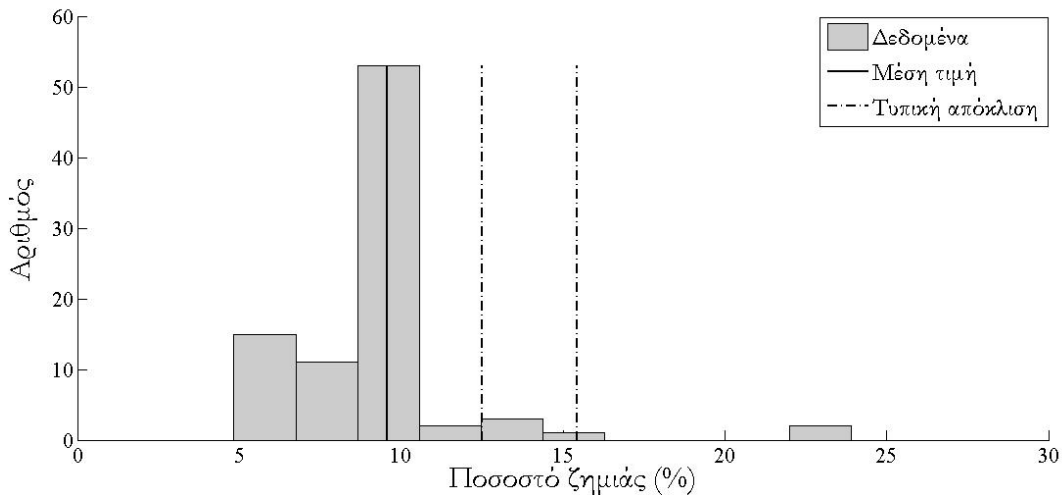
Η πρωτογενής επεξεργασία υλοποιείται στο σύνολο τιμών ποσοστού ζημιάς ακολουθώντας την ίδια υποδιαίρεση σε υποσύνολα (ανάλογα με την χρήση κτηρίου και το πλημμυρικό γεγονός από το οποίο προήλθαν τα δεδομένα) που εφαρμόζεται στη συνέχεια στην ανάλυση για λόγους ομοιομορφίας. Τα υπόλοιπα στάδια στατιστικής επεξεργασίας δεδομένων, δηλαδή της εξομάλυνσης και του ελέγχου κανονικότητας περιλαμβάνονται στο υποκεφάλαιο 9.4 της ανάλυσης, διότι τα στάδια αυτά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της επαναληπτικής διαδικασίας επιλογής και προσαρμογής της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα.

Στην Εικόνα 9-1 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς του υποσύνολου δεδομένων ζημιάς που ανήκουν στην κατηγορία χρήσης κατοικίας και προήλθαν από το πλημμυρικό γεγονός της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002.



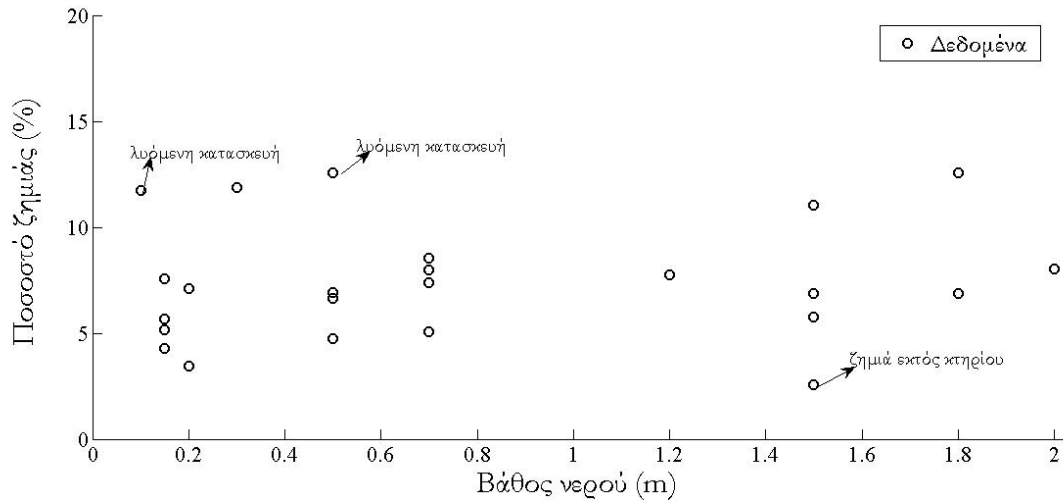
Εικόνα 9-1. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς από την πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 για χρήση κατοικίας

Στο υποσύνολο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος αναγνώρισης εξωδειγματικών (ακραίων) τιμών που απεικονίζεται στην Εικόνα 9-2. Στο ιστόγραμμα έχουν σημειωθεί οι οριακές τιμές του ποσοστού ζημιάς πέρα από τις οποίες οι τιμές αναγνωρίζονται ως εξωδειγματικές τιμές του υποσυνόλου. Από την Εικόνα 9-2 φαίνεται ότι υπάρχουν ακραίες τιμές του ποσοστού ζημιάς στο συγκεκριμένο υποσύνολο οι οποίες εξαιρούνται και δεν συμμετέχουν στο στάδιο της ανάλυσης.



Εικόνα 9-2. Αναγνώριση εξωδειγματικών τιμών δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση κατοικίας

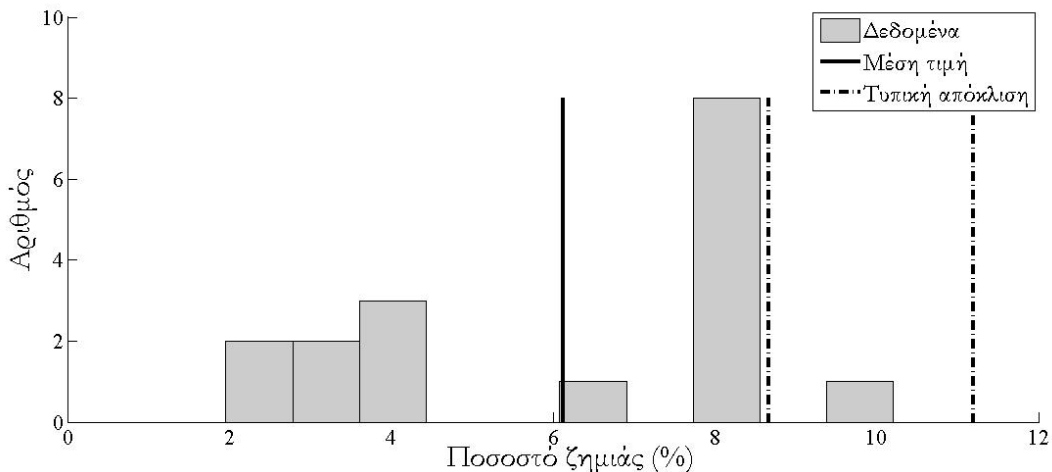
Στην Εικόνα 9-3 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς του υποσυνόλου δεδομένων ζημιάς που ανήκουν στην κατηγορία χρήσης κατοικίας και προήλθαν από το πλημμυρικό γεγονός της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005.



Εικόνα 9-3. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς από πλημμύρα 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 για χρήση κατοικίας

Στο υποσύνολο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος αναγνώρισης εξωδειγματιών τιμών και διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχουν εξωδειγματιές τιμές ποσοστού ζημιάς στο συγκεκριμένο υποσύνολο. Επιπλέον, στην ανάλυση που ακολουθεί εξαιρούνται τα ζεύγη τιμών βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς που έχουν σημειωθεί γραφικά στην Εικόνα 9-3, ως ιδιαίτερες περιπτώσεις κατασκευής με χρήση κατοικίας οι οποίες αποκλίνουν σημαντικά από τους χαρακτηριστικούς τύπους κατοικίας για την περιοχή της Ανατολικής Αττικής.

Στην Εικόνα 9-4 απεικονίζεται το ιστόγραμμα των τιμών ποσοστού ζημιάς που ανήκουν στην κατηγορία χρήσης επαγγελματικού χώρου και προήλθαν από το πλημμυρικό γεγονός της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 και εφαρμόζεται η γνωστή μέθοδος αναγνώρισης εξωδειγματιών τιμών. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν εξωδειγματιές τιμές ποσοστού ζημιάς στο συγκεκριμένο υποσύνολο.

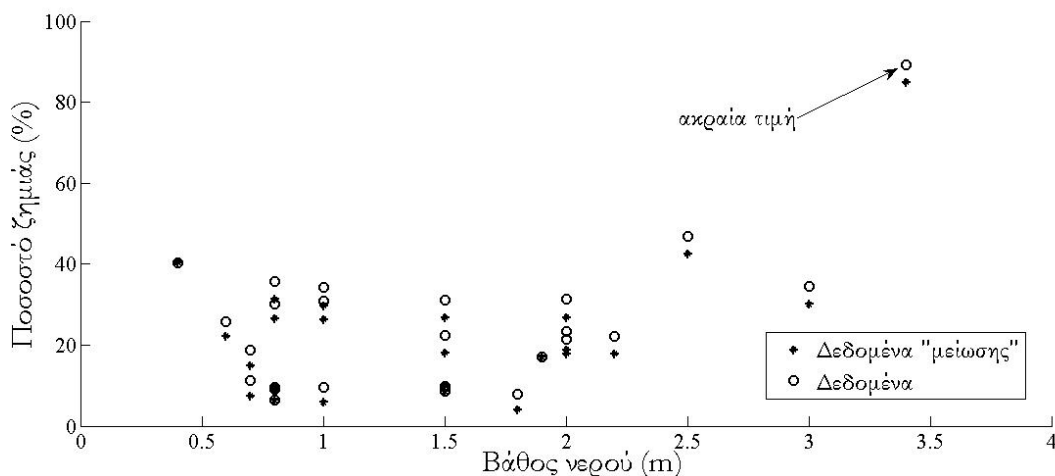


Εικόνα 9-4. Αναγνώριση εξωδειγματιών τιμών δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση επαγγελμ. χώρου

Στο υποκεφάλαιο 8.5, διαπιστώθηκε ότι τα οικονομικά δεδομένα ζημιάς για τη χρήση αποθήκης παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα της «ειδικής» ζημιάς σε πολλά από τα πλημμυρόπληκτα κτήρια του αρχικού υποσυνόλου. Υπενθυμίζεται ότι ως «ειδική» ζημιά ορίστηκε η άμεση ζημιά στο κεντρικό σύστημα θέρμανσης (σύστημα λέβητα – καυστήρα), διότι το κόστος αντικατάστασής του είναι σταθερό, αλλά ιδιαίτερα υψηλό. Δε-

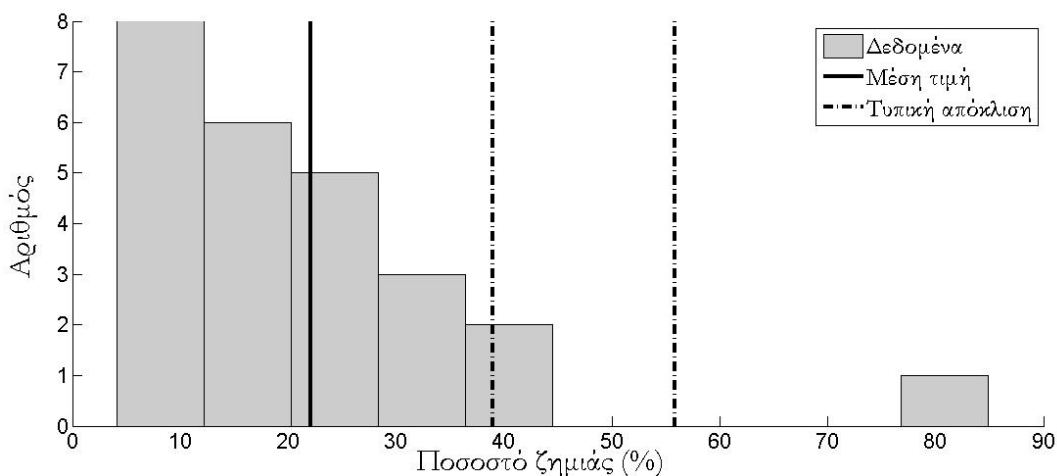
δομένου ότι ο σκοπός της ανάλυσης είναι η ανάπτυξη εμπειρικής σχετικής καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς, θεωρήθηκε προτιμότερο να εξαιρεθεί η «ειδική» ζημιά από τον υπολογισμό του ποσοστού ζημιάς σε κάθε κτήριο.

Στην Εικόνα 9-5 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς του υποσυνόλου δεδομένων ζημιάς που ανήκουν στην κατηγορία χρήσης αποθήκης και προήλθαν από το πλημμυρικό γεγονός της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 (στην αρχική του μορφή) και με τη μορφή μετά την αφαίρεση της «ειδικής» ζημιάς από τις τιμές του ποσοστού ζημιάς (δεδομένα «μείωσης»).



Εικόνα 9-5. Διάγραμμα διασποράς δεδομένων ζημιάς (πλημμύρα 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) για χρήση αποθήκης στην αρχική μορφή και στην μορφή δεδομένων “μείωσης”

Στο υποσύνολο δεδομένων «μείωσης» εφαρμόζεται η μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών που απεικονίζεται στην Εικόνα 9-6. Στο ιστόγραμμα έχουν σημειωθεί οι οριακές τιμές του ποσοστού ζημιάς, πέρα από τις οποίες οι τιμές αναγνωρίζονται ως εξωδευγματικές τιμές του υποσυνόλου.



Εικόνα 9-6. Αναγνώριση εξωδευγματικών τιμών των δεδομένων ζημιάς («δεδομένων μείωσης») από την πλημμύρα 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002 για την χρήση αποθήκης

Από την Εικόνα 9-6 φαίνεται ότι υπάρχουν εξωδευγματικές τιμές του ποσοστού ζημιάς στο συγκεκριμένο υποσύνολο, οι οποίες εξαιρούνται και δεν συμμετέχουν στο στάδιο της ανάλυσης.

## 9.4 Ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς

Στο υποκεφάλαιο αυτό λαμβάνει χώρα η στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για το σύνολο δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Τα στάδια της στατιστικής ανάλυσης διακρίνονται στην επιλογή και προσαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα και εκτίμηση των συντελεστών της συνάρτησης, έλεγχος καταλληλότητας της προσαρμογής και ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της στατιστικής πρόγνωσης με υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης. Η επιλεγμένη θεωρητική συνάρτηση προσαρμογής αποτελεί μια προσδιορισμένη σχέση (καμπύλη) μεταξύ του βάθους νερού και του ποσοστού ζημιάς.

Η ανάλυση υλοποιείται σε μεσοκλίμακα, δηλαδή χρησιμοποιώντας τις τιμές ποσοστού ζημιάς που υπολογίστηκαν με βάση τους χαρακτηριστικούς τύπους κτηρίου ανά χρήση. Ενδιάμεσες διερευνήσεις σε υποσύνολα δεδομένων ανά χρήση και ανά τύπο κτηρίου δεν κατέληξαν σε προσαρμογή καμπύλης σε αυτά λόγω περιορισμένου πλήθους στοιχείων σε κάθε υποσύνολο. Ειδικά για το αρχείο δεδομένων από την πλημμύρα της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 δεν πραγματοποιήθηκαν και ενδιάμεσες διερευνήσεις ανάλυσης σε τύπους κατοικίας λόγω του εξαιρετικά περιορισμένου πλήθους στοιχείων. Έτσι, η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε κατηγοριοποίηση των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς μόνο ανά χρήση κτηρίου, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς ανά χρήση κτηρίου. Επίσης, η στατιστική ανάλυση πραγματοποιείται χωριστά για κάθε πλημμυρικό γεγονός λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού του μεγέθους «ποσοστού ζημιάς» σε κάθε γεγονός.

Για τη διαδικασία επιλογής και προσαρμογής της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής χρησιμοποιείται το «εργαλείο προσαρμογής καμπύλης» (curve-fitting tool) σε περιβάλλον Matlab R2008a. Το θεωρητικό υπόβαθρο των σταδίων της στατιστικής ανάλυσης περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 7.3. Στην ανάλυση εξετάζεται εάν απαιτείται στατιστική εξομάλυνση στα δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς και στη συνέχεια εάν αυτά ακολουθούν την κανονική κατανομή. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο έλεγχος κανονικοποίησης στην περίπτωση των εξομαλυσμένων δεδομένων εφαρμόζεται σε τεχνητά σύνολα δεδομένων με αποτέλεσμα η ισχύς του ελέγχου να αποδυναμώνεται.

Από τους διαθέσιμους τύπους συναρτήσεων κατανομής διερευνήθηκαν γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης, τα οποία περιγράφηκαν θεωρητικά στο υποκεφάλαιο 7.4. Στα ακόλουθα εδάφια υλοποιείται η στατιστική ανάλυση για την προσαρμογή κατάλληλης θεωρητικής συνάρτησης στα δεδομένα ανά χρήση κτηρίου και ανά πλημμυρικό γεγονός, ενώ στο εδάφιο 9.4.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής.

### 9.4.1 Χρήση κατοικίας

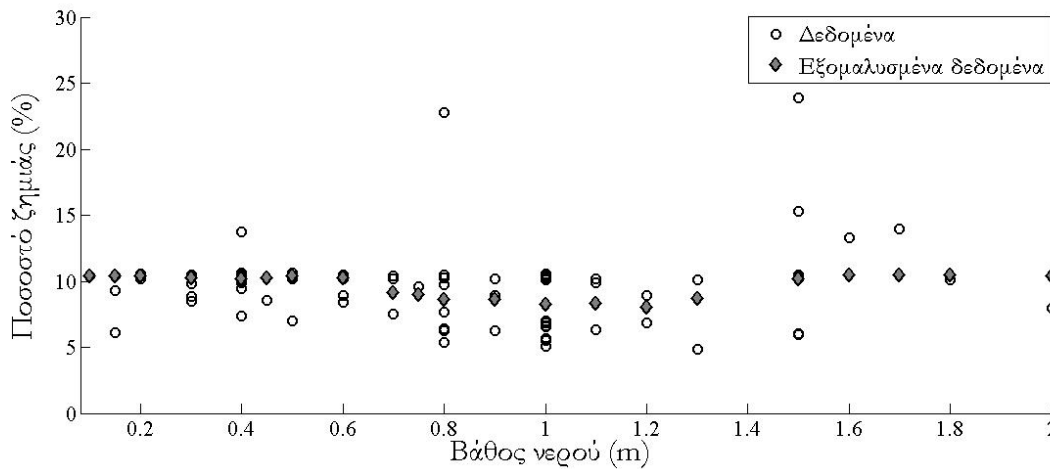
Αρχικά εξετάζεται το υποσύνολο δεδομένων από την πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002. Υπενθυμίζεται ότι ως εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  θεωρείται η αδιάστατη μεταβλητή του ποσοστού ζημιάς και ως ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  θεωρείται το βάθος νερού. Παρά την εξαίρεση των εξωδειγματικών τιμών από το υποσύνολο, διαπιστώνεται ότι κανείς από τους παρακάτω διαθέσιμους τύπους συνάρτησης στο εργαλείο προσαρμογής καμπύλης δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσαρμογής.

Πίνακας 9-1. Τύποι προσαρμογής συνάρτησης για το αρχικό υποσύνολο δεδομένων

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	R <sup>2</sup>
Δυναμόσυναρτηση	$y = ax^b$	0.0001
Πολυωνυμική 1 <sup>ου</sup> βαθμού	$y = ax + b$	0.002
Πολυωνυμική 2 <sup>ου</sup> βαθμού	$y = ax^2 + bx + c$	0.03

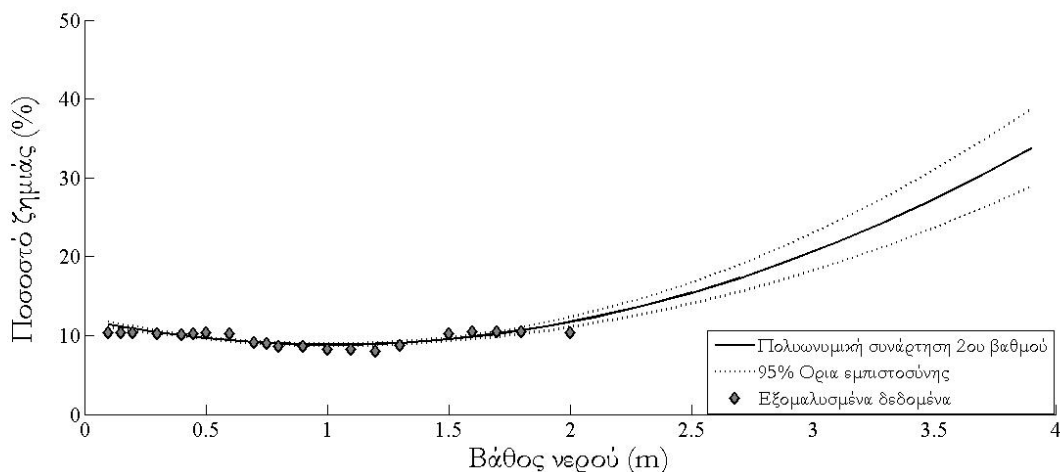
Έτσι, επιλέγεται να εφαρμοστεί μέθοδος στατιστικής εξομάλυνσης στο αρχικό υποσύνολο δεδομένων. Χρησιμοποιείται η μέθοδος «Lowess», δηλαδή η μέθοδος εξομάλυνσης τοπικής παλινδρόμησης με πολυώνυμο 1<sup>ου</sup> βαθμού με βήμα ίσο με το 25% του πλήθους στοιχείων του αρχικού υποσυνόλου. Επειδή το συγκεκριμένο υποσύνολο περιέχει εξωδειγματικές τιμές, χρησιμοποιείται η ανθεκτική εκδοχή της μεθόδου «Lowess», η μέθοδος «Robust Lowess» (βλέπε εδάφιο 7.3.3). Στην Εικόνα 9-7 απεικονίζονται το υποσύνολο αρχικών δεδομένων και το αντίστοιχο υποσύνολο εξομαλυσμένων δεδομένων.

Ο έλεγχος κανονικότητας στο υποσύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων με τη γραφική μέθοδο σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας δείχνει ότι τα εξομαλυσμένα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επομένως, μπορούν να διερευνηθούν και μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης για την επιλογή θεωρητικής συνάρτησης.



Εικόνα 9-7. Διάγραμμα διασποράς υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή

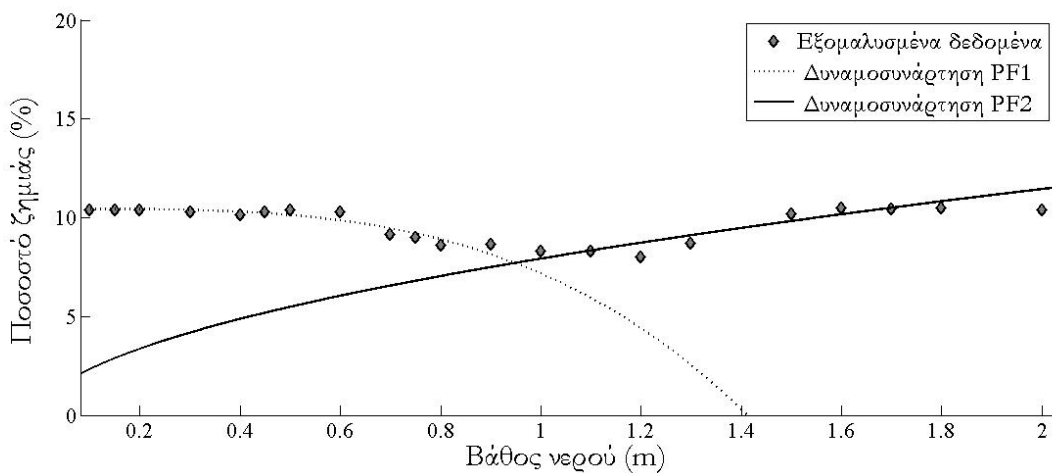
Τα βέλτιστα αποτελέσματα προσαρμογής συνάρτησης στο υποσύνολο εξομαλυσμένων δεδομένων έδωσε μια πολυωνυμική συνάρτηση 2<sup>ου</sup> βαθμού με το συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup> ίσο με 0.61. Ωστόσο, η επέκταση της πολυωνυμικής συνάρτησης για την πρόγνωση τιμών και τα όρια εμπιστοσύνης της καμπύλης με συντελεστή εμπιστοσύνης 95% δείχνουν, ότι η αβεβαιότητα της πρόγνωσης των τιμών της καμπύλης είναι μεγάλη (βλέπε Εικόνα 9-8).



Εικόνα 9-8. Προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 2<sup>ου</sup> βαθμού στο σύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων

Η παραβολική μορφή της πολυωνυμικής συνάρτησης 2<sup>ου</sup> βαθμού δεν αποτελεί αποδεκτή μορφή καμπύλης για τον προσδιορισμό της σχέσης βάθους νερού – άμεσης ζημιάς, η οποία αναμένεται να περιγραφεί από αύξουσα συνάρτηση. Η πολυωνυμική συνάρτηση 2<sup>ου</sup> βαθμού είναι μια συνάρτηση αρχικά φθίνουσα, η οποία γίνεται αύξουσα συνάρτηση μετά το σημείο καμπής. Μηδενίζοντας την πρώτη παράγωγο της πολυωνυμικής συνάρτησης, προσδιορίζεται το ακρότατο σημείο (ελάχιστο) για την τιμή  $x = 1$ , όπου  $x$  συμβολίζεται το βάθος νερού σε μέτρα.

Με αυτό τον τρόπο, διακρίνονται δύο διαστήματα τιμών βάθους νερού,  $x \in [0, 1]$  και  $x \in [1, 2]$ , για καθένα από τα οποία επαναλαμβάνεται η διαδικασία προσαρμογής συνάρτησης. Τα βέλτιστα αποτελέσματα προσαρμογής συνάρτησης προκύπτουν για συναρτήσεις τύπου δυναμοσυνάρτησης (βλέπε Εικόνα 9-9) και ο έλεγχος καταλληλότητας υλοποιείται με το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ .



Εικόνα 9-9. Οι δύο καμπύλες προσαρμογής για τα δυο υποσύνολα των εξομαλυσμένων δεδομένων

Για το διάστημα τιμών  $x \in [0, 1]$  η δυναμοσυνάρτηση PF1 είναι φθίνουσα και συνεπώς θεωρείται μη αποδεκτή για τον προσδιορισμό της σχέσης βάθους νερού – ζημιάς και αντικαθίσταται από μια σταθερή συνάρτηση. Για το διάστημα τιμών  $x \in [1, 2]$  τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής της δυναμοσυνάρτησης PF2 φαίνονται στον Πίνακα 9-2 και στον Πίνακα 9-3. Η δυναμοσυναρτηση (PF2) θεωρείται κατάλληλη θεωρητική συνάρτηση.

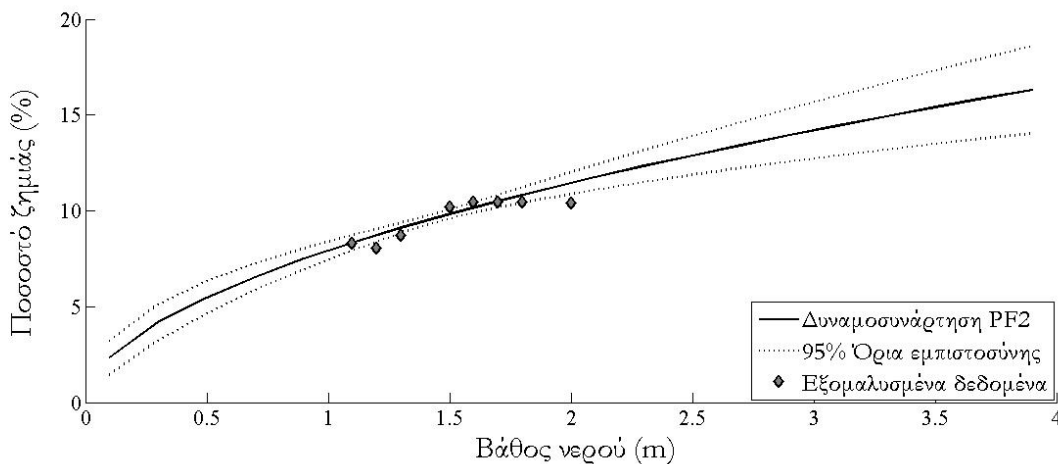
Πίνακας 9-2. Συνάρτηση των εξομαλυσμένων δεδομένων για το σύνολο τιμών  $x \in [1, 2]$

Διάστημα	Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Συντελεστές παλινδρόμησης		Όρια εμπιστοσύνης 95%	
$x \in [1, 2]$	Δυναμόσυναρτηση (PF2)	$y = ax^b$	a	8.203	a	(8.02, 8.385)
			b	0.454	b	(0.389, 0.160)

Πίνακας 9-3. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Διάστημα	Τύπος συνάρτησης	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
$x \in [1, 2]$	Δυναμόσυναρτηση (PF2)	0.86	0.44	Αποδεικτή

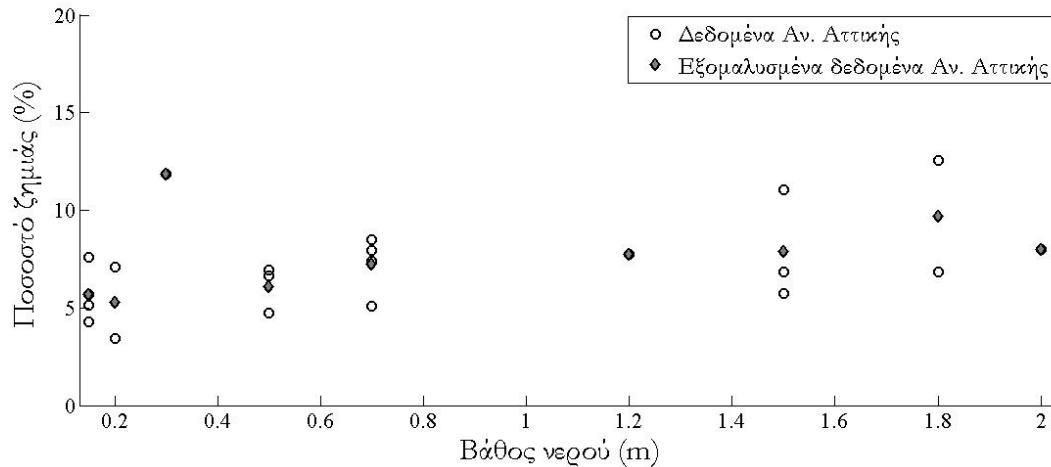
Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της καμπύλης PF2 απεικονίζονται γραφικά τα όρια εμπιστοσύνης της επέκτασης της καμπύλης με επίπεδο σημαντικότητας 95% για το διάστημα τιμών  $x \in [1, 4]$  (βλέπε Εικόνα 9-10).



Εικόνα 9-10. Η επέκταση και τα όρια εμπιστοσύνης της καμπύλης για χρήση κατοικίας

Στη συνέχεια, εξετάζεται το υποσύνολο δεδομένων της πλημμύρας της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005. Εφαρμόζεται η μέθοδος στατιστικής εξομάλυνσης δεδομένων «Lowess» με βήμα ίσο με το 25% του πλήθους στοιχείων του αρχικού υποσυνόλου και προκύπτει το αντίστοιχο υποσύνολο εξομαλυσμένων δεδομένων. Η Εικόνα 9-11 δείχνει το υποσύνολο δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή.

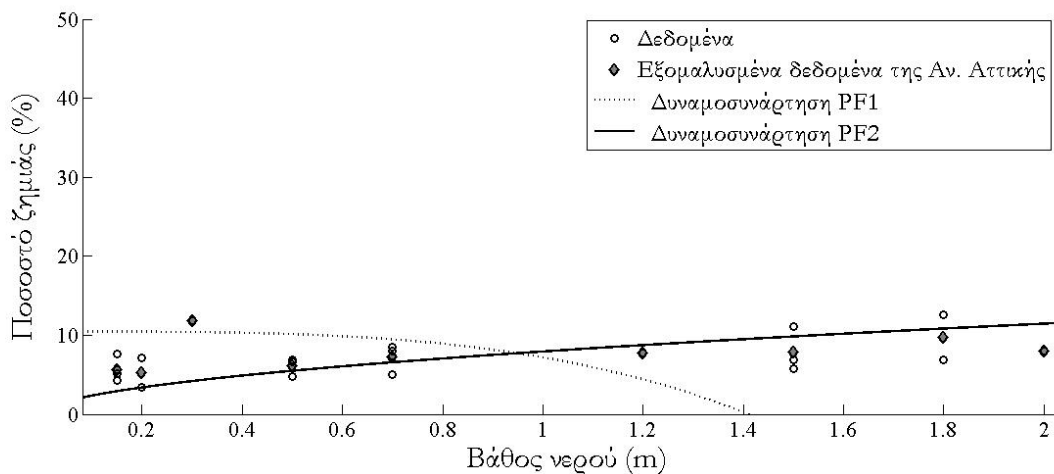




Εικόνα 9-11. Διάγραμμα διασποράς του υποσύνολου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή

Ο έλεγχος κανονικότητας στο υποσύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων δείχνει ότι με τη γραφική μέθοδο σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας, τα εξομαλυσμένα δεδομένα ζημιάς δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Η προσαρμογή συνάρτησης τύπου δυναμοσυνάρτησης έχει ως αποτέλεσμα συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  ίσο με 0.31 και συνεπώς κρίνεται μη ικανοποιητική.

Η υπέρθεση της δυναμοσυνάρτησης PF2 που αναπτύχθηκε από το αρχείο δεδομένων για το Δήμο Μοσχάτου στο υποσύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων για την περιοχή Ανατολικής Αττικής απεικονίζεται στην Εικόνα 9-12.



Εικόνα 9-12. Υπέρθεση των δυναμοσυναρτήσεων του Δήμου Μοσχάτου στα εξομαλυσμένα δεδομένα της Αν. Αττικής

Για  $x \in [1, 2]$  τα εξομαλυσμένα δεδομένα ζημιάς φαίνεται γραφικά ότι ακολουθούν την καμπύλη της δυναμοσυνάρτησης PF2. Ο έλεγχος της καταλληλότητας προσαρμογής του υποσύνολου δεδομένων στην αρχική και εξομαλυσμένη τους μορφή στην συνάρτηση PF2 υλοποιείται με το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ . Τα αριθμητικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 9-4. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 < 0.5$  και επίσης η συσχέτιση των μεταβλητών  $x$  και  $y$  δεν είναι στατιστικά σημαντική.

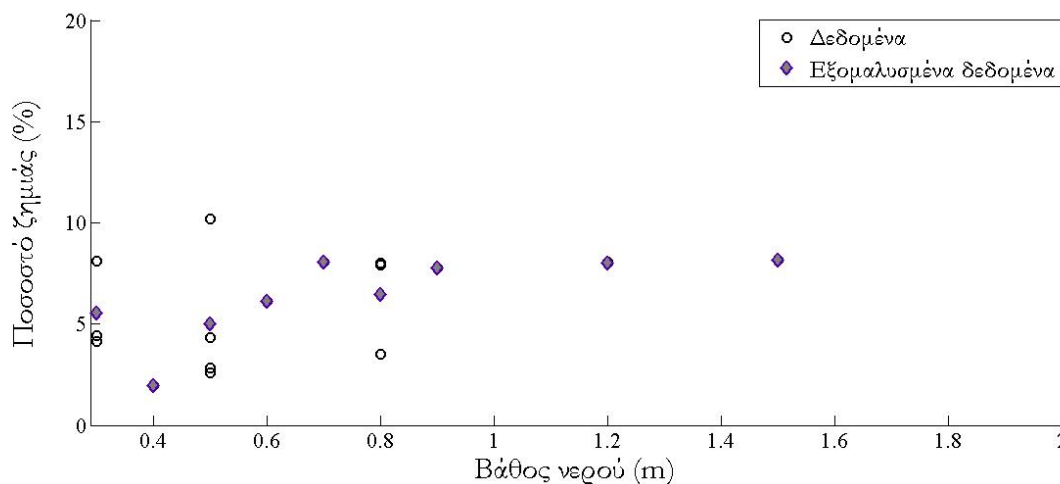
Πίνακας 9-4. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής του υποσύνολου δεδομένων στη δυναμοσυνάρτηση PF2

Διάστημα	Τύπος Συνάρτησης	R <sup>2</sup>		Σημαντικότητα του R <sup>2</sup>	
		Αρχικά δεδομένα	Εξομαλυσμένα δεδομένα	Αρχικά δεδομένα	Εξομαλυσμένα δεδομένα
$x \in [1, 2]$	Δυναμόσυναρτηση (PF2)	0.20	0.45	Μη αποδεικτή	Μη αποδεικτή

Υπενθυμίζεται, ότι αυτή η υπέρθεση και σύγκριση δεδομένων ζημιάς αφορά κατοικίες, οι οποίες εμφανίζουν πολλά κοινά στοιχεία περιγραφής της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στο περιβλημα ενός κτηρίου σε σύγκριση με άλλες χρήσεις κτηρίου. Επιπλέον, η σύγκριση αφορά δεδομένα που προέκυψαν από δύο πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης σε αστικό και ημιαστικό περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής της Αττικής. Ωστόσο, ο Πίνακας 9-4 δείχνει ότι τα αποτελέσματα της προσαρμογής της δυναμοσυνάρτησης PF2 στο νέο υποσύνολο δεδομένων δεν είναι ικανοποιητικά. Επομένως, η δυναμοσυνάρτηση PF2 δεν έχει γενική ισχύ για ευρύτερη εφαρμογή σε δομημένες περιοχές με παρόμοια υδρολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά και κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη κλιμακωτών συναρτήσεων βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα πιο αδρομερή στατιστική πρόγνωση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς. Αναλυτικά η ανάπτυξη αυτού του τύπου συνάρτησης περιγράφεται στο ακόλουθο υποκεφάλαιο.

### 9.4.2 Χρήση επαγγελματικού χώρου

Εξετάζεται το υποσύνολο δεδομένων της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, το οποίο είναι το μόνο διαθέσιμο για τη συγκεκριμένη χρήση κτηρίου. Η μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών δείχνει ότι δεν υπάρχουν ακραίες τιμές στο υποσύνολο. Επίσης, διαπιστώνεται ότι κανείς από τους διαθέσιμους τύπους συναρτήσεων κατανομής στο εργαλείο προσαρμογής καμπύλης δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσαρμογής στα δεδομένα. Έτσι εφαρμόζεται η μέθοδος στατιστικής εξομάλυνσης «Lowess» με βήμα ίσο με το 25% του πλήθους στοιχείων του αρχικού υποσύνολου. Στην Εικόνα 9-13 απεικονίζεται το υποσύνολο δεδομένων στην αρχική και εξομαλυσμένη του μορφή.



Εικόνα 9-13. Διάγραμμα διασποράς του υποσύνολου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυσμένη του μορφή

Ο έλεγχος κανονικότητας στο υποσύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων με τη γραφική μέθοδο σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας δείχνει ότι τα εξομαλυσμένα δεδομένα ζημιάς δεν ακολουθούν την κανο-

νική κατανομή, οπότε η επιλογή τύπου συνάρτησης κατανομής περιλαμβάνει μόνο μοντέλα μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Τα βέλτιστα αποτελέσματα προσαρμογής συνάρτησης δίνει η συνάρτηση PF3 τύπου δυναμοσυνάρτησης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής της συνάρτησης στα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-5 και στον Πίνακα 9-6.

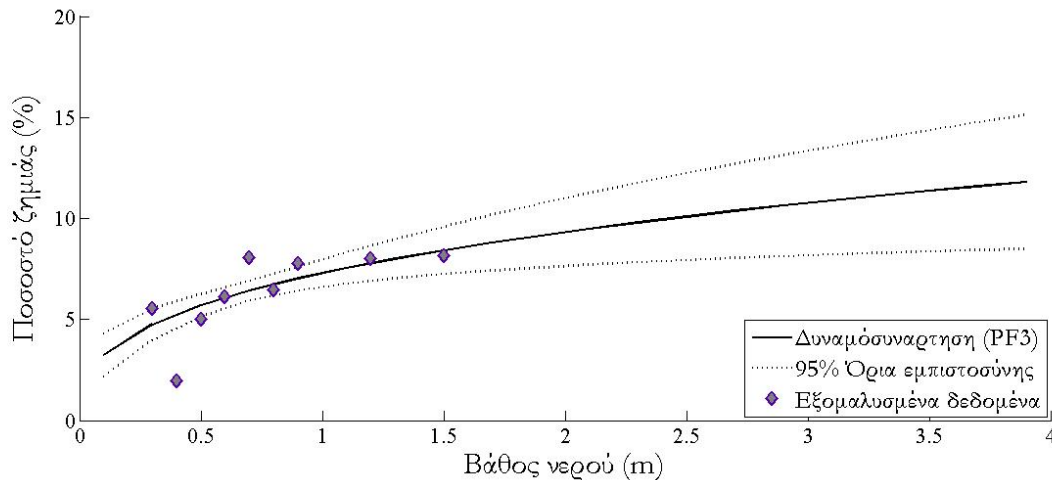
Πίνακας 9-5. Συνάρτηση κατανομής των εξομαλυσμένων δεδομένων

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Συντελεστές παλινδρόμησης		Όρια εμπιστοσύνης 95%	
Δυναμόσυναρτηση (PF3)	$y = ax^b$	a	7.293	a	(6.622, 7.963)
		b	0.354	b	(0.193, 0.515)

Πίνακας 9-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Δυναμόσυναρτηση (PF3)	0.68	0.48	Αποδεκτή

Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της καμπύλης PF3 απεικονίζονται γραφικά τα όρια εμπιστοσύνης της επέκτασης της καμπύλης με επίπεδο σημαντικότητας 95% για το διάστημα τιμών  $x \in [1, 4]$  (βλέπε Εικόνα 9-14).

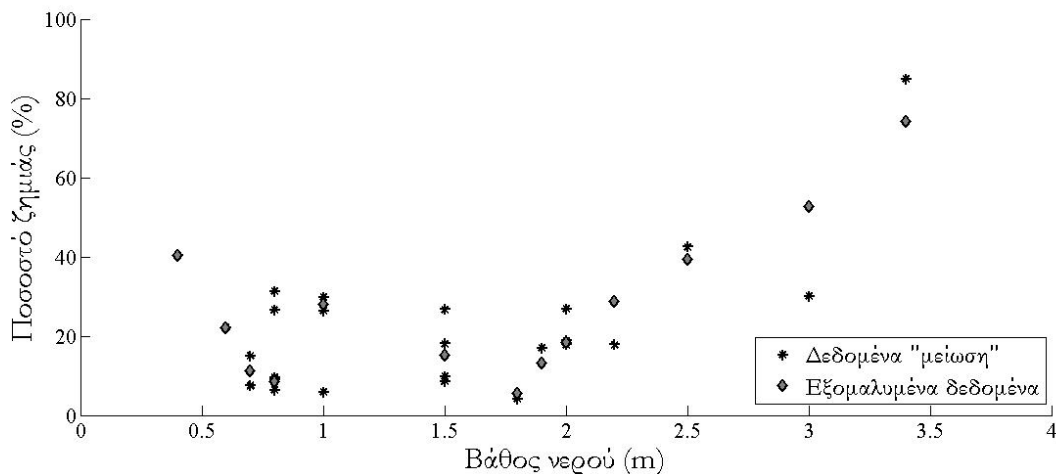


Εικόνα 9-14. Η επέκταση και τα όρια εμπιστοσύνης της καμπύλης για χρήση επαγγελματικού χώρου

### 9.4.3 Χρήση αποθήκης

Εξετάζεται το υποσύνολο δεδομένων της πλημμύρας της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002, το οποίο είναι το μόνο διαθέσιμο για τη συγκεκριμένη χρήση κτηρίου. Παρά την εξαίρεση των εξωδειγματικών τιμών από το υποσύνολο και τη μετατροπή των δεδομένων σε δεδομένα «μείωσης», διαπιστώνεται ότι κανείς από τους διαθέσιμους τύπους της συνάρτησης κατανομής στο εργαλείο προσαρμογής καμπύλης δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσαρμογής στα νέα δεδομένα. Έτσι, εφαρμόζεται η μέθοδος στατιστικής εξομάλυνσης «Robust Lowess»

με βήμα ίσο με το 25% του πλήθους στοιχείων του αρχικού υποσυνόλου. Στην Εικόνα 9-15 απεικονίζεται το υποσύνολο δεδομένων στην αρχική και εξομαλυσμένη του μορφή.



Εικόνα 9-15. Διάγραμμα διασποράς του υποσυνόλου δεδομένων στην αρχική και στην εξομαλυμένη του μορφή

Ο έλεγχος κανονικότητας στο υποσύνολο των εξομαλυσμένων δεδομένων με τη γραφική μέθοδο σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας δείχνει ότι τα εξομαλυσμένα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ωστόσο, βέλτιστα αποτελέσματα προσαρμογής συνάρτησης κατανομής στο υποσύνολο εξομαλυσμένων δεδομένων δίνει το μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης τύπου δυναμοσυνάρτησης, δηλαδή η δυναμοσυνάρτηση PF4. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής της συνάρτησης στα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-7 και στον Πίνακα 9-8.

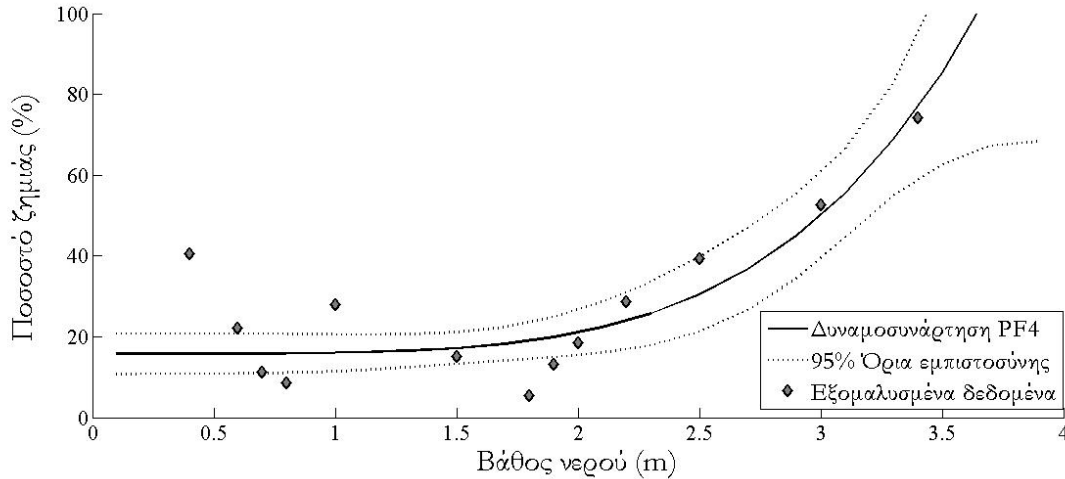
Πίνακας 9-7. Συνάρτηση κατανομής των εξομαλυσμένων δεδομένων

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Συντελεστές παλινδρόμησης	Όρια εμπιστοσύνης 95%
Δυναμόσυναρτηση (PF4)	$y = ax^b + c$	a	0.214
		b	4.618
		c	15.77
		a	(-0.476, 0.904)
		b	(1.927, 7.31)
		c	(10.77, 20.77)

Πίνακας 9-8. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Δυναμόσυναρτηση (PF4)	0.71	0.40	Αποδεκτή

Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της καμπύλης PF4 απεικονίζονται γραφικά τα όρια εμπιστοσύνης της επέκτασης της καμπύλης με επίπεδο σημαντικότητας 95% για το διάστημα τιμών  $x \in [1, 4]$  (βλέπε Εικόνα 9-16).



Εικόνα 9-16. Η επέκταση της καμπύλης και τα όρια εμπιστοσύνης για τη χρήση αποθήγης

#### 9.4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης

Παρατηρήθηκε ότι κανείς από τους διαθέσιμους τύπους στατιστικής συνάρτησης κατανομής του εργαλείου προσαρμογής δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσαρμογής στα αρχικά υποσύνολα δεδομένων και για τα δυο πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης. Οι πιθανοί λόγοι για την αδύναμη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών  $x$  (βάθος νερού) και  $y$  (ποσοστό ζημιάς) των δεδομένων στην αρχική τους μορφή συνοψίζονται παρακάτω:

- Στην πραγματικότητα, εκτός από το βάθος νερού και άλλα μεγέθη πλημμύρας, όπως είναι η ταχύτητα ροής και η διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος, συμβάλλουν στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε περίβλημα ενός κτηρίου λόγω κατάκλυσης και κατά συνέπεια σχετίζονται άμεσα με την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς.
- Η διαφοροποίηση στον τύπο κτηρίου και στα υλικά κατασκευής και η υψομετρική διαφορά στην υπερύψωση του δαπέδου του ισόγειου ενός κτηρίου, έχει ως αποτέλεσμα το διαφορετικό βαθμό ευαλότητας ενός κτηρίου σε ένα πλημμυρικό γεγονός κατάκλυσης.
- Το ανθρώπινο λάθος στην καταγραφή και επιμέτρηση της ζημιάς σε ένα κτήριο κατά τη διάρκεια της επιτόπου αυτοψίας αμέσως μετά το γεγονός δεν είναι αμελητέο.
- Στον προσδιορισμό του ποσοστού ζημιάς εισάγεται πρόσθετη αβεβαιότητα λόγω του τρόπου υπολογισμού της μέσης αντικειμενικής αξίας του χαρακτηριστικού τύπου κτηρίου.

Έτσι εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι στατιστικής εξομάλυνσης «Lowess» και «Robust Lowess», οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την προσαρμογή συναρτήσεων τύπου δυναμοσυνάρτησης στα εξομαλυσμένα δεδομένα. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για κάθε χρήση κτηρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-9.

Πίνακας 9-9. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσαρμογής καμπύλης στα υποσύνολα εξομαλυσμένων δεδομένων

Χρήση κτηρίου	Εξίσωση συνάρτησης	R <sup>2</sup>
Κατοικία	$y = ax^b$	0.78
Επαγγελματικός χώρος	$y = ax^b$	0.68
Αποθήκη	$y = ax^b + c$	0.71

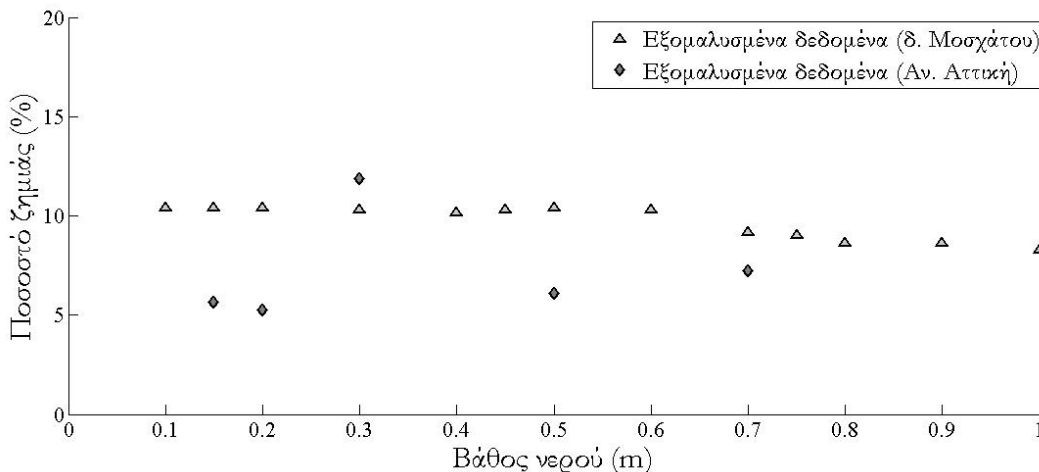
## 9.5 Ανάπτυξη σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς

Οι συναρτήσεις τύπου δυναμοσυνάρτησης που αναπτύχθηκαν για κάθε χρήση κτηρίου έχουν ως αποτέλεσμα την πρόγνωση της πλημμυρικής ζημιάς στο δομημένο περιβάλλον των συγκεκριμένων περιοχών μελέτης στην Αττική. Οι συναρτήσεις αυτές δεν έχουν γενική ισχύ για ευρύτερη εφαρμογή σε δομημένες περιοχές με παρόμοια υδρολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Η ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς προσανατολίζεται στην ανάπτυξη κλιμακωτών συναρτήσεων βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς για κάθε χρήση κτηρίου, οι οποίες δίνουν αδρομερή αποτελέσματα πρόγνωσης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς.

### 9.5.1 Χρήση κατοικίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 9.4.1, η ανάλυση προσαρμογής στατιστικής συνάρτησης σε υποσύνολα δεδομένων για κατοικίες οδηγεί στη διάκριση των παρατηρημένων τιμών βάθους νερού σε δύο διαστήματα,  $x \in [0, 1]$  και  $x \in [1, 2]$ .

Για το διάστημα  $x \in [0, 1]$  επιλέχθηκε να εφαρμοστεί μια σταθερή συνάρτηση (απλοποιημένος τύπος κλιμακωτής συνάρτησης), δεδομένου ότι η δυναμοσυνάρτηση PF1 για αυτό το διάστημα τιμών πρόεκυψε φθίνουσα συνάρτηση. Υπενθυμίζεται ότι εάν μια συνάρτηση  $f: A \rightarrow B$  είναι σταθερή, τότε  $f(x) = f(y)$  για όλα τα  $x$  και  $y$  στο  $A$ . Επομένως, για το διαστήματα τιμών  $x \in [0, 1]$  η στατιστική πρόγνωση του ποσοστού ζημιάς σε κατοικίες είναι μια σταθερή τιμή, η οποία ισούται με τη μέση τιμή του συνόλου των εξομαλυσμένων τιμών ποσοστού ζημιάς που προέκυψαν και από τα δύο αρχεία πλημμύρας. Η Εικόνα 9-17 δείχνει το σύνολο των εξομαλυσμένων τιμών ποσοστού ζημιάς για το διάστημα  $x \in [0, 1]$ .



Εικόνα 9-17. Σύνολο εξομαλυσμένων τιμών ποσοστού ζημιάς σε κατοικίες για το διάστημα  $x \in [0, 1]$

Για το διάστημα τιμών  $x \in [1, 2]$  η ανάπτυξη κλιμακωτής συνάρτησης βασίζεται μόνο στη συνάρτηση PF2 τύπου δυναμοσυνάρτησης, η οποία αναπτύχθηκε από το αρχείο δεδομένων για το Δήμο Μοσχάτου και της οποίας το αποτέλεσμα προσαρμογής κρίθηκε ικανοποιητικό.

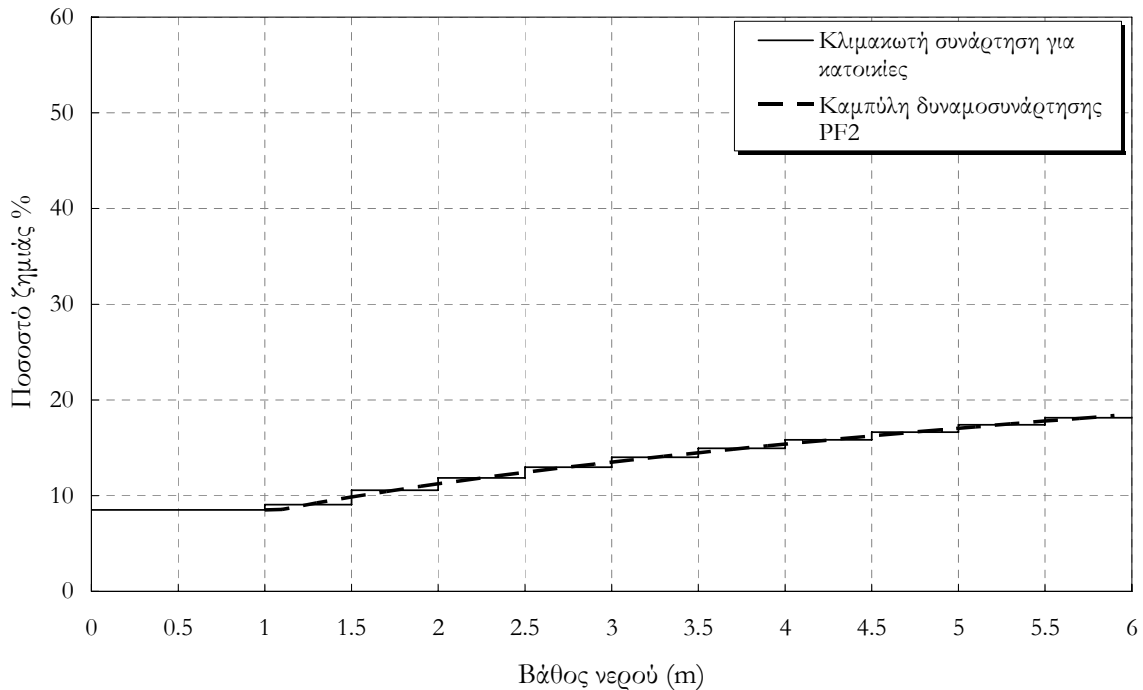
Η ανάπτυξη της κλιμακωτής συνάρτησης υλοποιείται έτσι ώστε η ολοκλήρωση της κλιμακωτής συνάρτησης για το συγκεκριμένο διάστημα τιμών  $x$  να έχει ως αποτέλεσμα εμβαδό προσεγγιστικά ίσο με το εμβαδό ολοκλήρωσης της καμπύλης PF2 για το ίδιο διάστημα τιμών  $x$ . Η ολοκλήρωση της καμπύλης PF2 υπολογίστηκε με την προσεγγιστική μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Simpson, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{6} \left[ f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (9.1)$$

όπου  $f(x)$  = η συνάρτηση της καμπύλης PF2

$a, b$  =συγκεκριμένες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής  $x$

Για το διάστημα τιμών  $x \in [2, 6]$  η ανάπτυξη της κλιμακωτής συνάρτησης βασίζεται στην επέκταση της συνάρτησης PF2 και εφαρμόζεται πάλι η αριθμητική μέθοδος Simpson για τον υπολογισμό του εμβαδού ολοκλήρωσης. Ενώνοντας τα διαστήματα τιμών  $x$ , η κλιμακωτή συνάρτηση που διαμορφώνεται τελικά για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς λόγω κατάκλυσης σε δομημένη περιοχή κατοικίας στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, απεικονίζεται στην Εικόνα 9-18.

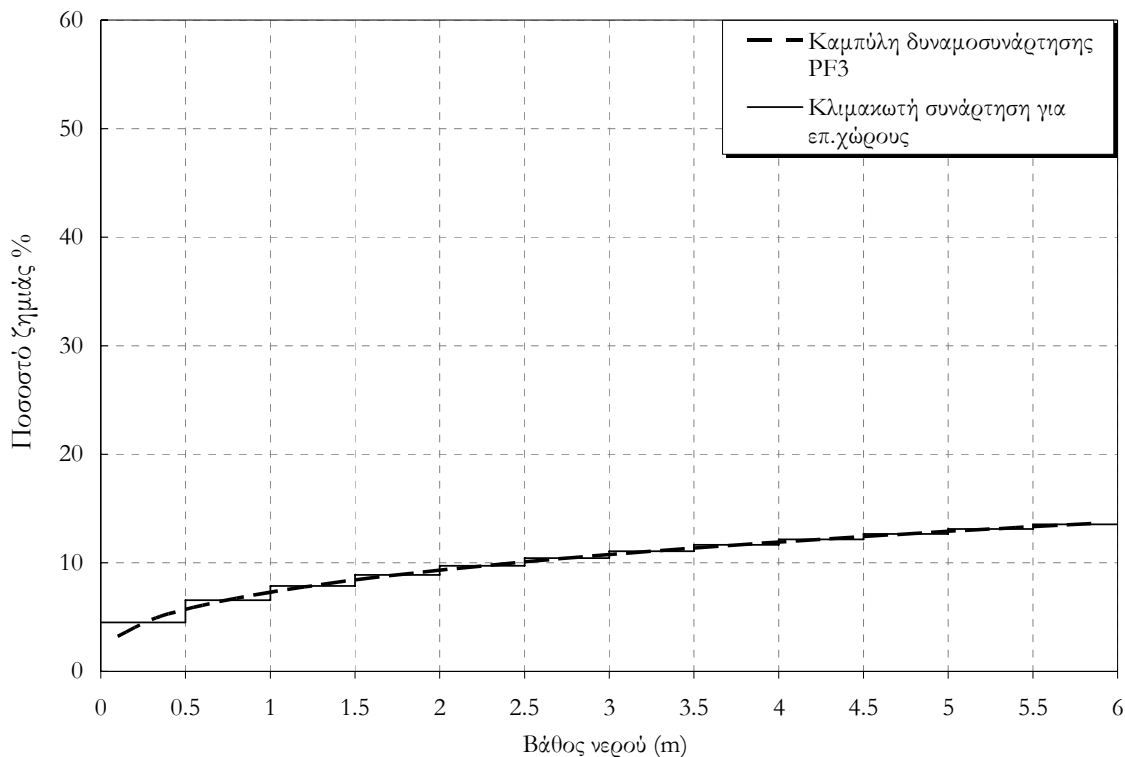


Εικόνα 9-18. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση κατοικίας

### 9.5.2 Χρήση επαγγελματικού χώρου

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς σε κτήρια με χρήση επαγγελματικού χώρου βασίστηκε μόνο στο αρχείο δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου, αφού αντίστοιχα δεδομένα ζημιάς δεν ήταν διαθέσιμα για αυτή την χρήση κτηρίου στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Επομένως η ανάπτυξη κλιμακωτής συνάρτησης για χρήση επαγγελματικού χώρου βασίστηκε στη συνάρτηση PF3 τύπου δυναμοσυνάρτησης που προσαρμόστηκε βέλτιστα στο αρχείο δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου.

Η ανάπτυξη της κλιμακωτής συνάρτησης υλοποιείται έτσι ώστε η ολοκλήρωση της κλιμακωτής συνάρτησης για το ορισμένο διάστημα τιμών  $x$  να έχει ως αποτέλεσμα εμβαδό προσεγγιστικά ίσο με το εμβαδό ολοκλήρωσης της καμπύλης PF3 για το ίδιο διάστημα τιμών  $x$ . Η ολοκλήρωση της καμπύλης PF3 υπολογίζεται με την προσεγγιστική μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Simpson και η κλιμακωτή συνάρτηση που προκύπτει για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς λόγω κατάκλυσης σε δομημένη περιοχή χρήσης επαγγελματικού χώρου στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, απεικονίζεται στην Εικόνα 9-19.



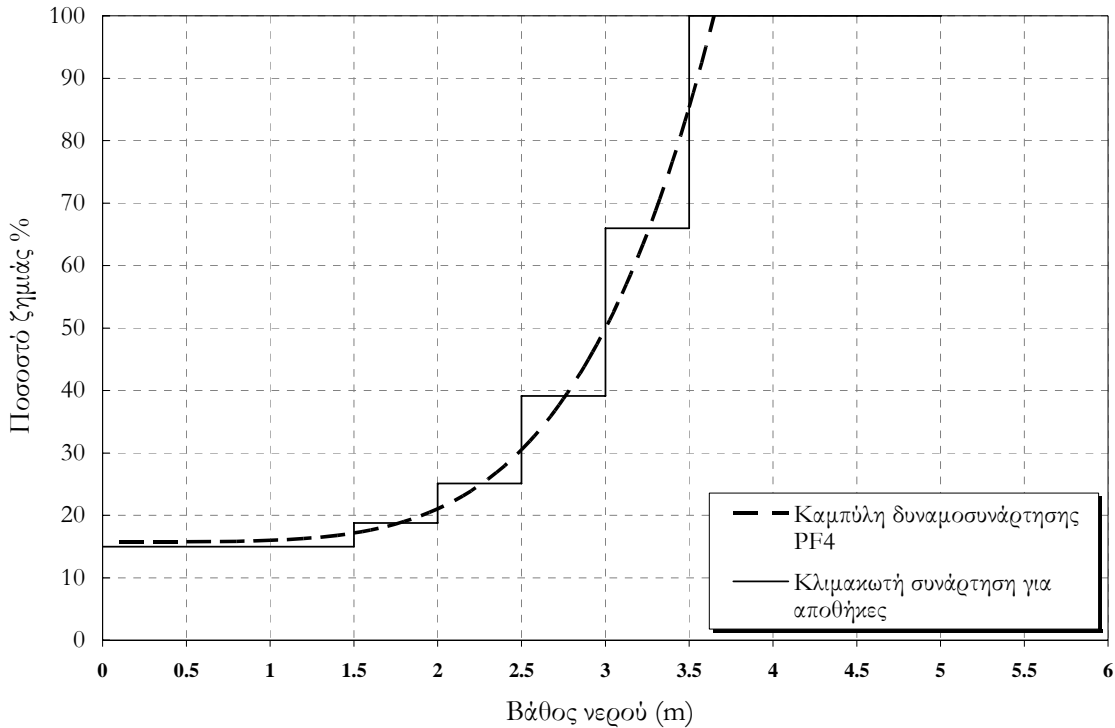
Εικόνα 9-19. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση επαγγελματικού χώρου

### 9.5.3 Χρήση αποθήκης

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς σε κτήρια με χρήση αποθήκης βασίστηκε μόνο στο αρχείο δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου, αφού αντίστοιχα δεδομένα ζημιάς για αυτή την χρήση κτηρίου δεν ήταν διαθέσιμα στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Επομένως, η ανάπτυξη κλιμακωτής συνάρτησης για χρήση αποθήκης βασίζεται στη συνάρτηση PF4 τύπου δυναμοσυνάρτησης που προσαρμόστηκε βέλτιστα στο αρχείο δεδομένων ζημιάς για το Δήμο Μοσχάτου.



Η ολοκλήρωση της καμπύλης PF4 υπολογίζεται με την προσεγγιστική μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Simpson και η κλιμακωτή συνάρτηση που προκύπτει για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς λόγω κατάκλυσης σε δομημένη περιοχή χρήσης αποθήκης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, απεικονίζεται στην Εικόνα 9-20.



Εικόνα 9-20. Κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού-ποσοστού ζημιάς για χρήση αποθήκης

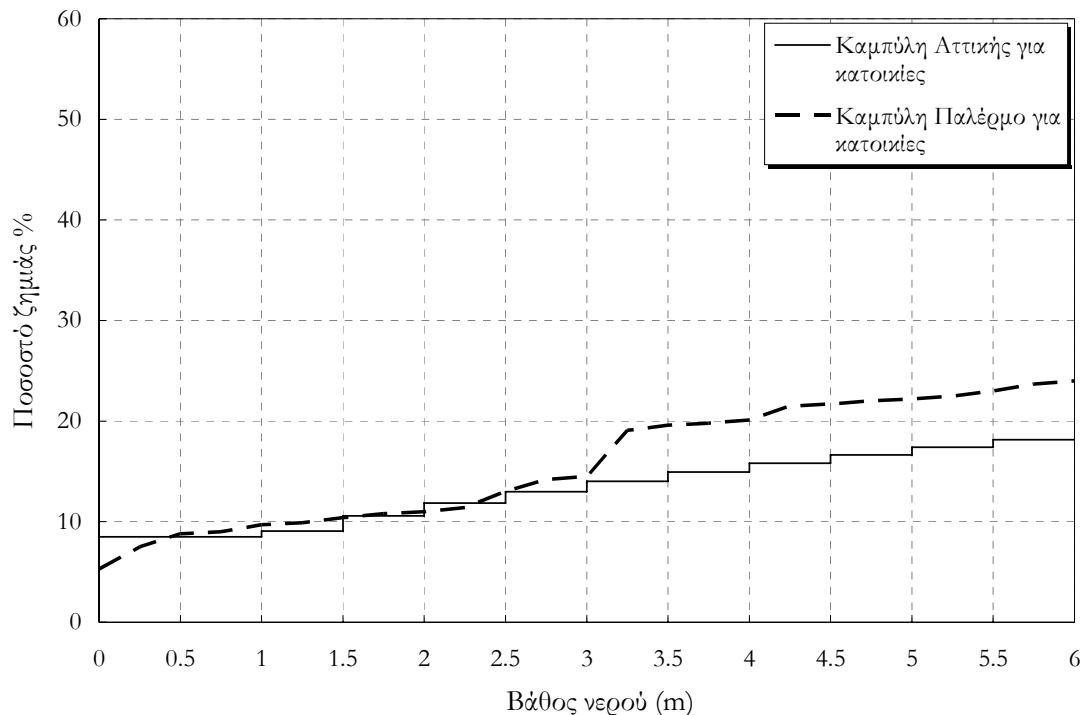
## 9.6 Σύγκριση σχετικής καμπύλης με αντίστοιχες από τη διεθνή βιβλιογραφία

Οι κλιμακωτές συναρτήσεις βάθους νερού – ποσοστού ζημιάς που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής συγκρίνονται στο υποκεφάλαιο αυτό με αντίστοιχες σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί να διερευνήσει το βαθμό στον οποίο επηρεάζουν τα τοπικά χαρακτηριστικά κατασκευής πλημμυρόπληκτων κτηρίων την εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε επίπεδο μεσοκλίμακας. Οι σχετικές καμπύλες που επιλέχθηκαν, έχουν επίσης προκύψει από ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλίμακα για τις ίδιες χρήσεις κτηρίου. Το υποκεφάλαιο αυτό αναφέρεται σε δύο περιπτώσεις σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για χρήση κατοικίας που διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς το υλικό κατασκευής των πληγέντων κτηρίων, το μέγεθος της λεκάνης απορροής των πληγεισών περιοχών και κυρίως τον τρόπο ανάπτυξης της καμπύλης, εάν δηλαδή πρόκειται για συνθετική ή εμπειρική καμπύλη.

Η πρώτη περίπτωση σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς που εξετάζεται από τη διεθνή βιβλιογραφία, είναι η εμπειρική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς που αναπτύχθηκε για την πόλη Παλέρμο στη Σικελία μετά από έρευνα πεδίου [Oliveri and Santoro 2000]. Το πλημμυρικό γεγονός που προκάλεσε την άμεση ζημιά οφείλεται σε υπερχειλίση ρέματος, δηλαδή πρόκειται για γεγονός κατάκλυσης. Η τοπική έρευνα οδήγησε

στη διαμόρφωση χαρακτηριστικών τύπων κατοικίας για την πόλη Παλέρμο, και συγκεκριμένα διακρίθηκαν δύο τύποι κατοικίας, με δύο και τέσσερις ορόφους αντίστοιχα, για καθένα από τους οποίους εκτιμήθηκε η μέση αντικειμενική αξία ακίνητου. Για λόγους σύγκρισης, λαμβάνεται υπόψη μόνο ο τύπος κατοικίας με τους τέσσερις ορόφους καθώς προσεγγίζει περισσότερο το μέσο τύπο κατοικίας στην Αττική. Γενικά στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς λήφθηκε υπόψη η ζημιά μόνο στο περίβλημα του κτηρίου και δεν συμπεριλήφθηκε η ζημιά στον κινητό εξοπλισμό κτηρίου. Το ποσοστό ζημιάς υπολογίστηκε ως ποσοστό της ολικής αξίας ενός πλημμυρόπληκτου κτηρίου, δηλαδή εκφράστηκε με οικονομικούς όρους. Τέλος το βάθος νερού εκτιμήθηκε με επίπεδο αναφοράς 0.25 m από την επιφάνεια εδάφους, δηλαδή ουσιαστικά θεωρήθηκε το βάθος νερού που καταγράφηκε στο εσωτερικό ενός κτηρίου με επίπεδο αναφοράς το δάπεδο του ισόγειου.

Από την παραπάνω περιγραφή, προκύπτει ότι η προσέγγιση για την ανάπτυξη σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης εμφανίζει πολλά κοινά στοιχεία με την αντίστοιχη στις περιοχές μελέτης στην Αττική. Η υπέρθεση της σχετικής καμπύλης που αναπτύχθηκε για χρήση κατοικίας στην πόλη του Παλέρμο, στην σχετική καμπύλη που αναπτύχθηκε για χρήση κατοικίας στην Αττική, απεικονίζεται στην Εικόνα 9-21.



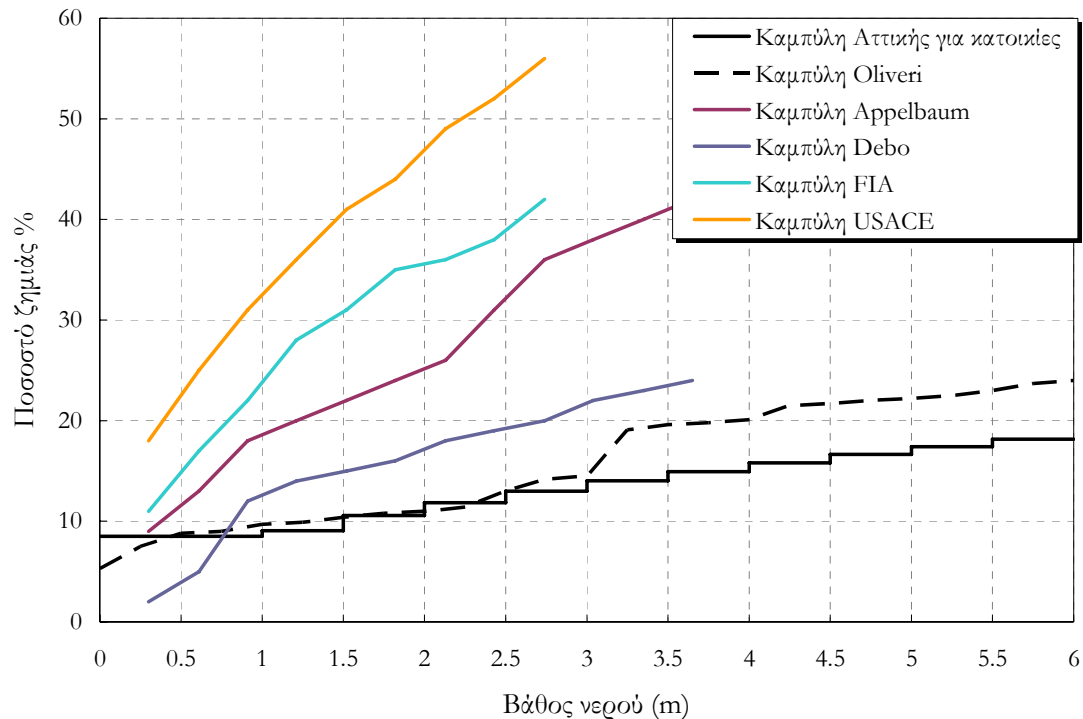
Εικόνα 9-21. Σύγκριση καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς για χρήση κατοικίας στο Παλέρμο και στην Αττική

Παρατηρείται ότι η πρόγνωση μιας τιμής ποσοστού ζημιάς από τις σχετικές καμπύλες δίνει γενικά συγκρίσιμα αποτελέσματα. Για μικρές τιμές του βάθους νερού ( $x < 3$  m) που αντιστοιχούν προσεγγιστικά μέχρι την οροφή του ισόγειου μιας κατοικίας, οι τιμές του ποσοστού ζημιάς σχεδόν συμπίπτουν, ενώ για  $x > 3$  m, δηλαδή για αλλαγή ορόφου από ισόγειο σε πρώτο, η διαφορά στην τιμή του ποσοστού ζημιάς είναι περίπου σταθερή και ίση με 5%. Η σύγκλιση των δύο σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς σε τόσο ικανοποιητικό βαθμό θεωρούμε ότι οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- Οι τύποι κατοικίας συμπίπτουν (πολυώροφα χωρίς υπόγειο)

- Το υλικό κατασκευής κατοικίας θεωρείται κατά παραδοχή για την ανάλυση ζημιάς ότι είναι το ίδιο, δηλαδή κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα
- Η μεθοδολογία υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς βασίστηκε σε διερεύνηση των τοπικών χαρακτηριστικών του δομημένου περιβάλλοντος και κατά συνέπεια περιλαμβάνει τη διαμόρφωση χαρακτηριστικών τύπων κτηρίου
- Οι περιοχές μελέτης αναφέρονται σε αστικό περιβάλλον
- Οι περιοχές μελέτης ανήκουν σε σχετικά μικρές λεκάνες απορροής υπό παρόμοιες κλιματικές συνθήκες και επομένως εμφανίζουν παρόμοια ένταση πλημμυρικά γεγονότα

Η δεύτερη περίπτωση σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς από τη διεθνή βιβλιογραφία που εξετάζεται είναι οι συνθετικές καμπύλες που αναπτύχθηκαν για χαρακτηριστικούς τύπους κατοικίας από το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ (USACE) στις δεκαετίες του 1970 και του 1980 [Federal Insurance Administration 1970, USACE 1980, Appelbaum 1985, Debo 1982]. Οι καμπύλες αυτές δεν αναπτύχθηκαν μετά από τοπική έρευνα πεδίου σε συγκεκριμένη περιοχή, αλλά προέκυψαν από γενικευμένη συνθετική ανάλυση σε περιφερειακό επίπεδο με τη μορφή γενικών κατευθυντήριων οδηγιών, έτσι ώστε να έχουν γενική ισχύ εφαρμογής σε όλες τις κοινότητες που ανήκουν στα διοικητικά όρια της κάθε περιφέρειας. Επίσης, οι καμπύλες αυτές αποσκοπούν στην εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στο σύνολο κτηρίου, δηλαδή στο περιβλημά και στον κινητό εξοπλισμό του κτηρίου. Ο προσδιορισμός της αρχικής αξίας κτηρίου βασίστηκε στην εμπορική αξία του ακινήτου. Τέλος, το επικρατέστερο υλικό κατασκευής κατοικίας στις ΗΠΑ είναι το ξύλο. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές στα δεδομένα ζημιάς και στη μεθοδολογία ανάπτυξης των σχετικών καμπυλών που αναπτύχθηκαν για χρήση κατοικίας στις περιφέρειες των ΗΠΑ και αντίστοιχα στην Αττική. Η Εικόνα 9-22 απεικονίζει γραφικά τις μεγάλες αποκλίσεις των τιμών του ποσοστού ζημιάς για τις ίδιες τιμές βάθους νερού που προέρχονται από τις καμπύλες αυτές.



Εικόνα 9-22. Σύγκριση σχετικών καμπυλών βάθους νερού-ζημιάς για χρήση κατοικίας

Η σύγκριση σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για χρήση επαγγελματικού χώρου από τη διεθνή βιβλιογραφία με την αντίστοιχη που αναπτύχθηκε για την Αττική δεν είναι εφικτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαθέσιμες καμπύλες στη διεθνή βιβλιογραφία εκτιμούν την άμεση ζημιά στο σύνολο ενός κτηρίου, η οποία ειδικά στην περίπτωση ενός επαγγελματικού χώρου λόγω κινητού εξοπλισμού, διαφέρει σημαντικά από κτήριο σε κτήριο. Συνεπώς, σύγκριση με την αντίστοιχη σχετική καμπύλη που αναπτύχθηκε στην Αττική και αναφέρεται σε άμεση ζημιά μόνο στο περιβλημα ενός κτηρίου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Η σύγκριση σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για χρήση αποθήκης από τη διεθνή βιβλιογραφία με την αντίστοιχη που αναπτύχθηκε για την Αττική δεν είναι εφικτή, διότι οι διαθέσιμες καμπύλες στη βιβλιογραφία αναφέρονται σε απόλυτες τιμές ζημιάς. Τέλος, η ανεπτυγμένη καμπύλη της Αττικής για αποθήκες προσεγγίζει τιμές ποσοστού ζημιάς που στη διεθνή βιβλιογραφία [Smith 1981] δίνουν συνήθως σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς για βιομηχανική χρήση.

## 9.7 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει λεπτομερώς τη στατιστική ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς που υλοποιήθηκε για την εμπειρική ανάπτυξη σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για επιλεγμένες χρήσεις κτηρίου στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής.

Η στατιστική ανάλυση βασίστηκε σε δύο αρχεία δεδομένων ζημιάς και πλημμύρας που προέρχονται από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής και συγκεκριμένα στο Δήμο Μοσχάτου (πλημμύρα της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 2002) και στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής (πλημμύρα της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005). Το επίπεδο της ανάλυσης προσδιορίστηκε σε μεσοκλίμακα με στοιχεία μικροκλίμακας και μακροκλίμακας. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, διαμορφώθηκαν χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου ανά χρήση και τύπο κτηρίου, οι οποίοι είναι αναγκαίοι για την εκτίμηση της μέσης αντικειμενικής αξίας ακίνητου σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο. Το ποσοστό ζημιάς προσδιορίστηκε ως το κλάσμα του ολικού κόστους για την αποκατάσταση της καταγεγραμμένης άμεσης ζημιάς σε ένα κτήριο προς τη μέση αντικειμενική αξία ακίνητου του χαρακτηριστικού τύπου στον οποίο ανήκει το κτήριο.

## Κεφάλαιο 10

# Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση στην Ανατολική Αττική

Στο κεφάλαιο αυτό υλοποιείται η εφαρμογή μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με βάση τη μέθοδο της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με σκοπό την εκτίμηση της αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον υπό σενάρια πλημμύρας. Η εμπειρική καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς για την περιοχή μελέτης προκύπτει ως έμμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής. Η μεθοδολογία της εφαρμογής αυτής έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 7.5.

Στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης εξετάζεται η κατηγορία πλημμύρας με κατάκλυση λόγω υπερχείλισης ρέματος και κατά συνέπεια το πλημμυρικό μέγεθος που παίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον θεωρείται ότι είναι το βάθος νερού. Το πλημμυρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι αποτέλεσμα μονοδιάστατης (1D) προσομοίωσης πλημμύρας για την οποία χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS και έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή περιβάλλουσας βάθους νερού. Υπενθυμίζεται ότι ο συνδυασμός μοντέλου πλημμύρας μονοδιάστατης (1D) προσομοίωσης και μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας έχει ως αποτέλεσμα το ιδανικό ταίριασμα του βαθμού πολυπλοκότητας των μοντέλων (βλέπε Εικόνα 7.2). Επίσης, η μέθοδος σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς ανά χρήση δομημένου περιβάλλοντος θεωρείται η κατάλληλη μέθοδος για την αποτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε μια ραγδαία αναπτυσσόμενη περιαστική περιοχή στην Ανατολική Αττική, η οποία ανήκει στην λεκάνη απορροής του ρέματος Ερασίνου. Πρόκειται για μια ζώνη πλάτους περίπου 2 km και έκτασης 45 km<sup>2</sup>, που απλώνεται κατά μήκος των ρεμάτων Αγ. Γεωργίου και Ερασίνου, τα οποία συμβάλλουν στο κύριο ρέμα του Ερασίνου. Η περιοχή μελέτης έχει υποστεί επανειλημμένα από πλημμυρικά γεγονότα στο πρόσφατο παρελθόν, ένα από τα οποία αποτελεί και η πλημμύρα της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου του 2005 που προκάλεσε άμεση πλημμυρική ζημιά σε δομημένο περιβάλλον και αναλύθηκε λεπτομερώς στο κε-

φάλαιο 9. Ένα σημαντικό μέρος της πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια στην περιοχή οφείλεται στο ανεπαρκές δίκτυο φυσικών αποδεκτών και αποχέτευσης όμβριων υδάτων, δεδομένου ότι η ραγδαία αστική ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής δε συνοδεύτηκε από κανένα πρόσθετο μέτρο αποστράγγισης των όμβριων υδάτων. Κτήρια κτισμένα ακριβώς δίπλα ή ακόμη και μέσα στην κοίτη εποχιακών ρεμάτων της περιοχής είναι πιθανό να υποστούν σημαντική άμεση ζημιά από πλημμύρα εξαιτίας των υψηλών αιχμών πλημμυρικής παροχής που μπορεί να εμφανίσουν ξαφνικά τα ρέματα αυτά.

Οι σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς που απαιτούνται σύμφωνα με τη μεθοδολογία εφαρμογής του μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ (βλέπε Εικόνα 7.10) είναι οι εμπειρικές καμπύλες που αναπτύχθηκαν για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής στο κεφάλαιο 9 ανά χρήση δομημένου περιβάλλοντος.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε επτά υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 10.1 περιγράφει γενικά την περιοχή μελέτης, δηλαδή τη γεωγραφική θέση, τα τοπογραφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και βασικές κοινωνικοοικονομικές παρατηρήσεις. Στο υποκεφάλαιο 10.2 αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΨΜΕ και του ψηφιακού χάρτη χρήσεων γης που χρησιμοποιήθηκαν ως χωρικά δεδομένα στην εφαρμογή αυτή. Στο υποκεφάλαιο 10.3 δίνονται συνοπτικά οι υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση της περιβάλλουσας βάθους νερού υπό επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας. Το υποκεφάλαιο 10.4 αναφέρεται στα οικονομικά δεδομένα της περιοχής μελέτης που συντελούν στην εκτίμηση της ολικής αξίας του δομημένου περιβάλλοντος ανά χρήση δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση. Στο υποκεφάλαιο 10.5 με βάση τα παραπάνω δεδομένα και χρησιμοποιώντας το υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς δίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής του εργαλείου υπό επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 10.6 η ανάλυση προχωρά στην ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς και στο υποκεφάλαιο 10.7 συγκεντρώνονται τα ανακεφαλαιωτικά σχόλια αυτού του κεφαλαίου.

## 10.1 Περιοχή μελέτης

Το ρέμα Ερασίνου αποτελεί τον αποδέκτη της απορροής της κεντρικής περιοχής των Μεσογείων (ευρύτερη περιοχή Παιανίας, Κορωπίου, νότια ζώνη Σπάτων) και της νότιας περιοχής των Μεσογείων (κοινότητες Μαρκόπουλο, Κουβαράς). Έχει σημαντική λεκάνη απορροής (204 km<sup>2</sup>) και οριοθετείται από τον υδροκρίτη του ρέματος Ραφήνας (βόρεια), την οροσειρά του Υμηττού (δυτικά) και τους αυχένες μεταξύ των υψωμάτων Ψηλόβραχος, Κορυφή, Μερέντα, Κερατοβούνι, Πάνειο Όρος, Στρογγυλοπούλα, Ζυγός και Κόντρα (νότια). Συγκεντρώνει την απορροή τριών βασικών ρεμάτων: του ρέματος Αγίου Γεωργίου, του ρέματος Μαρκοπούλου και του ίδιου του Ερασίνου, που είναι και ο τελικός αποδέκτης. Η λεκάνη απορροής του Ερασίνου διακρίνεται σε τρεις ζώνες τόσο μορφολογικά όσο και από άποψη χρήσεων γης [Μπεσσαντών και Παπαλεξόπουλος 2004]:

(α) Στο ανάντη τμήμα της λεκάνης υπάρχουν έντονες πτυχώσεις και μισγάγγειες στις κλιτύες του Υμηττού και έντονες κατά μήκος κλίσεις. Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις εδώ είναι προς το παρόν περιορισμένες.

(β) Το μεσαίο τμήμα της λεκάνης περιλαμβάνει τους κώνους αποθέσεων των φερτών των ανάντη χειμάρρων από τις εύφορες καλλιεργήσιμες περιοχές του κάμπου των Μεσογείων. Στην περιοχή αυτή η κύρια χρήση γης έχει τροποποιηθεί ραγδαία από γεωργική σε οικιστική και στη συνέχεια βιοτεχνική, βιομηχανική και εμπορική. Χαρακτηριστικό της μεσαιας ζώνης είναι η ολική έλλειψη μισοαγγείων, όχι μόνο σήμερα, αλλά ακόμη και στο πρόσφατο παρελθόν (50 χρόνια πριν), όταν οι οικιστικές περιμέτροι ήταν πολύ περιορισμένες. Η μεταβολή στις χρήσεις γης περιορίζει συνεχώς τη διήθηση και η επιφανειακή απορροή μετατρέπεται πλέ-

ον σε εκτεταμένο πλημμυρικό φαινόμενο.

(γ) Τέλος, στο τρίτο, κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται πτυχώσεις εδάφους με φυσικές βαθιές γραμμές και μικρές κοιλάδες και επανεμφανίζεται η κοίτη του ρ. Ερασίνου, η οποία δέχεται πρώτα τις απορροές από τη λεκάνη του ρέματος Μαρκιπούλου και στη συνέχεια τις σημαντικότερες απορροές από το ρέμα Αγίου Γεωργίου και τα συμβάλλοντα σε αυτό ρέματα Μαλέξη-Αγίας Άννας, Καλυβίων και Κουβαρά.

Σημειώνεται ότι η συνολική λεκάνη απορροής του ρέματος Αγίου Γεωργίου, συμπεριλαμβανομένων και των λεκανών απορροής των ρεμάτων Καλυβίων και Κουβαρά είναι της τάξης των 67 km<sup>2</sup>. Η κοίτη είναι διαμορφωμένη σε μεγάλο μήκος και υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε σημαντικό μήκος του ρέματος. Σε μήκος 4,5 km περίπου ανάντη της συμβολής με το ρέμα Ερασίνου η κοίτη εκφυλίζεται. Σ' αυτό συμβάλουν οι εκτεταμένες καλλιέργειες στις ανάντη ζώνες. Η συμβολή του ρέματος Αγ. Γεωργίου στο ρέμα του Ερασίνου πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση (2 km περίπου) από την εκβολή του ρέματος Ερασίνου στον όρμο Βραυρώνας.

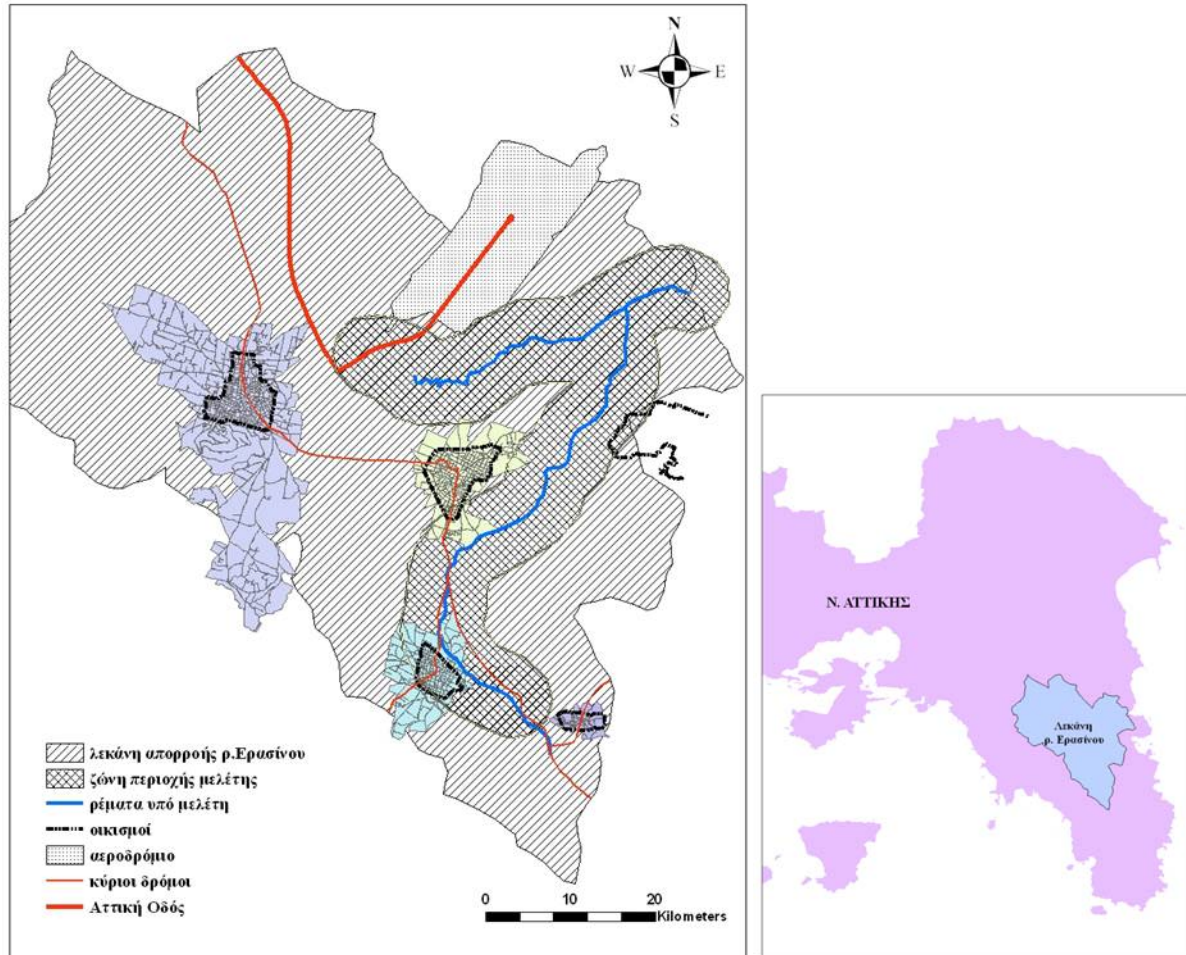
Στο ρέμα Μαρκιπούλου διαρρέει σημαντική λεκάνη πλανώμενης απορροής στα νότια του ρέματος Αγ. Κων/νου ελλείψει υδατορευμάτων της περιοχής λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Το ρέμα Μαρκιπούλου κατάντη του Νειροταφείου Μαρκιπούλου μέχρι το δρόμο Μαρκιπούλου – Αρτέμιδος έχει πλήρως εξαφανισθεί από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, ενώ μέχρι την εκβολή του στο ρέμα του Ερασίνου (αμέσως ανάντη του πύργου της Βραυρώνας), έχει σχεδόν σε όλο το μήκος αφανή κοίτη που απαντάται σε ίχνη. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, το ρέμα Μαρκιπούλου λήφθηκε υπόψη μόνο στους υδρολογικούς υπολογισμούς και δεν συμπεριλήφθηκε στους υδραυλικούς υπολογισμούς.

Η αποχέτευση των όμβριων υδάτων του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών γίνεται με τελικό αποδέκτη το κατάντη τμήμα του βορείου κλάδου του ρέματος Ερασίνου. Τέλος, στην εκβολή του Ερασίνου, βρίσκεται ένας σημαντικός υδροβιότοπος (ενταγμένος στο πρόγραμμα Natura 2000) και εκτεταμένη περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Ιερός Ναός Βραυρωνίας Αρτέμιδος). Η εκβολή είναι ανεπαρκής και δεν έχουν κατασκευαστεί τα απαιτούμενα τεχνικά έργα για τη διοχέτευση της πλημμυρικής παροχής στη θάλασσα, είτε άμεσα, είτε μέσω του υδροβιότοπου.

Σταδιακά με την εξέλιξη της υλοποίησης των μεγάλων συγκοινωνιακών και άλλων έργων, όπως είναι το Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών, η Αττική Οδός, η Λεωφόρος Βάρης-Κορωπίου, η Λεωφόρος Παιανίας-Μαρκιπούλου και το Ολυμπιακό Ιππικό Κέντρο, έγιναν παράλληλα ραγδαίες και ανεξέλεγκτες μεταβολές στις χρήσεις γης που μετέβαλαν προς το δυσμενέστερο τις συνθήκες απορροής στον Ερασίνο. Παρατηρήθηκε το φαινόμενο της καταπάτησης εκτάσεων στις κοίτες των ρεμάτων για γεωργική χρήση, ακόμα και κατασκευές κτισμάτων στην ευρύτερη ζώνη της κοίτης του ρέματος Ερασίνου. Επιπλέον η χρονική πίεση της υλοποίησης των υδραυλικών έργων πριν τη κατασκευή των συγκοινωνιακών έργων, οδήγησε στη λύση της συγκέντρωσης και παροχέτευσης της απορροής στη φυσική κοίτη του ρέματος Ερασίνου χωρίς συμπληρωματικές απαλλοτριώσεις. Έτσι, τα συγκοινωνιακά έργα που κατασκευάστηκαν και η ραγδαία αλλαγή χρήσεων γης επιδείνωσαν σημαντικά τα προβλήματα κατάκλυσης κατάντη της συμβολής του ρέματος Αγ. Γεωργίου, στην εκβολή του ρέματος Ερασίνο.

Με βάση τα παραπάνω κοινωνικοοικονομικά και μορφολογικά δεδομένα της λεκάνης απορροής του ρέματος Ερασίνο, η περιοχή μελέτης οριοθετήθηκε από μια ζώνη πλάτους 2 km κατά μήκος των ρεμάτων του Αγ. Γεωργίου και Ερασίνο. Τα ρέματα αυτά εμφανίζουν διαμορφωμένη κοίτη και συμμετέχουν στους υδραυλικούς υπολογισμούς. Στη ζώνη αυτή, έκτασης ίσης περίπου με 45 km<sup>2</sup>, εντοπίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα πλανώμενης απορροής και παράλληλα συγκέντρωσης αστικού ιστού και γι' αυτό η συγκεκριμένη

περιοχή παρουσιάζει ιστορικό καταγραφής άμεσης πλευρικής ζημιάς σε κτήρια. Η Εικόνα 10-1 δείχνει τη θέση της περιοχής μελέτης στη λεκάνη απορροής, τα υπό μελέτη ρέματα του Αγ. Γεωργίου και Ερασίνου, τις θέσεις των οικισμών και τα πιο σημαντικά συγκοινωνιακά έργα που αλλοίωσαν την απορροή της λεκάνης προς τη φυσική κοίτη του ρέματος Ερασίνου.



Εικόνα 10-1. Περιοχή μελέτης και λεκάνη απορροής του ρέματος Ερασίνου στην Ανατολική Αττική

### 10.1.1 Δομημένο περιβάλλον

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 10-1, το δομημένο περιβάλλον στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνει κυρίως περιοχές κατοικίας εντός των οικισμών και ακολουθεί πολύ περιορισμένα η εμφάνιση βιοτεχνικών κτηρίων κατά μήκος κύριων οδικών αρτηριών εκτός των ορίων των οικισμών. Με άλλα λόγια, πρόκειται κυρίως για περαστικό περιβάλλον, στο οποίο τυπολογικά οι κατοικίες ανήκουν στην κατηγορία της εξοχικής κατοικίας, με χρήση κύριας κατοικίας. Ανάλογα με την χωροθέτησή τους, εντός ή εκτός ορίων οικισμού, αυξομειώνεται η επιφάνεια του περιβάλλοντα χώρου με προφανή πύκνωση της δόμησης εντός οικισμού. Οι κατοικίες αποτελούν συνήθως συμβατικές κατασκευές, δηλαδή το περίβλημα κτηρίου αποτελείται από οπλισμένο σκυροδέματος και πλήρωση οπτοπλινθοδομής. Σε ό,τι αφορά τα βιοτεχνικά κτήρια, αυτά εμφανίζονται εκτός οικισμού και στην πλειοψηφία τους πρόκειται για σιλό, ελαφριές δηλαδή κατασκευές με μεταλλικό σκελετό και πλήρωση από πινέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για αποθήκευση αγαθών (π.χ. αγροτικά προϊόντα, βιοτεχνικά υλικά κτλ). Η περιγραφή του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση οδηγεί, επομένως, σε δύο



διακριτές χρήσεις: της χρήσης κατοικίας και της βιοτεχνικής χρήσης.

## 10.2 Χωρικά Δεδομένα

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης αποτελούν τα απαιτούμενα χωρικά δεδομένα για τη εφαρμογή του μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας σε περιβάλλον ΓΣΠ. Η πιο πρόσφατη διαθέσιμη πληροφορία για την τοπογραφία και τις υφιστάμενες χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης συλλέχθηκε και αναλύθηκε το 2007 από τα Εργαστήρια Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «INTERREG IIC-Sud Initiative, Regional Operation Framework of NOE Programme, Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites» με συντονιστή του προγράμματος τον καθηγητή κ. Γ. Τσακίρη [Tsakiris et al. 2007].

### 10.2.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ)

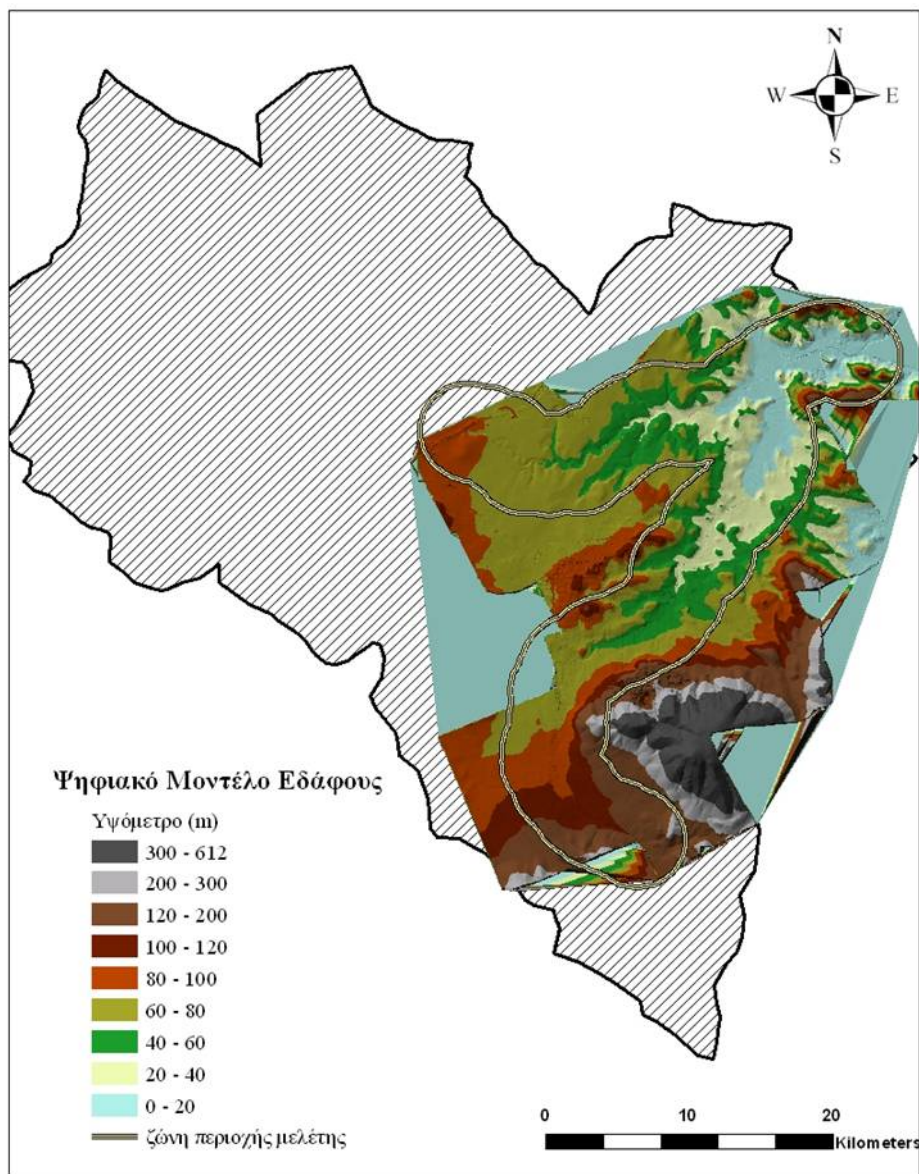
Το θεωρητικό υπόβαθρο παραγωγής ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ) περιγράφεται στο εδάφιο 6.3.2. Για την παραγωγή του συγκεκριμένου ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμες Α/Φ της γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας περίπου 1:17 000 και φωτοληψία το Σεπτέμβριο του 2005. Οι Α/Φ είναι πρόσφατης λήψης και κατά συνέπεια θεωρείται ότι η εξαγωγή πληροφορίας από αυτές ανταποκρίνεται στην υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης. Χρησιμοποιήθηκαν 25 Α/Φ σε 4 λωρίδες πτήσης των 4, 9, 7 και 5 Α/Φ αντίστοιχα, με περίπου 60 % κατά μήκος και 40 % κατά πλάτος επικαλύψεις. Από τις 25 Α/Φ προέκυψαν 21 στερεοζεύγη με κατά μήκος επικάλυψη 40 %. Η μετατροπή των Α/Φ σε ψηφιακή εικόνα έγινε με τη σάρωση με ανάλυση 1200 dpi σε ειδικό φωτογραμμετρικό σαρωτή. Με την επίλυση του αεροτριγωνισμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των δεσμών προσδιορίστηκε ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων με τις παρακάτω ακρίβειες:

(α) Οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $x$ :  $RMSE=0.025$  m,  $max=0.11$  m

(β) Οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $y$ :  $RMSE=0.025$  m,  $max=0.18$  m

(γ) Υψομετρική ακρίβεια:  $RMSE=0.06$  m,  $max=0.31$  m

Οι ακρίβειες αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα ικανοποιητικές για προσομοίωση πλημμύρας, καθώς η μέγιστη ακρίβεια για κλίμακα προϊόντος 1:5 000 είναι το 1 m. Το βήμα κανονικού καννάβου ορίστηκε τελικά στα 25 m για να εξασφαλιστεί η λεπτομερέστερη δυνατή απόδοση του ανάγλυφου της περιοχής στο ΨΜΕ. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους απεικονίζεται στην Εικόνα 10-2.

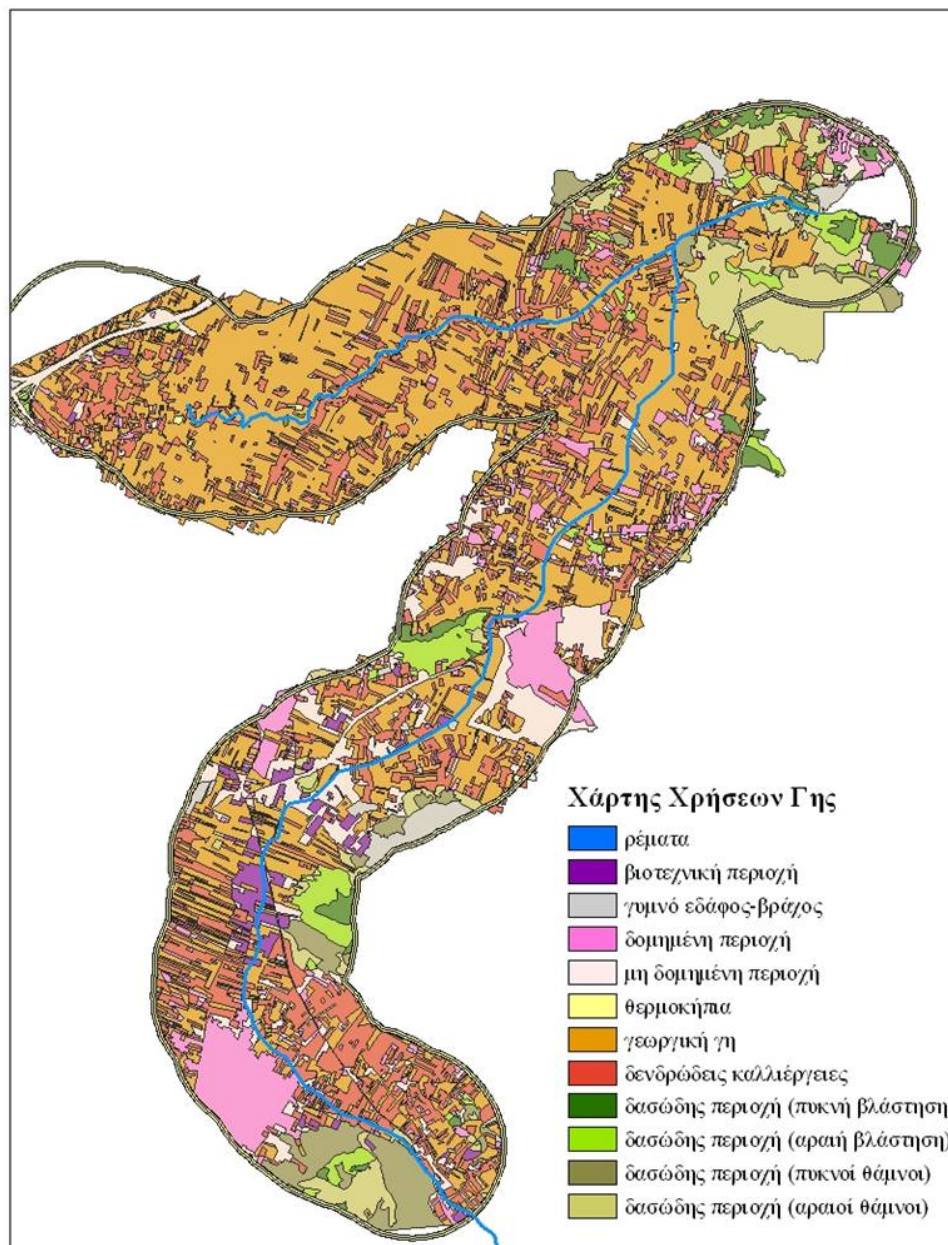


Εικόνα 10-2. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης

### 10.2.2 Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης

Το θεωρητικό υπόβαθρο εξαγωγής ενός ψηφιακού χάρτη χρήσεων γης περιγράφεται στο εδάφιο 6.3.3. Για την παραγωγή χάρτη χρήσεων της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης συντάχθηκαν ψηφιακές ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες σε κλίμακα 1:5 000 που περιλάμβανε όλη την περιοχή, η οποία καλυπτόταν από τα στερεοζεύγη των αρχικών Α/Φ. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας των ορθοφωτογραφιών επιλέχθηκε να είναι 0.35 m. Ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης αναπτύχθηκε για ζώνη πλάτους 2 km κατά μήκος των ρεμάτων Ερασίνου και Αγ. Γεωργίου. Με βάση το ψηφιακό ορθοφωτο-μωσαϊκό που προέκυψε από την ανάλυση της φωτογραμμετρίας, τα πολύγωνα χρήσεων γης ψηφιοποιήθηκαν σε περιβάλλον ΓΣΠ από ειδικούς της φωτοερμηνείας σύμφωνα με τις απαιτούμενες από το ερευνητικό έργο κατηγορίες χρήσεων γης. Έτσι, προέκυψε ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης, κλίμακας 1:5 000 που έχει γεωαναφερθεί στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, ΕΓΣΑ '87. Σημειώνεται ότι ο διαθέσιμος

χάρτης χρήσεων γης περιλαμβάνει περισσότερες κατηγορίες χρήσεων γης από τις απαιτούμενες για την εφαρμογή του μοντέλου ζημιάς στο δομημένο περιβάλλον της περιοχής μελέτης. Ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης απεικονίζεται στην Εικόνα 10-3.



Εικόνα 10-3. Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης

### 10.3 Δεδομένα πλημμύρας

Για την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση της πλημμύρας λόγω υπερχείλισης των ρεμάτων του Αγ. Γεωργίου και του Ερασίνου στην περιοχή μελέτης λήφθηκαν υπόψη σενάρια πλημμύρας, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης πλημμύρας, έτσι ώστε θεωρητικά να καλύπτεται ένα εύρος τιμών συχνότητας εμφάνισης του πλημμυρικού γεγονότος κατάκλυσης.

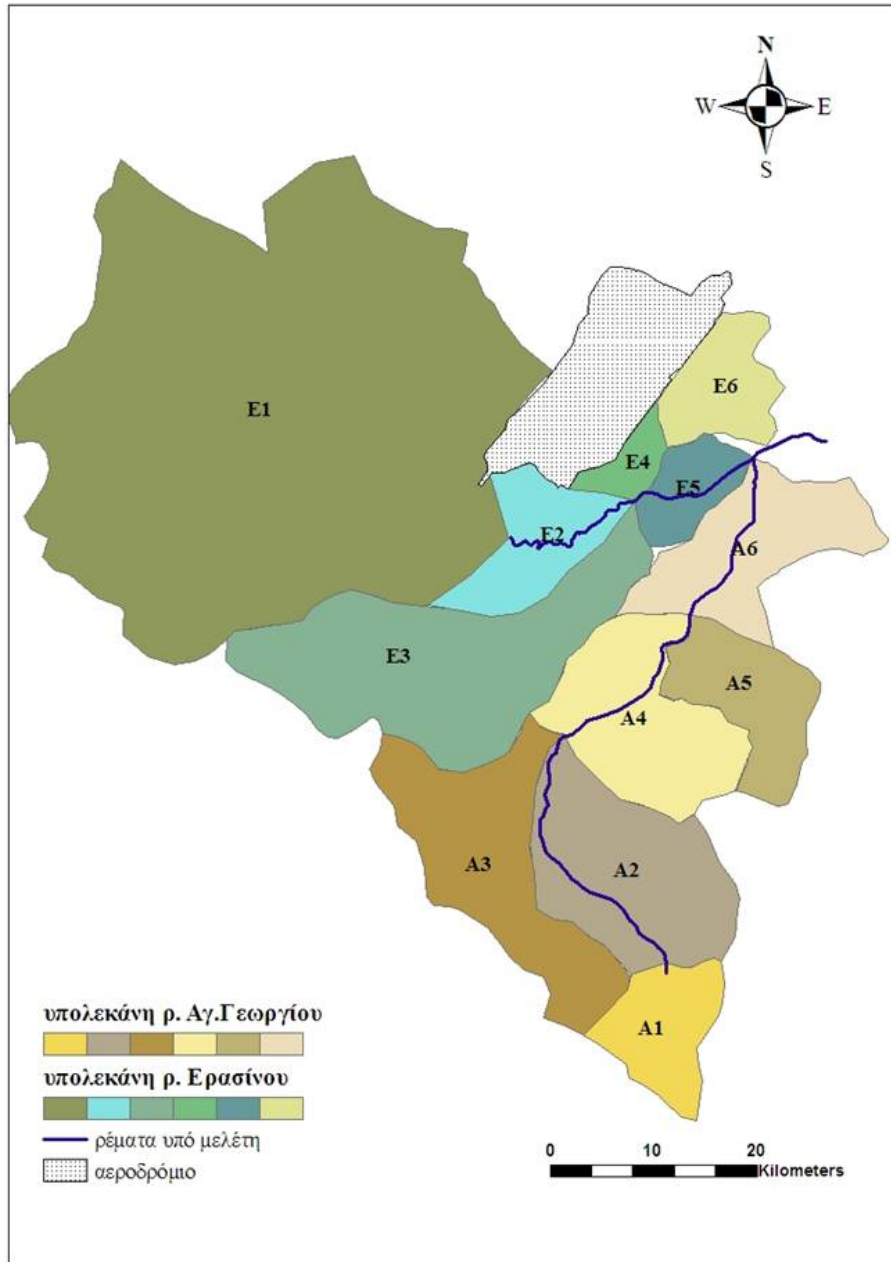
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 6.2, η τελική επιλογή της περιόδου επαναφοράς για το προσδιορισμό ενός σεναρίου πλημμύρας εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες. Ωστόσο, σύμφωνα με τις γενικές κατευθυντήριες οδηγίες που δίνει η Νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις πλημμύρες (2007/60/ΕΕ), προτείνεται να επιλέγονται τουλάχιστον τρία σενάρια πλημμύρας, τα οποία αντιστοιχούν σε υψηλή, μέτρια και χαμηλή συχνότητα εμφάνισης ενός πλημμυρικού γεγονότος (βλέπε υποκεφάλαιο 3.4). Επιπλέον στην περίπτωση ολοκλήρωσης της καμπύλης πιθανότητας υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς, απαιτείται να ληφθούν υπόψη περισσότερες από τρεις πιθανότητες υπέρβασης μιας πλημμύρας [Tsakiris et al. 2009]. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης επιλέχθηκαν οκτώ σενάρια πλημμύρας, τα οποία καλύπτουν τις τρεις κατηγορίες υψηλής, μέτριας και χαμηλής συχνότητας εμφάνισης και αντιστοιχούν σε τιμές περιόδου επαναφοράς,  $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500$  και  $1000$  yr.

Για κάθε σενάριο πλημμύρας εφαρμόζονται οι υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί που έχουν περιγραφεί θεωρητικά στο κεφάλαιο 6 και στα ακόλουθα εδάφια περιγράφεται συνοπτικά η εφαρμογή των υπολογισμών στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

### 10.3.1 Υδρολογικοί υπολογισμοί

Η Εικόνα 10-4 δείχνει την υποδιαίρεση της λεκάνης απορροής του ρέματος Ερασίνου σε υπολεκάνες για την εκτέλεση των αναγκαίων υδρολογικών υπολογισμών σε κάθε υπολεκάνη υπό τα επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας.

Εγκατεστημένοι υδρομετρικοί σταθμοί σε ρέματα της ευρύτερης περιοχής δεν υπάρχουν και επομένως αναγκαστικά εφαρμόζεται σε κάθε υπολεκάνη το μοντέλο βροχόπτωσης – απορροής για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής (ΥΑΑ) συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς. Το υδρολογικό μοντέλο βασίζεται στο συνθετικό υετόγραμμα σχεδιασμού και το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥΓ) της κάθε υπολεκάνης, το οποίο προσδιορίζεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης (βλέπε Τόμο II, εδάφιο Π6.1.2). Στην περιοχή της λεκάνης Ερασίνου λειτουργούν σήμερα μόλις δύο βροχομετρικοί σταθμοί, οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και το Υπουργείο Γεωργίας στην περιοχή των Σπάτων και του Μακροπούλου αντίστοιχα. Επομένως, ελλείψει βροχογράφου επιλέχθηκε στην ανάλυση να χρησιμοποιηθεί η σημειακή ομβρία καμπύλη της μορφής της εξίσωσης 6.2, που αναπτύχθηκε το 2004 για την αποχέτευση της Ε.Λ.Ελευσίνας-Σταυρού-Αεροδρομίου Σπάτων στο τμήμα Παλλήνης-Αεροδρομίου Σπάτων (Αττική Οδός) και έχει εγκριθεί από την αρμόδια κρατική υπηρεσία.



Εικόνα 10-4. Υποδιαίρεση της λεκάνης απορροής του ρέματος Ερασίνου σε υπολεκάνες

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα υδρολογικών υπολογισμών, δηλαδή οι αιχμές των υδρογραφημάτων άμεσης απορροής των ρεμάτων Αγ. Γεωργίου και Ερασίνου για κάθε υπολεκάνη υπό τα επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας  $T = 10, 100$  και  $1000$  yr.

Πίνακας 10-1. Αιχμές υδρογραφήματων άμεσης απορροής των υπολεικάνων του ρέματος Αγ. Γεωργίου

Υπολείκάνες	Πλημμυρική αιχμή $Q_p$ [ $m^3/s$ ]		
	T = 10 yr	T = 100 yr	T = 1000 yr
A1	6.89	26.83	88.62
A2	20.98	71.22	200.89
A3	21.41	72.69	205.04
A4	18.88	60.38	160.2
A5	11.21	40.81	125.3
A6	13.17	44.04	122.14

Πίνακας 10-2. Αιχμές υδρογραφήματων άμεσης απορροής των υπολεικάνων του ρέματος Ερασίνου

Υπολείκάνες	Πλημμυρική αιχμή $Q_p$ [ $m^3/s$ ]		
	T = 10 yr	T = 100 yr	T = 1000 yr
E1	125.65	426.46	1202.86
E2	10.00	32.45	87.39
E3	35.32	116.36	318.02
E4	2.84	9.89	28.56
E5	5.43	17.63	47.50
E6	7.22	24.18	67.17

Τα συνθετικά υετογράμματα σχεδιασμού για κάθε σενάριο πλημμύρας, τα ΜΥΓ για κάθε υπολείκάνη και τα αντίστοιχα υδρογραφήματα άμεσης απορροής (ΥΑΑ) για κάθε υπολείκάνη και για κάθε σενάριο πλημμύρας παρατίθενται δειγματοληπτικά για T=10, 100, 1000 yr στον Τόμο ΙΙ, υποκεφάλαιο Π10.1.

### 10.3.2 Υδραυλικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS

Με βάση τους υδρολογικούς υπολογισμούς ακολουθεί η διαδικασία της διόδευσης πλημμυρογραφήματος μέσω ρέματος, η οποία πραγματοποιείται από το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS v3.1.3. Το θεωρητικό υπόβαθρο του προγράμματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6.

Για την χρησιμοποίηση του HEC-RAS στην περιοχή μελέτης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

(α) Θεωρείται ότι οι πλευρικές εισροές κατά μήκος του υπό εξέταση ρέματος σε κάθε υπολείκάνη είναι μηδενικές, δηλαδή η αιχμή του υδρογραφήματος άμεσης απορροής της εκάστοτε υπολείκάνης προστίθεται στην

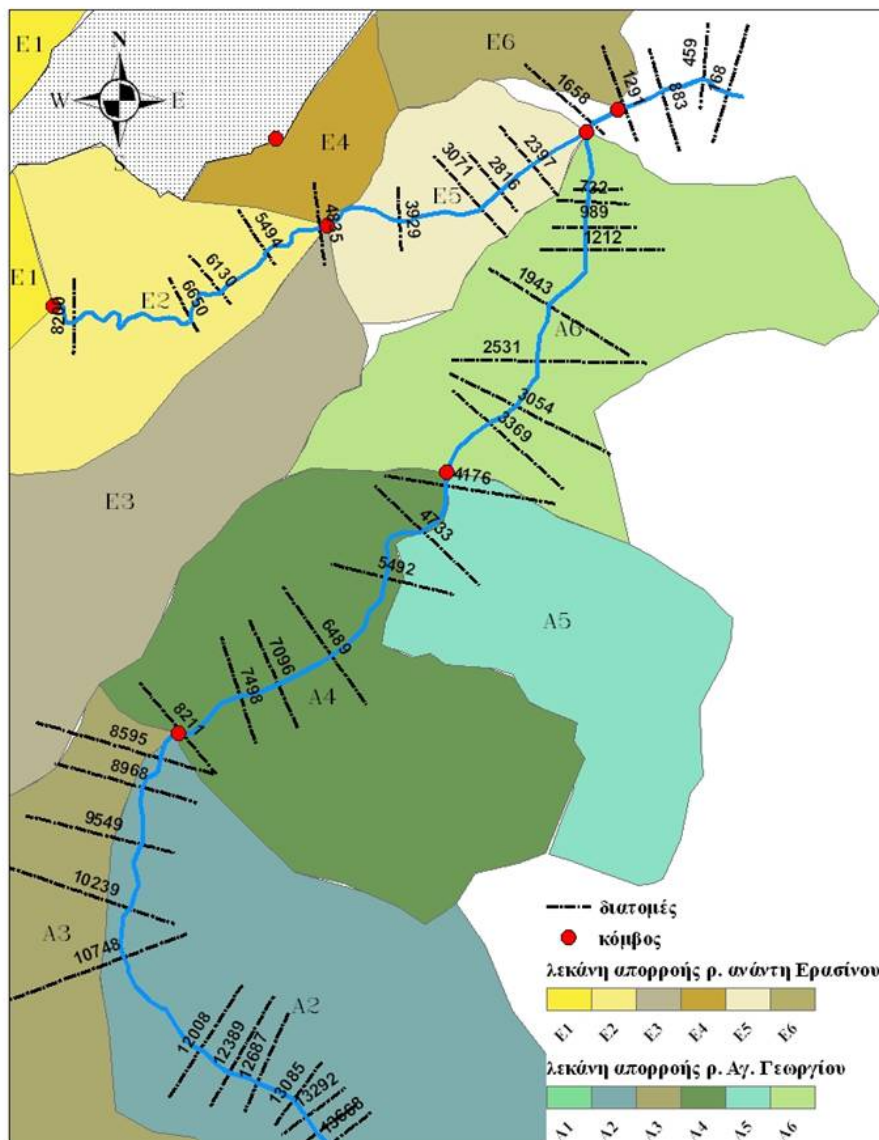


έξοδο της υπολεικάνης.

(β) Θεωρείται ότι η ροή είναι υποκρισίμη και έτσι προσδιορίζονται μόνο κατάντη οι οριακές συνθήκες σε κάθε υδατόρευμα βάσει της κλίσης του πυθμένα.

(γ) Θεωρείται ότι ο συντελεστής τραχύτητας Manning είναι ενιαίος για κάθε τμήμα διατομής και η τιμή του συντελεστή Manning προσδιορίζεται εμπειρικά με βάση τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (βλέπε Τόμος II, εδάφιο Π6.1.2).

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η γεωμετρία του δικτύου αποτελείται από δύο ρέματα (Αγ. Γεώργιος και ανά-ντη Ερασίνας) που συμβάλουν σε ένα τρίτο ρέμα (κατάντη Ερασίνας). Το σημείο συμβολής των δύο ρεμά-των λειτουργεί ως υδραυλικός κόμβος στο υπολογιστικό μοντέλο. Οι θέσεις των διατομών που επιλέχθηκαν κατά μήκος των ρεμάτων αυτών φαίνονται στην Εικόνα 10-5.



Εικόνα 10-5. Θέσεις διατομών κατά μήκος των ρεμάτων υπό μελέτη

Ο υπολογισμός της γεωμετρίας των διατομών προέκυψε αυτόματα από το ΨΜΕ με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS η λειτουργία της οποίας περιγράφηκε στο εδάφιο 6.4.4. Η ακρίβεια της γεωμετρίας των διατομών εξαρτάται άμεσα από την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ.

Τα αποτελέσματα της διόδευσης πλημμύρας μέσω υδατορεύματος υπολογίστηκαν για τα οκτώ σενάρια πλημμύρας. Στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π10.2 παρατίθενται ενδεικτικά για τα σενάρια πλημμύρας  $T = 10, 100, 1000$  yr, οι μηκοτομές της μέγιστης στάθμης πλημμύρας, και της παροχής για τα τρία ρέματα υπό εξέταση, δηλαδή ρέμα Αγ. Γεώργιος, ανάντη Ερασίνοσ και κατάντη Ερασίνοσ. Επίσης στο ίδιο υποκεφάλαιο, παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες των υδραυλικών υπολογισμών για επιλεγμένες τιμές υδραυλικών παραμέτρων για όλα τα σενάρια πλημμύρας.

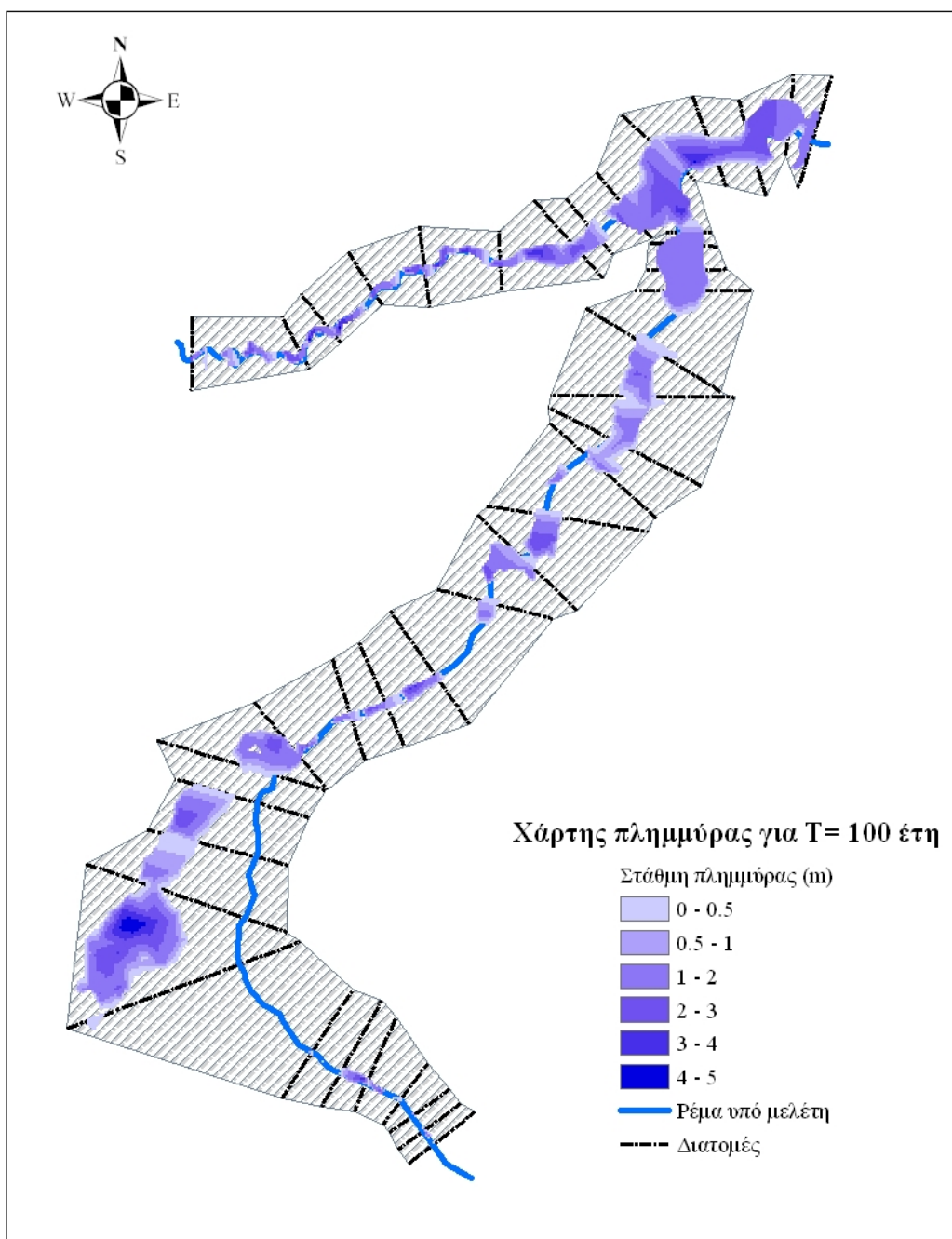
Γενικά, τα αποτελέσματα των υδραυλικών υπολογισμών στην περιοχή μελέτης επιτρέπουν τις παρακάτω διαπιστώσεις:

- Η ολική παροχή αυξάνεται σταθερά στις εξόδους των υπολεκανών, όπου προστίθενται κάθε φορά οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές των υπολεκανών.
- Η στάθμη της πλημμύρας ακολουθεί τη γεωμετρία του εδάφους και επομένως εμφανίζεται μειωμένη στις διατομές με μεγάλη κλίση εδάφους και αυξημένη στις πιο εξομαλυμένες διατομές. Επίσης, στα πεδινά εδάφη, όπου το πλάτος των διατομών αυξάνεται, το πλημμυρικό πεδίο εκτείνεται εκατέρωθεν της κοίτης του ρέματος σε μεγαλύτερο πλάτος από ότι σε μεγαλύτερα υψόμετρα.
- Η μέση ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη στις περιοχές που εντοπίζονται στενώσεις και μαϊανδροί, ενώ εκεί όπου η κλίση του εδάφους μειώνεται η ταχύτητα πέφτει.

Η έλλειψη υδρομετρικών παρατηρήσεων στα ρέματα υπό εξέταση δεν επέτρεψε τη βαθμονόμηση του πλημμυρικού μοντέλου και κατ' επέκταση την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Επίσης, οι ελάχιστες παρατηρημένες τιμές βάθους νερού (λιγότερες από 10 σε αριθμό) που είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος κατάκλυσης της 23-24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2005 δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, διότι οι τιμές αυτές καταγράφηκαν σε περιοχές εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης στις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning, ο οποίος εκτιμήθηκε εμπειρικά. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας έδειξαν μικρές διαφορές στην επιφάνεια κατάκλυσης για τα σενάρια πλημμύρας με μικρή τιμή περιόδου επαναφοράς.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έλαβε χώρα η εξαγωγή των υδραυλικών υπολογισμών σε περιβάλλον ΓΣΠ μετά από επαναληπτική διαδικασία δοκιμών και διόρθωσης λαθών μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS v4.1.1. Πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή μόνο των μέγιστων τιμών του βάθους νερού, αφού θεωρήθηκε ότι το μέγεθος της έκτασης της περιοχής μελέτης και η μονοδιάστατη προσομοίωση είναι απαγορευτικοί παράγοντες για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων της μέσης ταχύτητας ροής. Οι χάρτες περιβάλλουσας βάθους νερού απεικονίζουν την χωρική κατανομή των μέγιστων τιμών βάθους νερού με επίπεδο αναφοράς το φυσικό έδαφος. Οι χάρτες αυτοί είναι ψηφιδωτά κανναβικής δομής και κατά συνέπεια η ακρίβειά τους καθορίζεται από το βήμα καννάβου, το οποίο είναι ίσο με το βήμα καννάβου του ΨΜΕ. Οι χάρτες περιβάλλουσας βάθους νερού σε περιβάλλον ΓΣΠ (ή χάρτες πλημμυρικού κινδύνου) παρατίθενται αναλυτικά για κάθε σενάριο πλημμύρας στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π10.3, ενώ στην Εικόνα 10-6 παρουσιάζεται ενδεικτικά ο αντίστοιχος χάρτης για  $T = 100$  yr.





Εικόνα 10-6. Χάρτης περιβάλλουσας βάθους νερού (ή χάρτης πλημμυρικού κινδύνου) για T=100yr

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 6.5, για την ποσοτικοποίηση του σφάλματος στον υπολογισμό του προσομοιωμένου βάθους νερού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το σφάλμα που προέρχεται από τον υπολογισμό του υψόμετρου εδάφους σύμφωνα με την εξίσωση (6.8). Με άλλα λόγια το σφάλμα στον υπολογισμό του υψόμετρου εδάφους οφείλεται: (α) στην υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ και (β) στην αναγωγή της τιμής υψόμετρου εδάφους από κάθε φατνίο του ΨΜΕ στην ανηγμένη τιμή που αντιστοιχεί σε μια επιλεγμένη χωρική μονάδα ανάλυσης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης δεν συμβαίνει αναγωγή της τιμής του βάρους σε μεγαλύτερη χωρική μονάδα ανάλυσης. Επομένως, η αβεβαιότητα στον υπολογισμό του υψομέτρου φυσικού εδάφους προέρχεται μόνο από την υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ, η οποία στην απόλυτη μορφή της εκτιμάται προσεγγιστικά ίση με  $\pm 0.50$  m και θεωρείται αποδεκτή [Tsakiris et al. 2008]. Στον υπολογισμό του προσομοιωμένου βάρους νερού δε λήφθηκε υπόψη το σφάλμα στον υπολογισμό του υψομέτρου εδάφους.

Το σφάλμα στον υπολογισμό του υψομέτρου ελεύθερης επιφάνειας πλημμύρας οφείλεται στην αβεβαιότητα της μοντελοποίησης της πλημμύρας. Επομένως, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η υπόθεση της μονοδιάστατης διόδευσης πλημμυρογραφήματος μέσω ρέματος για την προσομοίωση πλημμυρικού πεδίου περιλαμβάνει πολλές παραδοχές και απλοποιήσεις που αυξάνουν την αβεβαιότητα στη μοντελοποίηση. Επίσης, παρόλο που χρησιμοποιήθηκε μεγάλο εύρος πλημμυρικών σεναρίων, παρατηρήθηκε ότι οι αντίστοιχες επιφάνειες κατάκλυσης δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Υπενθυμίζεται ότι οι υδραυλικοί αυτοί υπολογισμοί χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσο στάδιο, αναγκαίο για την ανάλυση ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεσοκλιμακίας. Παρόλο που δεν επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ακρίβεια των υδραυλικών υπολογισμών θεωρείται αποδεκτή για τους σκοπούς της ανάλυσης.

## 10.4 Οικονομικά δεδομένα

Συνήθως τα οικονομικά δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη σε μία περιοχή μελέτης για την ανάλυση ζημιάς είναι η αρχική αξία ιδιοκτησίας (πριν τη δράση πλημμύρας) και το κόστος επισκευής ή αντικατάστασης της άμεσης ζημιάς στο περιβάλλον του κτηρίου. Βάσει αυτών υπολογίζεται το αντίστοιχο ποσοστό ζημιάς σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο. Εάν όμως, ως χωρική κλίμακα της ζημιάς οριστεί η μεσοκλιμακία αναπτύσσονται χαρακτηριστικοί τύποι κτηρίου για τον υπολογισμό της μέσης αρχικής αξίας ακινήτου και κατ' επένταση για τον υπολογισμό του ποσοστού ζημιάς σε κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο. Επιπλέον, εάν η ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλιμακία εφαρμοστεί σε περιβάλλον ΓΣΠ, τότε είναι αναγκαίος και ο προσδιορισμός της ολικής αρχικής αξίας δομημένου περιβάλλοντος ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή ο προσδιορισμός της παραμέτρου  $x$  για κάθε χρήση του δομημένου περιβάλλοντος υπό εξέταση.

Για την περιοχή μελέτης που ανήκει στην Ανατολική Αττική, η ανάλυση ζημιάς υλοποιείται σε μεσοκλιμακία και οι τιμές του ποσοστού ζημιάς έχουν ήδη υπολογιστεί κατά την ανάπτυξη των εμπειρικών σχετικών καμπύλων βάρους νερού – ζημιάς για την περιοχή αυτή στο κεφάλαιο 9. Συγκεκριμένα, η αντικειμενική αξία ακινήτου θεωρήθηκε το πιο κατάλληλο οικονομικό μέγεθος για να προσδιορίσει την αρχική αξία μιας ιδιοκτησίας, αφού σε περίπτωση άμεσης ζημιάς στην ιδιοκτησία χάνεται ένα ποσοστό της αξίας τόσο του τιμήματος όσο και του οικοπέδου που το περιέχει. Για την Ανατολική Αττική, ο υπολογισμός της αντικειμενικής αξίας ακινήτου δεν πραγματοποιήθηκε για κάθε πλημμυρόπληκτο κτήριο ξεχωριστά, αλλά για κάθε χαρακτηριστικό τύπο κατοικίας λαμβάνοντας υπόψη το δήμο, το μέγεθος κατοικίας και την τιμή ζώνης οικοπέδου, σε μία προσπάθεια ομαδοποίησης των κοινών χαρακτηριστικών κατασκευής. Έτσι, εκτιμήθηκαν οι μέσες αντικειμενικές αξίες ακινήτου για κατοικίες στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής, υπολογίστηκαν και οι αντίστοιχες τιμές ποσοστού ζημιάς για κάθε πλημμυρόπληκτη κατοικία και εφαρμόστηκε η εμπειρική σχετική καμπύλη βάρους νερού – ζημιάς για κατοικίες. Σε ό,τι αφορά τον υπολογισμό της μέσης αντικειμενικής αξίας ακινήτου για βιοτεχνική χρήση παρατηρήθηκε, ότι αυτή είναι περίπου ίση με την αντικειμενική αξία ακινήτου για αποθήκες στην Ανατολική Αττική.

Για την περιοχή μελέτης όπου η ανάλυση ζημιάς εφαρμόζεται σε περιβάλλον ΓΣΠ, ο αναγκαίος προσδιορισμός της ολικής αρχικής αξίας δομημένου περιβάλλοντος αναγκαστικά μονάδα επιφάνειας, πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας την πιο πρόσφατη κοινή υπουργική απόφαση [ΚΥΑ 2008] για την αποκατάσταση ζη-

μιών από πλημμύρα σε κτήρια στην Αττική. Σύμφωνα με την ΚΥΑ η παράμετρος  $x$  ορίζεται ( $\alpha$ ) ίση με σε 500 €/m<sup>2</sup> για δομημένο περιβάλλον με χρήση κατοικίας και ( $\beta$ ) σε 180 €/m<sup>2</sup> για δομημένο περιβάλλον με χρήση αποθήκης.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε αγροτική γη, δρόμους, αυτοκίνητα και άλλα έργα υποδομής στην περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και της έμμεσης πλημμυρικής ζημιάς, όπως είναι η απώλεια εισοδήματος λόγω προσωρινής διακοπής εμπορικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα ανάλυση. Πλημμυρικές ζημιές που δύσκολα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, όπως είναι η απώλεια ανθρώπινης ζωής, δεν λαμβάνονται υπόψη.

## 10.5 Εφαρμογή μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΠΣ

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας για την εφαρμογή μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας σε περιβάλλον ΓΠΠ (βλέπε Εικόνα 7.10), εκτός από τα χωρικά, πλημμυρικά και οικονομικά δεδομένα απαιτείται η εισαγωγή εμπειρικών σχετικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς για κάθε χρήση γης υπο εξέταση (για την παρούσα ανάλυση μόνο για δομημένο περιβάλλον).

Η επιτόπια εξέταση της περιοχής μελέτης ως προς τη σύνθεση της δομημένης περιοχής έδειξε ότι η συγκεκριμένη ζώνη δομημένης περιοχής απαρτίζεται κυρίως από κατοικίες. Παρατηρήθηκαν επίσης, διάσπαρτες βιοτεχνίες κυρίως κατά μήκος οδικών αρτηριών. Ωστόσο, η περιοχή βιοτεχνικής χρήσης είναι πολύ περιορισμένη σε σύγκριση με την περιοχή κατοικίας. Επιπλέον, οι περιβάλλουσες βάθους νερού που προέκυψαν από την προσομοίωση πλημμύρας υπό τα επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας κατακλύζουν μόνο περιοχές κατοικίας. Για λόγους απλοποίησης της ανάλυσης, θεωρήθηκε ότι η δομημένη περιοχή είναι εξ ολοκλήρου περιοχή κατοικίας.

Η σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 9 (βλέπε εδάφιο 9.5.1) για χρήση κατοικίας με βάση τα αρχεία καταγραφής ζημιάς στο δήμο Μοσχάτου και σε διάσπαρτες περιοχές της Ανατολικής Αττικής από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης, θεωρείται κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή του μοντέλου ζημιάς στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης που ανήκει στην Ανατολική Αττική. Η συγκεκριμένη καμπύλη προέκυψε από καταγραφή του βάθους νερού στο εσωτερικό των πληγείσων κατοικιών, δηλαδή με επίπεδο αναφοράς το δάπεδο του ισογείου. Όμως, οι χάρτες περιβάλλουσας βάθους νερού προέκυψαν από την προσομοίωση πλημμύρας στο υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-RAS με δεδομένο το ΨΜΕ και κατά συνέπεια με επίπεδο αναφοράς το φυσικό έδαφος. Κατά συνέπεια, η καμπύλη χρειάζεται να προσαρμοστεί.

Οι τιμές του πλημμυρικού μεγέθους του βάθους νερού στη σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς προσαυξάνονται ανάλογα με την υψομετρική διαφορά μεταξύ του δαπέδου ισογείου μιας πλημμυρόπληκτης κατοικίας και του φυσικού εδάφους. Για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι αυτή η υψομετρική διαφορά είναι σταθερή για όλες τις κατοικίες και ίση με 0.25 m, δηλαδή περίπου ίση με την υπερύψωση ενός πεζοδρομίου από την επιφάνεια του δρόμου.

Με βάση τα παραπάνω, η προσαρμογή στις τιμές του βάθους νερού εφαρμόζεται στην καμπύλη της Εικόνας 9.19, και τα αποτελέσματα της προσαρμοσμένης κλιμακωτής συνάρτησης βάθους νερού – ζημιάς για χρήση κατοικίας στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 10-3. Προσαρμοσμένη κλιμακωτή συνάρτηση βάθους νερού – ζημιάς για κατοικίες στην Ανατολική Αττική

Βάθος νερού [m]	Ποσοστό ζημιάς %	Βάθος νερού (m)	Ποσοστό ζημιάς %
0.25	8.5	4.25	14.95
1.25	8.5	4.75	15.82
1.75	9.06	5.25	16.64
2.25	10.57	5.75	17.41
2.75	11.85	6.25	18.15
3.25	12.98	6.75	18.15
3.75	14	7.25	18.15

Στην προσαρμοσμένη κλιμακωτή συνάρτηση, η άμεση ζημιά εμφανίζεται όταν το βάθος νερού φτάσει τα 0.25 m. Τα μεγέθη μεταβάλλονται στην καμπύλη ανά 0.5 m. Ο ρυθμός αύξησης του ποσοστού ζημιάς σταδιακά μειώνεται για να μηδενιστεί για τιμές του βάθους νερού μεγαλύτερες από 6 m.

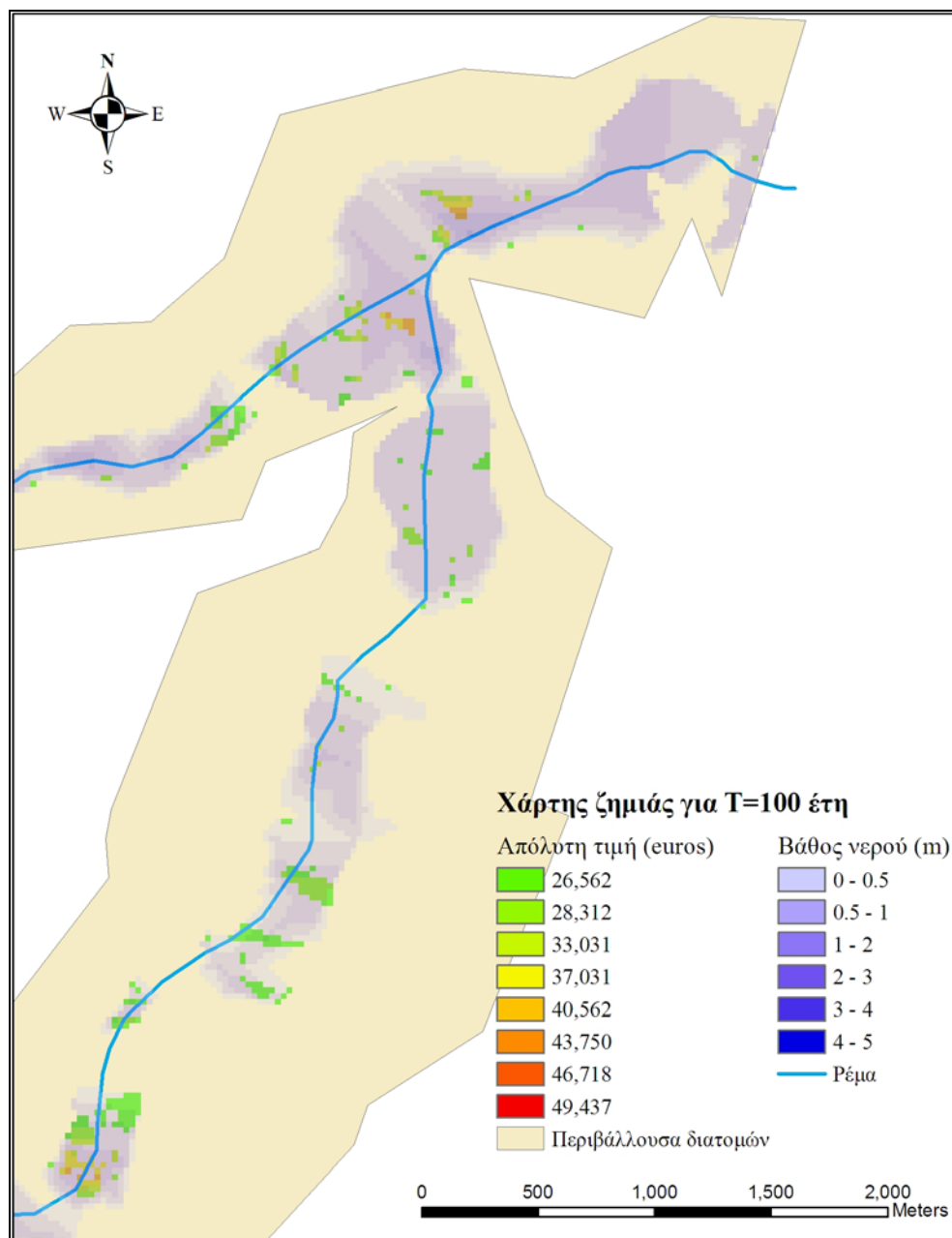
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία εφαρμογής ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλιμακίας σε περιβάλλον ΓΣΠ στο υποκεφάλαιο 7.5, για κάθε σενάριο πλημμύρας  $T$  εισάγεται στο υποστηρικτικό εργαλείο εκτίμησης ζημιάς ο αντίστοιχος χάρτης περιβάλλουσας βάθους νερού, ο ψηφιακός χάρτης χρήσης κατοικίας και η προσαρμοσμένη σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς για κατοικίες, οπότε υπολογίζεται σε απόλυτες τιμές η ολική, άμεση πλημμυρική ζημιά για κατοικίες στην Ανατολική Αττική σύμφωνα με την εξίσωση (7.13). Τα αριθμητικά αποτελέσματα της αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς για κάθε σενάριο πλημμύρας που προέκυψαν από την εφαρμογή του υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 10-4.

Πίνακας 10-4. Πίνακας αποτελεσμάτων αναμενόμενης άμεσης ζημιάς σε κατοικίες για όλα τα σενάρια πλημμύρας

Σενάριο πλημμύρας $T$	Πιθανότητα υπέρβασης πλημμύρας $p$	Πιθανότητα μη υπέρβασης πλημμύρας ( $1-p$ )	Άθροισμα πλημμυρικής ζημιάς $D_T$ (Μ€)
2	0.5	0.5	8.19
5	0.2	0.8	8.59
10	0.1	0.9	8.96
20	0.05	0.95	9.40
50	0.02	0.98	10.20
100	0.01	0.99	10.87
500	0.002	0.998	12.91
1000	0.001	0.999	13.97

Παρατηρείται, ότι όταν η πιθανότητα υπέρβασης του πλημμυρικού γεγονότος μικραίνει, δηλαδή όσο πιο σπάνιο γίνεται το πλημμυρικό γεγονός, η αναμενόμενη άμεση ζημιά στις κατοικίες αυξάνεται. Ο ρυθμός αύξησης της πλημμυρικής ζημιάς δεν είναι γραμμικός. Η σχέση μεταξύ συχνότητας εμφάνισης ενός πλημμυρικού γεγονότος και της αντίστοιχης ολικής πλημμυρικής ζημιάς θα αναλυθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Τα γραφικά αποτελέσματα της χωρικής κατανομής ανα φατνίο καννάβου της άμεσης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ παρουσιάζονται με τη μορφή χάρτη αναμενόμενης ζημιάς ενδεικτικά για  $T = 100$  yr παρακάτω, ενώ αναλυτικά για κάθε σενάριο πλημμύρας παρατίθενται στον Τόμο ΙΙ, υποκεφάλαιο Π110.4.



Εικόνα 10-7. Χάρτης αναμενόμενης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας για  $T=100$ yr

## 10.6 Καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας - ζημιάς

Από τον Πίνακα 10-4 φαίνεται ότι για κάθε σενάριο πλημμύρας, η πιθανότητα μη υπέρβασης πλημμύρας ( $1-p$ ) αντιστοιχεί σε ένα άθροισμα ζημιάς (Μ€) σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες με την παραδοχή, ότι η συχνότητα εμφάνισης της ζημιάς είναι ίδια με τη συχνότητα εμφάνισης του πλημμυρικού γεγονότος που την προκάλεσε.

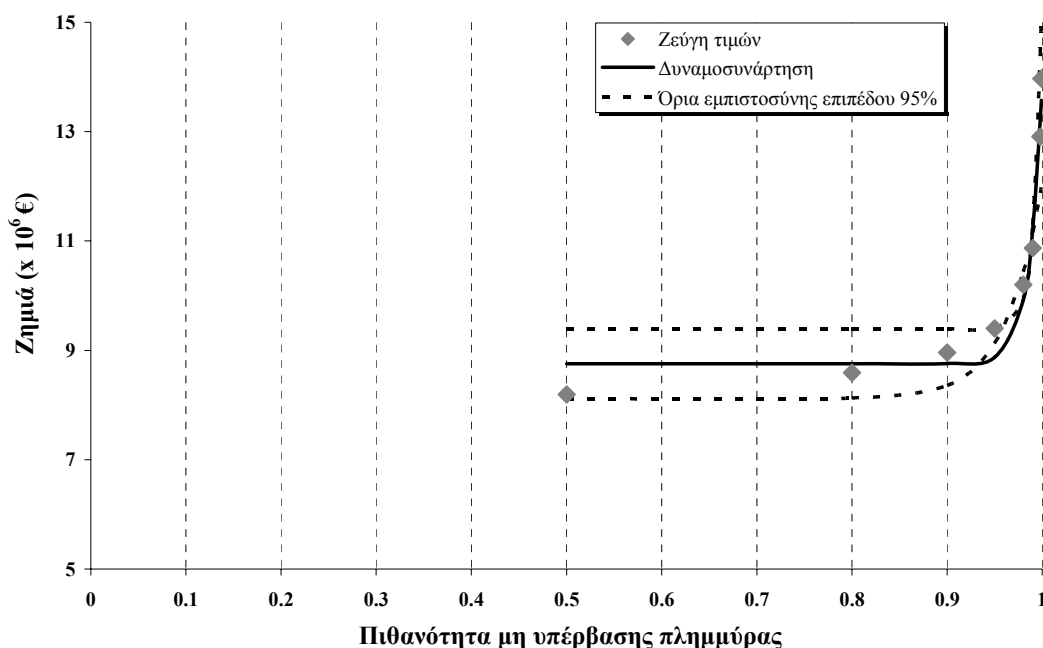
Εφαρμόζοντας το εργαλείο προσαρμογής συνάρτησης σε σύνολο δεδομένων σε περιβάλλον Matlab, τα αποτελέσματα προσαρμογής συνάρτησης στα δεδομένα πιθανότητας μη υπέρβασης – ζημιάς παρουσιάζονται στον Πίνακα 10-5 και στην Εικόνα 10-8.

Πίνακας 10-5. Προσαρμογή συνάρτησης στα δεδομένα πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας– ζημιάς

Διάστημα	Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Συντελεστές παλινδρόμησης	Όρια εμπιστοσύνης 95%	
$x \in [0.5, 0.999]$	Δυναμόσυναρτηση	$y = ax^b + c$	a	5.18	a (3.968, 6.403)
			b	73.77	b (26.57, 121)
			c	8.75	c (8.116, 9.395)

Πίνακας 10-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης

Τύπος συνάρτησης	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Δυναμόσυναρτηση	0.96	0.68	Αποδεικτή



Εικόνα 10-8. Καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς

Η ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο εκτίμησης της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.3, το μέγε-

θος της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο σύγκρισης, αξιολόγησης και ιεράρχησης τεχνικών έργων για την αντιμετώπιση πλημμυρικών γεγονότων στην υφιστάμενη κατάσταση μιας πλημμυρόπληκτης περιοχής μελέτης. Με άλλα λόγια αποτελεί ένα διαδεδομένο μέτρο πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης.

Η καμπύλη πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς στην Εικόνα 10-8 αναφέρεται σε μία κατάσταση της περιοχής μελέτης στην οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη τεχνικά αντιπλημμυρικά έργα. Η κατάσταση αυτή συμβολίζεται στην ανάλυση ως «κατάσταση συστήματος 1». Ο υπολογισμός της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς υλοποιείται με την ολοκλήρωση της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς εντός του εύρους των τιμών της πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας, δηλαδή για το διάστημα τιμών [0.500, 0.999]. Η ολοκλήρωση της καμπύλης υπολογίζεται με την προσεγγιστική μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Simpson σύμφωνα με την εξίσωση 9.1.

Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς από πλημμύρα σε κατοικίες της Ανατολικής Αττικής για την κατάσταση συστήματος 1, για τη συνάρτηση τύπου δυναμοσυνάρτησης και τις συναρτήσεις με όρια εμπιστοσύνης επιπέδου 95%, δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 10-7. Αποτελέσματα αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς για την «κατάσταση συστήματος 1»

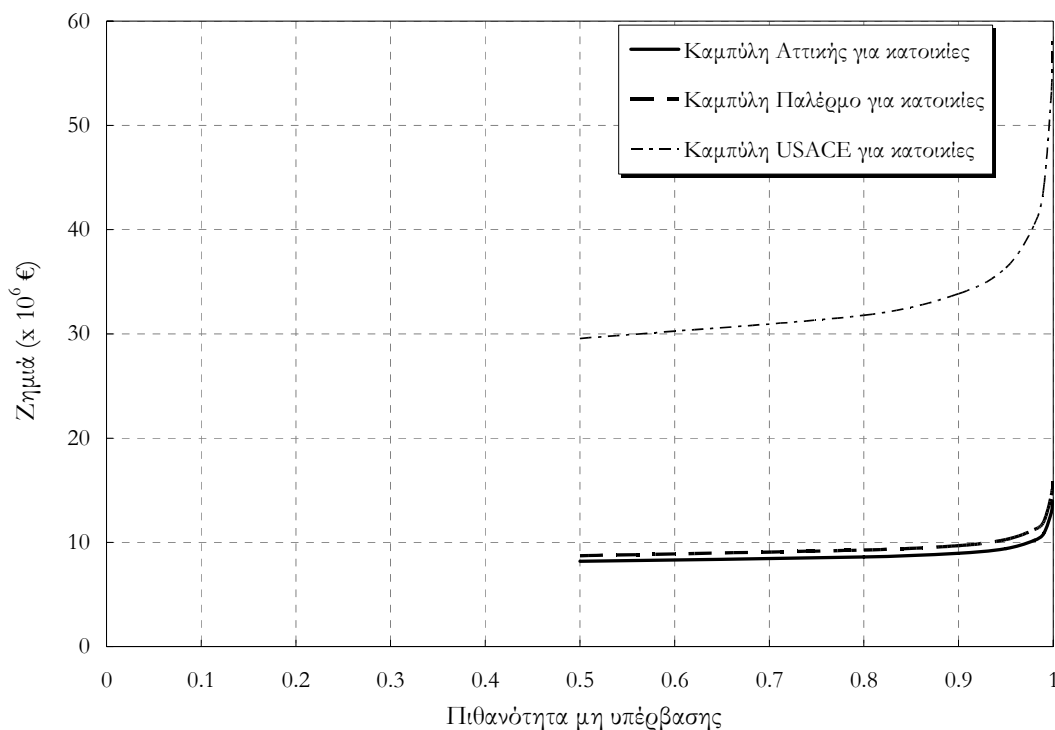
Αναμενόμενη ετήσια ζημιά (Μ€)	Μέση τιμή	Ποσοστιαίο σημείο 25%	Ποσοστιαίο σημείο 75%
Κατάσταση συστήματος 1	4.77	4.37	5.16

### 10.6.1 Ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στη σχετική καμπύλη βάθους νερού - ζημιάς

Στο εδάφιο αυτό πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς στη σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς, δηλαδή χρησιμοποιώντας διαφορετική σχετική καμπύλη και διατηρώντας τα ίδια χωρικά, πλημμυρικά και οικονομικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης υπολογίζεται ξανά η αναμενόμενη ετήσια ζημιά. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να αναδειχθεί η σημασία εφαρμογής της κατάλληλης καμπύλης στην εκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς η οποία θα εκφράζει κατά το δυνατό, τις τοπικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

Για την επανάλυση των υπολογισμών, χρησιμοποιήθηκαν οι σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς για χρήση κατοικίας, που περιγράφηκαν αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 9.6 και χαρακτηρίστηκαν ως «καμπύλη Παλέρμιο για κατοικίες» [Oliveri and Santoro 2000] και «καμπύλη USACE για κατοικίες» [USACE 1996]. Η «καμπύλη Παλέρμιο για κατοικίες» προσεγγίζει τον τύπο κατοικίας στην Αττική και επίσης η συγκεκριμένη καμπύλη προκύπτει μετά από λεπτομερή επιτόπια έρευνα πεδίου για την ανάλυση ζημιάς σε επίπεδο μεσοκλίμακας. Αντίθετα, η «καμπύλη USACE για κατοικίες» επιλέχθηκε να εφαρμοστεί, διότι παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στον τρόπο ανάπτυξης της σε σύγκριση με την εμπειρική καμπύλη στην Αττική.

Τα γραφικά αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας στην ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης – ζημιάς απεικονίζονται στην Εικόνα 10-9, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας στον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς δίνονται στον Πίνακα 10-8. Με τον χαρακτηρισμό «κατάσταση συστήματος 2» προσδιορίζεται η εφαρμογή της «καμπύλης Παλέρμιο για κατοικίες» στην ανάλυση, και με τον χαρακτηρισμό «κατάσταση συστήματος 3» προσδιορίζεται η εφαρμογή της «καμπύλης USACE».



Εικόνα 10-9. Ανάλυση ευαισθησίας στην ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς

Παρατηρείται από την Εικόνα 10-9 ότι η εφαρμογή της «καμπύλης Παλέρμο για κατοικίες» έχει ως αποτέλεσμα απόλυτες τιμές αθροίσματος ολικής πλημμυρικής ζημιάς για όλα τα σενάρια πλημμύρας ελάχιστα υψηλότερες από αυτές που δίνει η εφαρμογή της «καμπύλης Αττικής για κατοικίες». Αντίθετα, η εφαρμογή της «καμπύλης USACE» έχει ως αποτέλεσμα πάνω από τριπλάσιες τιμές αναμενόμενης άμεσης ζημιάς από τις αντίστοιχες της εφαρμογής της «καμπύλης Αττικής για κατοικίες».

Πίνακας 10-8. Ανάλυση ευαισθησίας στον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς

Αναμενόμενη ετήσια ζημιά (Μ€)	Μέση τιμή
Κατάσταση συστήματος 1	4.77
Κατάσταση συστήματος 2	5.21
Κατάσταση συστήματος 3	18.17

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η αναμενόμενη ετήσια ζημιά υπερεκτιμάται κατά 9% και κατά 280% εφαρμόζοντας την καμπύλη Παλέρμο και την καμπύλη USACE αντίστοιχα σε πλημμυρόπληκτα κτήρια τύπου κατοικίας σε αστικές περιοχές.

## 10.7 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια

Το κεφάλαιο εστιάζει στην εφαρμογή του μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας με τη μέθοδο της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ για ορισμένη περιοχή μελέτης. Η μεθοδολογία της ε-



εφαρμογής αυτής έχει ήδη περιγραφεί στο εδάφιο 7.1.2. Επομένως, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής σε περιοχή μελέτης που ανήκει στην Ανατολική Αττική και έχει επανειλημμένα πληγεί από πλημμυρικά γεγονότα κατάκλυσης στο πρόσφατο παρελθόν. Πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της αναμενόμενης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένη περιοχή κατοικίας στην περιοχή μελέτης υπό επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας. Επίσης, η ανάλυση προχώρησε περαιτέρω στην ανάπτυξη εμπειρικής καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς για την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης. Η ολοκλήρωση της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας - ζημιάς για το εύρος των τιμών πιθανότητας εμφάνισης των σεναρίων πλημμύρας οδήγησε στον υπολογισμό της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς για την υφιστάμενη κατάσταση του συστήματος. Τέλος, υλοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας - ζημιάς στη σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς και διαπιστώθηκε ότι η σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς παίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο αυτό επιβεβαιώθηκε ότι η χρήση γενικευμένων καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις συγκεκριμένες κοινωνικοοικονομικές συνθήκες του συστήματος υπό μελέτη, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπερεκτίμηση της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς.

Στην ανάλυση αυτού του κεφαλαίου, η εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένη περιοχή υλοποιήθηκε με αυτοματοποίηση του υπολογισμού της σε περιβάλλον ΓΣΠ με τη βοήθεια ενός υποστηρικτικού εργαλείου που αναπτύχθηκε ειδικά για τον σκοπό αυτό. Η εμπειρική σχετική καμπύλη βάθους νερού – ζημιάς που εφαρμόστηκε στη δομημένη περιοχή κατοικίας της περιοχής μελέτης, είναι αποτέλεσμα ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 9.

Σημειώνεται, ότι η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι περιορισμένη λόγω διάφορων απλοποιητικών υποθέσεων που αφορούν την υδρολογική – υδραυλική προσομοίωση της πλημμύρας και τις οικονομικές εκτιμήσεις στην περιοχή μελέτης. Παρόλ' αυτά, η διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας είναι αυτοματοποιημένη, ευέλικτη και αξιόπιστη για αναλύσεις ζημιάς σε μικρές και περιστατικές λειάνες που διαθέτουν παρόμοια υδρολογικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά με την περιοχή μελέτης.



## Κεφάλαιο 11

# Δεδομένα άμεσης ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη Νέα Ορλεάνη

Στις 29 Αυγούστου 2005 ο τυφώνας Κατρίνα (Katrina) έπληξε την πόλη της Νέας Ορλεάνης (New Orleans) νοτιοανατολικά της πολιτείας της Λουϊζιάνα (Louisiana), Η.Π.Α και προκάλεσε μία από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές στον 20<sup>ο</sup> αιώνα σε αμερικανική πόλη. Ο τυφώνας Κατρίνα άφησε πίσω περίπου 1 800 θύματα και περισσότερα από 204 000 σπίτια μη κατοικήσιμα, με ζημιές ή κατεστραμμένα [FEMA 2006a]. Ειδικά στην πόλη της Νέας Ορλεάνης, το πλημμυρικό κύμα που προκάλεσε ο τυφώνας υπερπήδησε αντιπλημμυρικά αναχώματα και προστατευτικούς τοίχους, με αποτέλεσμα σε περισσότερα από 50 σημεία να προκληθούν ρήγματα και καταρρεύσεις αναχωμάτων. Έτσι περίπου 95 000 κατοικίες, οι οποίες αντιστοιχούν στο 80% του συνόλου των κατοικιών στην πόλη, εμφάνισαν άμεσες πλημμυρικές ζημιές. Η στάθμη της πλημμύρας σε ορισμένες γειτονιές ξεπέρασε τα 4 m [ASCE 2007]. Σύμφωνα με επίσημη έκθεση της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Εκτάκτων Αναγκών (FEMA) για τις συνέπειες του τυφώνα σε κτήρια και έργα υποδομής που δημοσιεύτηκε το 2007 από την Κοινή Ομάδα Εκτέλεσης Αξιολόγησης Συνεπειών (Interagency Performance Evaluation Taskforce – IPET) που είναι μια ειδική ομάδα εμπειρογνομόνων του Σώματος Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ, η άμεση πλημμυρική ζημιά μόνο σε κατοικίες εκτιμήθηκε περίπου σε 16 δισεκατομμύρια US\$, ενώ περίπου σε 7 δισεκατομμύρια US\$ εκτιμήθηκε η άμεση ζημιά σε δημόσια κτήρια και έργα υποδομής, όπως είναι οι δρόμοι, οι σιδηρόδρομοι, τα έργα ηλεκτροδότησης, τα έργα αποστράγγισης και αποχέτευσης κτλ.

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην περιγραφή της βάσης των δεδομένων άμεσης οικονομικής ζημιάς, που δημιουργήθηκε από την καταγραφή και συλλογή στοιχείων πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες λόγω του τυφώνα Κατρίνα από τις αρμόδιες δημόσιες αρχές. Η καταγραφή και συλλογή των στοιχείων έγινε κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την πλημμύρα και περιορίστηκε εντός των ορίων της πόλης της Νέας Ορλεάνης. Τα στοιχεία άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες αποτιμήθηκαν με οικονομικούς όρους και περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων με τη μορφή του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς». Τα οικονομικά δεδομένα ζημιάς χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο 12 της διατριβής για τη στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ του ποσοστού

ζημιές σε κατοικίες και των προσομοιωμένων μεγεθών πλημμύρας λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Παρόλο που η πλημμύρα λόγω του τυφώνα Κατρίνα είναι παράκτιου τύπου πλημμύρα και ανήκει στην κατηγορία πλημμύρας με δράση μεγάλων κυμάτων, οι συνθήκες πλημμύρας που αναπτύχθηκαν μέσα στην πόλη ανήκουν στην κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής που οφείλεται σε αστοχία αντιπλημμυρικών αναχωμάτων. Επομένως, προσομοιωμένα πλημμυρικά μεγέθη υπό εξέταση, αποτελούν ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης, η ταχύτητα ροής και το βάθος νερού.

Στοιχεία οικονομικής ζημιών σε κατοικίες που βρίσκονται σε άλλες περιοχές εκτός από την πόλη της Νέας Ορλεάνης, δεν εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό. Η επίσημη έκθεση της Ομάδας Αξιολόγησης Συνεπειών (MAT) της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Έκτακτων Αναγκών (FEMA) (2006a) εξετάζει αναλυτικά την άμεση ζημιά και την αποτίμησή της σε πλημμυρόπληκτα κτήρια λόγω του τυφώνα Κατρίνα κατά μήκος της ακτογραμμής της πολιτείας του Μισισσιπή (Mississippi). Άλλου τύπου συνέπειες της πλημμύρας στην πόλη της Νέας Ορλεάνης που μελετήθηκαν και δημοσιεύτηκαν είναι η απώλεια ανθρώπινης ζωής [Jonkman 2007, Jonkman et al. 2009], οι σωματικές και πνευματικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία [Bourque et al. 2006, Sullivent et al. 2006] και η μόλυνση από βιομηχανικά και οικιστικά απόβλητα μετά την ανάμειξη τους με πλημμυρικά νερά [Pardue et al. 2006, Presley et al. 2006, Reible et al. 2006]. Στο κεφάλαιο αυτό η στατιστική ανάλυση περιορίζεται στα δεδομένα άμεσης ζημιών και πλημμύρας μόνο σε κατοικίες της πόλης της Νέας Ορλεάνης.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε έξι υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 11.1 δίνεται γενική πληροφορία για τον τυφώνα Κατρίνα και τις περιοχές που επλήγησαν λόγω του τυφώνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης και περιγράφονται επίσης οι πλημμυρικές συνθήκες που αναπτύχθηκαν στην πόλη. Το υποκεφάλαιο 11.2 περιγράφει τη σύνθεση του δομημένου περιβάλλοντος κατοικίας στην πόλη και διακρίνει ποιοτικά χαρακτηριστικά κατασκευής των τύπων κατοικίας στην πόλη που κυρίως έπληξε η πλημμύρα. Το υποκεφάλαιο 11.3 αναφέρεται σε περιγραφικά χαρακτηριστικά της δομικής και μη δομικής ζημιών σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες στην πόλη και στη συνέχεια στην ανάπτυξη της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιών. Η αποτίμηση των δεδομένων άμεσης ζημιών με οικονομικούς όρους αναλύεται στο υποκεφάλαιο 11.4, όπου προσδιορίζεται ο τρόπος υπολογισμού της αρχικής αξίας μιας κατοικίας και του αντίστοιχου μεγέθους «ποσοστό ζημιών» και σχολιάζεται η ακρίβεια του υπολογισμού του. Τέλος, το υποκεφάλαιο 11.5 παρουσιάζει τη στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιών και στο υποκεφάλαιο 11.6 αναφέρονται τα ανακεφαλαιωτικά σχόλια αυτού του κεφαλαίου.

## 11.1 Γενική πληροφορία

Για τον τυφώνα Κατρίνα και την καταστροφική πλημμύρα που ακολούθησε στην πόλη της Νέας Ορλεάνης, έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα πολλές μελέτες και εκθέσεις από κυβερνητικές και κρατικές αρχές, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, όπως είναι η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Έκτακτων Αναγκών (FEMA), το Κρατικό Πανεπιστήμιο της Λουιζιάνα (LSU), το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ (USACE) και το Υπουργείο Στέγασης και Αστικής Ανάπτυξης των ΗΠΑ (US Department of Housing and Urban Development).

Αυτό το υποκεφάλαιο δίνει μία γενική εικόνα της υλικής καταστροφής στο δομημένο περιβάλλον, που προκάλεσε η πλημμύρα μετά τον τυφώνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Άλλες μελέτες και επίσημες εκθέσεις ασχολήθηκαν λεπτομερώς με τα χαρακτηριστικά του φυσικού φαινομένου και την χρονική εξέλιξη του τυφώνα Κατρίνα [π.χ. Knabb et al. 2005] καθώς επίσης και με τις βλάβες στο δίκτυο των αντιπλημμυρικών έργων στην ευρύτερη περιοχή [IPET 2007b, Seed et al. 2005].

### 11.1.1 Τυφώνας Κατρίνα

Γενικά οι τυφώνες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και τη βαρομετρική πίεση. Η κλίμακα Saffir-Simpson είναι μία από τις πιο διαδεδομένες κλίμακες βαθμονόμησης της έντασης του τυφώνα και διαθέτει πέντε επίπεδα, όπου επίπεδο κατηγορίας 1 θεωρείται ο τυφώνας ελάχιστης έντασης και επίπεδο κατηγορίας 5 ο τυφώνας μέγιστης έντασης.

Ο τυφώνας Κατρίνα ξεκίνησε ως τροπική καταιγίδα, η οποία σχηματίστηκε πάνω από τις Μπαχάμες στις 24 Αυγούστου 2005 και στη συνέχεια άρχισε να κινείται νοτιοανατολικά της Φλόριδα στον Ατλαντικό Ωκεανό. Στις 25 Αυγούστου 2005 λίγες ώρες πριν πλήξει την περιοχή κοντά στο Μαϊάμι της Φλόριδα, ο Κατρίνα αναβαθμίστηκε σε τυφώνα κατηγορίας 1 στην κλίμακα Saffir-Simpson και προκάλεσε σημαντικές υλικές ζημιές και την απώλεια 10 ανθρώπων. Στη συνέχεια ο τυφώνας αποδυναμώθηκε για να φτάσει στον κόλπο του Μεξικού στις 26 Αυγούστου ως τροπική καταιγίδα. Ωστόσο, γρήγορα αναβαθμίστηκε πάλι σε καθεστώς τυφώνα, καθώς άρχισε να προσεγγίζει νοτιοανατολικά την πολιτεία της Λουϊζιάνα. Στις 28 Αυγούστου 2005 η ένταση του τυφώνα κορυφώθηκε φτάνοντας την κατηγορία 5 της κλίμακας Saffir-Simpson με μέγιστη ταχύτητα ανέμου 280 km/h. Ξημερώματα στις 29 Αυγούστου 2005, ο τυφώνας Κατρίνα έπληξε για δεύτερη φορά την ευρύτερη περιοχή της Νέας Ορλεάνης στην τοποθεσία Μπούρας (Buras). Σύμφωνα με το Εθνικό Κλιματολογικό Κέντρο (National Climatic Data Center – NCDC) η ταχύτητα ανέμου του τυφώνα είχε ήδη μειωθεί ραγδαία και ο τυφώνας προσεδάφιστηκε με ένταση κατηγορίας 3 και με μέγιστη ταχύτητα ανέμου 200 km/h [FEMA 2006a]. Στη συνέχεια, ο τυφώνας Κατρίνα κατευθύνθηκε προς τα βόρεια κατά μήκος της ακτογραμμής της Λουϊζιάνα θέτοντας την πόλη της Νέας Ορλεάνης υπό τις καταστροφικές συνέπειες του πλημμυρικού κύματος και των θυελλωδών ανέμων.

Το μέγεθος της καταστροφής που προκλήθηκε από τον τυφώνα Κατρίνα δεν δικαιολογείται πλήρως από το επίπεδο έντασης του τυφώνα (επίπεδο κατηγορίας 3). Η ένταση κατηγορίας 5, που είχε ο τυφώνας 24 h πριν την προσεδάφιση, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της επικείμενης καταστροφής. Παρόλο που η ταχύτητα του ανέμου του τυφώνα μειώθηκε σημαντικά πριν την προσεδάφιση, το πλημμυρικό κύμα που προκλήθηκε φαίνεται να διατήρησε ένα επίπεδο ενέργειας πλησιέστερο σε τυφώνα κατηγορίας 5. Με άλλα λόγια, το κύμα δεν μπόρεσε να χάσει ενέργεια με τον ίδιο ρυθμό που μειώθηκε αντίστοιχα η ταχύτητα του ανέμου και επιπλέον το μικρό πλάτος και το σχήμα της ακτογραμμής συνέβαλαν στη διατήρηση υψηλής στάθμης του πλημμυρικού κύματος. Τελικά το πλημμυρικό κύμα ξεπέρασε σε ύψος τα 7.5 m με επίπεδο αναφοράς το North American Vertical Datum of 1988 (NAVD88), ενώ η μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή ύψους πλημμυρικού κύματος ήταν τα 11.5 m [FEMA 2006a].

Ο τυφώνας Κατρίνα δεν ήταν ο πρώτος τυφώνας που έπληξε την ευρύτερη περιοχή στον κόλπο του Μεξικού, ήταν όμως ο καταστρεπτικότερος. Στην πρόσφατη ιστορία της η νοτιοανατολική Λουϊζιάνα και η ακτογραμμή του Μισισιπή χτυπήθηκε από τυφώνες, από τους οποίους οι δυσμενέστεροι ήταν ο τυφώνας Άντριου (Andrew), ο τυφώνας Μπέτσι (Betsy) και ο τυφώνας Καμίλ (Camille). Ο τυφώνας Άντριου, κατηγορίας 5, το 1992 κατέστρεψε πάνω από 25 000 σπίτια και προκάλεσε ζημιές σε περισσότερα από 100 000 σπίτια [FEMA 2006a]. Στον Πίνακα 11-1 συγκρίνονται οι συνέπειες του τυφώνα Κατρίνα με τους τυφώνες Μπέτσι και Καμίλ.

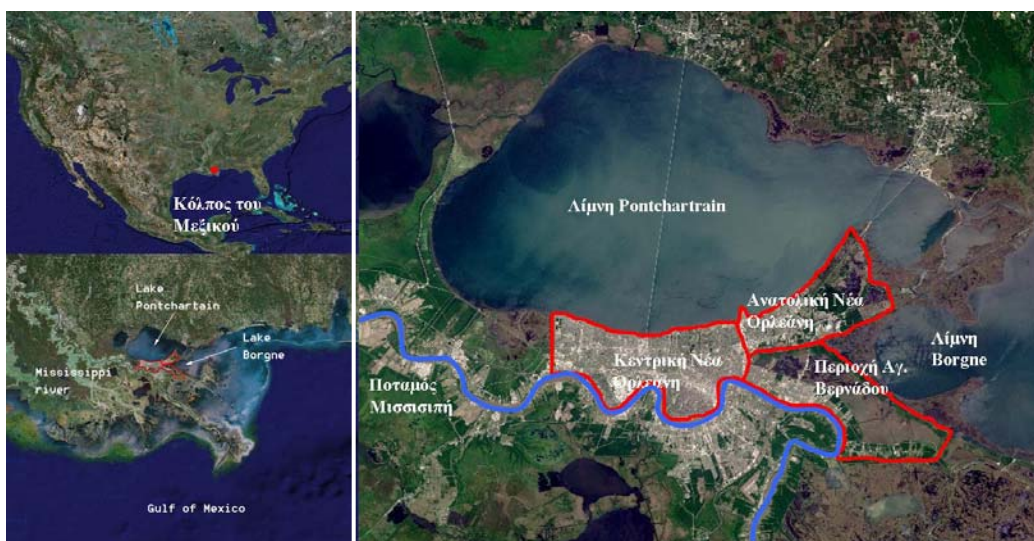
Πίνακας 11-1. Σύγκριση μεγέθους συνεπειών μεταξύ των τυφώνων Κατρίνα, Μπέτσι και Καμιλ

Τυφώνας	Έτος	Κατηγορία τυφώνα	Μέγιστο ύψος πλημμυρικού κύματος (ft)	Θύματα	Κόστος σε δισεκατ. US\$ (τιμές 2005)	Αριθμός κατεστραμμένων κατοικιών
Μπέτσι	1965	3	16	76	10 - 12	164 000
Καμιλ	1969	5	25	256	7	19577
Κατρίνα	2005	3	28	> 1800	125	> 300 000

### 11.1.2 Συνθήκες πλημμύρας λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης

Η πόλη της Νέας Ορλεάνης βρίσκεται στο δέλτα του ποταμού Μισισσιπή μεταξύ του ποταμού Μισισσιπή νότια, της λίμνης Ποντσαρτρέιν (Pontchartrain) βόρεια και της λίμνης Μποργν (Borgne) δυτικά, η οποία επικοινωνεί με τον κόλπο του Μεξικού. Η πόλη και τα προάστια της αποτελούν τη μητροπολιτική περιοχή της Νέας Ορλεάνης, η οποία βρίσκεται κατά ένα μεγάλο μέρος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και συνεπώς περιτοιχίζεται από ένα δίκτυο αντιπλημμυρικών αναχωμάτων. Η γεωγραφική αυτή θέση καθιστά την πόλη της Νέας Ορλεάνης εξαιρετικά ευάλωτη σε πλημμύρες από τυφώνα, υπερχειλίση ποταμού, ραγδαία βροχόπτωση ή στη χειρότερη περίπτωση σε πλημμύρες από συνδυασμό των τριών παραπάνω φαινομένων.

Η μητροπολιτική περιοχή της Νέας Ορλεάνης αποτελείται από τρεις υποπεριοχές (polders): την Κεντρική υποπεριοχή (Central polder), την Ανατολική υποπεριοχή (New Orleans East polder) και την υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου (St. Bernard polder). Ως «υποπεριοχή» (polder) ορίζεται η περιοχή σε χαμηλό υψόμετρο που περιτοιχίζεται από ένα κλειστό δίκτυο αντιπλημμυρικών αναχωμάτων σχήματος «δαχτυλιδιού». Συνήθως ένα μεγάλο μέρος μίας υποπεριοχής βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας νερού των υδάτινων σωμάτων που την περιτοιχίζουν. Η Εικόνα 11-1 απεικονίζει τη γεωγραφική θέση της μητροπολιτικής περιοχής της Νέας Ορλεάνης στον παγκόσμιο χάρτη και τις τρεις υποπεριοχές που την απαρτίζουν.



Εικόνα 11-1. Η γεωγραφική θέση της μητροπολιτικής περιοχής και των τριών υποπεριοχών της Νέας Ορλεάνης

Παρόλο που το «μάτι» του τυφώνα δεν έπληξε ακριβώς την πόλη της Νέας Ορλεάνης, προκάλεσε τεράστιες υλικές καταστροφές σε όλο το νοτιοανατολικό της τμήμα. Καθώς το «μάτι» του τυφώνα κινήθηκε προς τα βορειοανατολικά της πόλης το πρωί της 29<sup>ης</sup> Αυγούστου ισχυροί άνεμοι άρχισαν να πνέουν από το βορρά στη λίμνη Ποντσαρτρέιν. Με το βάθος ύψος των κυμάτων να είναι ήδη μεγάλο στη λίμνη, η πρόσθετη πίεση από τους ισχυρούς βόρειους ανέμους επιβάρυναν περισσότερο το κλειστό δίκτυο αντιπλημμυρικών αναχωμάτων της πόλης.

Στο κεντρικό τμήμα της πόλης που ανήκει η Κεντρική υποπεριοχή, η πλημμύρα προκλήθηκε κυρίως από αστοχία κατά μήκος των προστατευτικών τοίχων των βασιικών αποστραγγιστικών καναλιών της πόλης, τα οποία καταλήγουν στην λίμνη Ποντσαρτρέιν. Τα κανάλια αυτά υπό κανονικές συνθήκες αποχετεύουν το νερό από τις υψομετρικά χαμηλές περιοχές της πόλης (που βρίσκονται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια νερού της λίμνης) στα αναλυτικά συγκροτήματα στις όχθες της λίμνης Ποντσαρτρέιν. Κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος τα αποστραγγιστικά κανάλια υπερχείλισαν και οι προστατευτικοί τοίχοι σταδιακά κατέρρευσαν αφήνοντας το νερό να πλημμυρίσει μεγάλα τμήματα της πόλης.

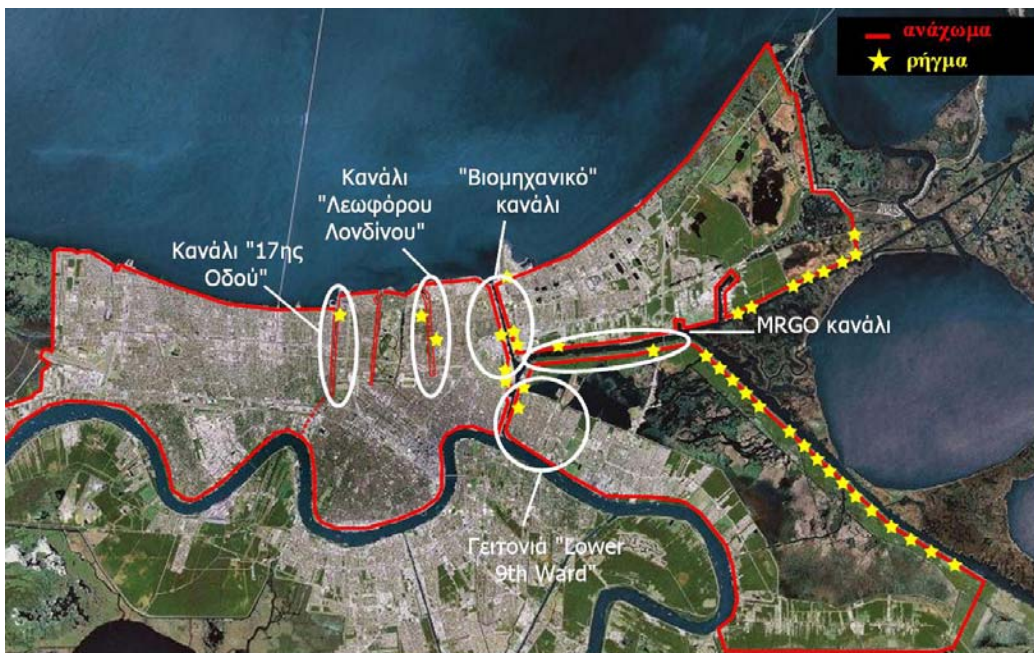
Σύμφωνα με τις μαρτυρίες και τις επιτόπιες έρευνες από το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ [IPET 2007b], σχηματίστηκαν λίγα πρωτεύοντα και ένας μεγάλος αριθμός δευτερευόντων ρηγμάτων και αστοχιών σε αντιπλημμυρικά αναχώματα και προστατευτικούς τοίχους. Τα πρωτεύοντα ρήγματα σχηματίστηκαν κατά μήκος του «βιομηχανικού καναλιού» (Industrial canal), του «καναλιού της 17<sup>ης</sup> Οδού» (17<sup>th</sup> Street canal) και του «καναλιού της λεωφόρου του Λονδίνου» (London Avenue canal) (βλέπε Εικόνα 11-2). Το μεγαλύτερο κομμάτι της Κεντρικής υποπεριοχής πλημμύρισε με ραγδαίο ρυθμό ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης από την κατάρρευση των προστατευτικών τοίχων κατά μήκος των αποστραγγιστικών καναλιών. Επιπλέον, ένα πλημμυρικό κύμα από τη λίμνη Ποντσαρτρέιν υπερπήδησε ένα τμήμα του μετώπου του βόρειου αντιπλημμυρικού αναχώματος και πλημμύρισε τμήμα της κεντρικής περιοχής της πόλης.

Στο ανατολικό τμήμα της πόλης που ανήκουν η Ανατολική υποπεριοχή και η υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου η πλημμύρα προκλήθηκε κυρίως από αστοχία των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων. Συγκεκριμένα η υπερπήδηση μεγάλης διάρκειας και η γεωτεχνική αστοχία λόγω διάβρωσης της θεμελίωσης από τις δυναμικές πιέσεις των πλημμυρικών κυμάτων ήταν οι βασικές αιτίες αστοχίας των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων.

Κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, το «κανάλι εξόδου του ποταμού Μισσισιπή» (Mississippi River Gulf Outlet – MRGO) διοχέτευε νερό μέσω του «βιομηχανικού καναλιού» από τη λίμνη Μποργν (Borgne) προς το εσωτερικό της πόλης. Το γεγονός αυτό είχε ως άμεσο αποτέλεσμα να υπερχείλσει το «βιομηχανικό κανάλι» και κατά συνέπεια το πλημμυρικό νερό να υπερπηδήσει και σταδιακά να ρηγματώσει τα αναχώματα της Ανατολικής υποπεριοχής (βλέπε Εικόνα 11-2).

Επίσης, κατά τη διάρκεια της πλημμύρας η γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου, αμέσως βρέθηκε κατάντη δύο ειδικαμένων πρωτεύοντων ρηγμάτων, με αποτέλεσμα να ισοπεδωθεί από την ορμή του πλημμυρικού κύματος κατά την αστοχία των αναχωμάτων. Η Ανατολική υποπεριοχή πλημμύρισε σταδιακά σε σύγκριση με την υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου λόγω του μεγάλου αριθμού μικρών ρηγμάτων στο κλειστό δίκτυο των αναχωμάτων της.





Εικόνα 11-2. Θέσεις κύριων ρηγμάτων και αστοχιών στο δίκτυο αναχωμάτων και τοιχών της πόλης της Νέας Ορλεάνης

Αλμυρό νερό συνέχισε να ρέει στην πόλη για τρεις μέρες μέχρι που η στάθμη πλημμύρας εξισώθηκε με τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στη λίμνη. Η έκταση της πλημμύρας κάλυψε τρεις υποπεριοχές της πόλης: την Κεντρική υποπεριοχή, την Ανατολική υποπεριοχή και την υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου. Η ολική έκταση της πλημμύρας εκτιμήθηκε περίπου στα 260 km<sup>2</sup> και σε ορισμένες θέσεις η πλημμύρα ξεπέρασε τα 4 m βάθος νερού [FEMA 2006a]. Περίπου 40 μέρες διήρκησε η άντληση των πλημμυρικών νερών από την πόλη. Η προσομοίωση των συνθηκών πλημμύρας λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 12.1 της διατριβής.

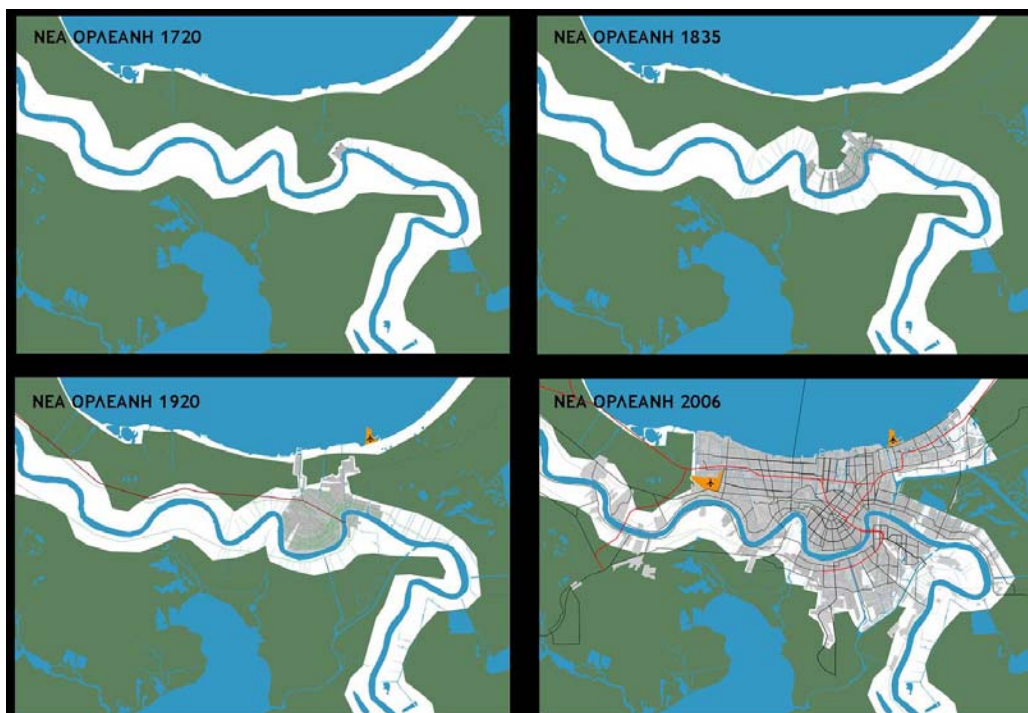
## 11.2 Δομημένο περιβάλλον

Το υποκεφάλαιο αυτό αναφέρεται αρχικά στη σύνθεση του αστικού ιστού της πόλης για την κατανόηση της χωρικής κατανομής της άμεσης ζημιάς στις πλημμυρόπληκτες κατοικίες στην πόλη της Νέας Ορλεάνης και στη συνέχεια διακρίνει ποιοτικά χαρακτηριστικά κατασκευής της κατοικίας στην πόλη.

Η επέκταση του αστικού ιστού της πόλης σε περιοχές που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας βασίζεται ιστορικά στη λανθασμένη εντύπωση των κατοίκων ότι το κλειστό περιμετρικό δίκτυο αντιπλημμυρικών αναχωμάτων μπορεί να προστατεύσει πλήρως την πόλη από πλημμύρα. Σημειώνεται, ότι το δίκτυο αυτό είναι πιστοποιημένο ως προς τη μελέτη και την κατασκευή από το Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ (USACE) και αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια πολλών δεκαετιών ξεκινώντας από το 1920. Αυτή η λανθασμένη υπόθεση οδήγησε σε πολεοδομικές ρυθμίσεις που επέτρεπαν τη δόμηση σε περιοχές υψομετρικά χαμηλότερες από την επιφάνεια της λίμνης, χωρίς ωστόσο να προβλέπεται η πιθανότητα υπερχειλίσις του ποταμού Μισισσιπή ή της παράκτιας πλημμύρας από την λίμνη (βλέπε Εικόνα 11-3). Επιπλέον, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του δικτύου αναχωμάτων παρατηρήθηκε μία σημαντική αλλαγή στην πρακτική δόμησης μίας κατοικίας στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Ιστορικά, η πρακτική κατασκευής κατοικίας περιλάμβανε την υπερύψωση του ισόγειου του κτηρίου μερικά ft πάνω από το έδαφος. Όμως μετά την κατασκευή του δικτύου αναχωμάτων οι περισσότερες κατοικίες που χτίστηκαν είτε θεμελιώθηκαν πάνω σε πλάκια κοιτόστρωσης είτε ανυψώθηκαν ελάχιστα πάνω από το έδαφος λόγω ημιυπόγειων χώρων (crawlspac). Αυτές



οι πρακτικές κατασκευής συμφωνούν με τους περιορισμούς στους όρους δόμησης που αντιστοιχούν σε αντιπλημμυρική προστασία (έναντι πλημμύρας) με περίοδο επαναφοράς 100 έτη. Όμως ο μόνος τύπος πλημμύρας που λήφθηκε υπόψη στους περιορισμούς δόμησης ήταν η πλημμύρα λόγω ανεπάρκειας αποχετευτικού συστήματος όμβριων υδάτων. Συνεπώς, η επέκταση της πόλης σε περιοχές που βρίσκονται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης, η αλλαγή στην πρακτική κατασκευής κατοικίας και η γενική καθίζηση της ευρύτερης περιοχής λόγω δέλτα του Μισισιπή συνέβαλαν συνδυαστικά στο μέγεθος της καταστροφής του δομημένου περιβάλλοντος κατοικίας στην πόλη [FEMA 2006a].



Εικόνα 11-3. Η επέκταση της πόλης της Νέας Ορλεάνης στην πρόσφατη ιστορία (Πηγή: FEMA 2006a)

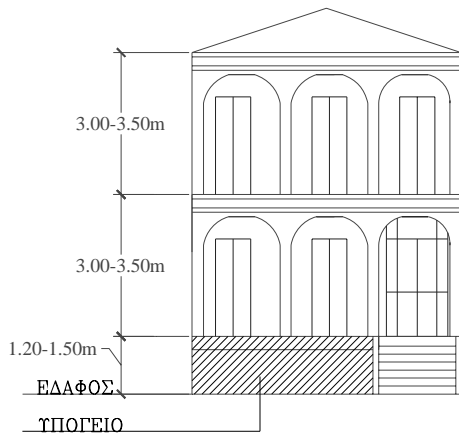
### 11.2.1 Τύποι κατοικίας

Οι περισσότερες πλημμυρόπληγτες κατοικίες στην πόλη της Νέας Ορλεάνης είτε έχουν κατασκευαστεί πάνω σε ημιυπόγειους χώρους είτε έχουν θεμελιωθεί πάνω σε κοιτόστρωση και φέρουν ξύλινους τοίχους με επένδυση από οπτοπλινθοδομή. Η δεύτερη περίπτωση κατασκευής είναι πρόσφατη και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, εντοπίζεται σε περιοχές που ανήκουν στην επέκταση της πόλης και βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι περιοχές αυτές ανήκουν κυρίως στην Ανατολική υποπεριοχή, στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου και στο βόρειο τμήμα της Κεντρικής υποπεριοχής. Στην Κεντρική υποπεριοχή υπάρχουν ωστόσο και πολλές πληγείσες μονοκατοικίες που έχουν χτιστεί με την προγενέστερο τρόπο κατασκευής των αρχών του περασμένου αιώνα. Επομένως, τα ισόγεια τους είναι υπερυψωμένα κατά 4 - 5 ft από το έδαφος. Σημειώνεται ότι οι κατοικίες αυτές έπαθαν μικρότερη άμεση, πλημμυρική ζημιά, σε σύγκριση με τις πιο πρόσφατα κατασκευασμένες κατοικίες [FEMA 2006a]. Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, διακρίθηκαν οι παρακάτω τύποι κατοικίας ως προς τον τρόπο κατασκευής στην πόλη της Νέας Ορλεάνης:

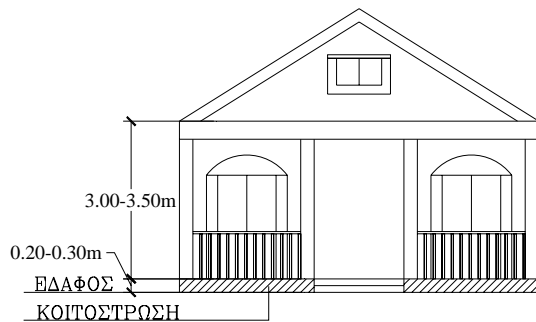
- Μονοκατοικία αποικιοκρατικής εποχής. Πρόκειται για υπερυψωμένη κατασκευή αρκετά ft πάνω από το έδαφος με υλικό κατασκευής την οπτοπλινθοδομή ή το ξύλο.

- Μονοκατοικία σύγχρονης εποχής. Πρόκειται για κατασκευή θεμελιωμένη σε πλάκα κοιτόστρωσης, με ξύλινους τοίχους που μπορεί να φέρουν επένδυση οπτοπλινθοδομής.
- Μονοκατοικία σύγχρονης εποχής με ημιυπόγειο χώρο. Πρόκειται για κατασκευή ελάχιστα υπερυψωμένη από το φυσικό έδαφος, με ξύλινους τοίχους που μπορεί να φέρουν επένδυση οπτοπλινθοδομής.

Ακολουθούν σκαριφήματα και αντίστοιχες φωτογραφίες των χαρακτηριστικών τύπων κατοικίας στην πόλη της Νέα Ορλεάνης, οι οποίες λήφθηκαν από τη συγγραφέα κατά την επιτόπια επίσκεψη της στις πλημμυρό-πληγες περιοχές στην πόλη της Νέας Ορλεάνης το 2008, στο πλαίσιο εκπαιδευτικής εκδρομής με το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ.



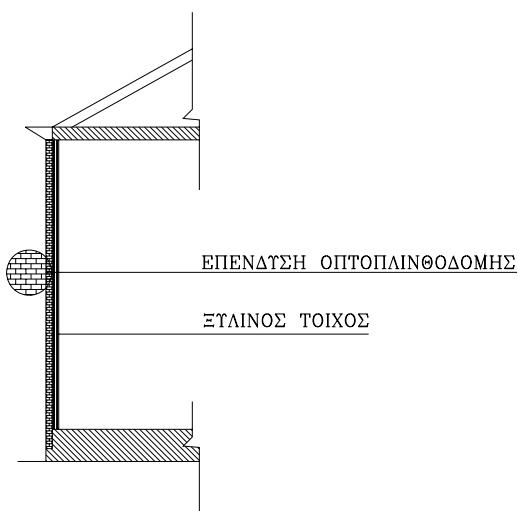
Εικόνα 11-4. Τυπική διώροφη μονοκατοικία, υπερυψωμένου ισογείου, αποικιοκρατικής εποχής



Εικόνα 11-5. Τυπική ισόγεια μονοκατοικία, θεμελιωμένη σε πλάκα κατάστρωσης, σύγχρονης εποχής



Εικόνα 11-6. Τυπική ισόγεια κατοικία, υπερυψωμένη ελάχιστα λόγω ημιυπογειου χώρου, σύγχρονης εποχής,



Εικόνα 11-7. Τομή σύγχρονης ισόγειας κατοικίας, κατασκευασμένη από ξύλινους τοίχους με επένδυση οπτοπλινοδομής

### 11.3 Δεδομένα ζημιές

Η ποιοτική περιγραφή της άμεσης πλημμυρικής ζημιές λόγω του τυφώνα Κατρνα στο δομημένο περιβάλλον κατοικίας βασίστηκε σε δημοσιεύσεις της Ομάδας Αξιολόγησης Επιπτώσεων (MAT). Η ομάδα MAT συστάθηκε από τη FEMA στις πολιτείες της Αλαμπάμα, Λουιζιάνα και Μισισιπή με σκοπό να αξιολογήσει (α) τη συμπεριφορά των κτηρίων κατά τη διάρκεια του τυφώνα Κατρίνα και (β) την επάρκεια των όρων δόμησης, των πρακτικών κατασκευής και των υλικών κατασκευής των κτηρίων στις πληγείσες περιοχές. Η MAT διεξήγαγε έρευνες πεδίου από ξηρά και αέρα καλύπτοντας πληγείσες περιοχές κατά μήκος του κόλπου του Μεξικού στην πολιτεία του Μισισιπή και την πόλη της Νέας Ορλεάνης στην πολιτεία της Λουιζιάνα.

Σε όλες τις πλημμυρόπληκτες περιοχές παρατηρήθηκε ότι η υπερύψωση ενός κτηρίου από το φυσικό έδαφος έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης πλημμυρικής ζημιές σε αυτό. Όσο πιο ψηλά ήταν υπερυψωμένο ένα κτήριο τόσο πιο μικρή ήταν η άμεση πλημμυρική ζημιές που υπέστη. Όπως έχει ήδη σημειωθεί στην πόλη της Νέας Ορλεάνης οι υπερυψωμένες κατοικίες λόγω ημιυπόγειων χώρων έπαθαν μικρότερη ζη-

μιά σε σύγκριση με κατοικίες θεμελιωμένες πάνω σε πλάκια κατάστρωσης. Εξαιρέση όμως, στην παρατήρηση αυτή αποτελεί η γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward», η οποία έπαθε εκτεταμένη άμεση ζημιά στο δομημένο περιβάλλον κατοικίας παρόλο που αποτελεί μια περιοχή που βρίσκεται υψομετρικά αρκετά πιο πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης [FEMA 2006a].

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της ομάδας MAT διακρίθηκαν και οι δυο τύποι άμεσης πλημμυρικής ζημιών στις πληγείσες κατοικίες της Νέας Ορλεάνης, δηλαδή η δομική ζημιά (ή βλάβη) και η μη δομική ζημιά. Γενικά η δομική ζημιά σε κατοικίες παρατηρήθηκε τοπικά σε συγκεκριμένες περιοχές, ενώ η μη δομική ζημιά καταγράφηκε εκτεταμένα στην πλειοψηφία των πληγεισών κατοικιών. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η άμεση πλημμυρική ζημιά σε κτήρια άλλης χρήσης υπήρξε παρόμοια με αυτή στις κατοικίες. Ωστόσο, η βάση δεδομένων ζημιών που αναπτύχθηκε τελικά και αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο, αναφέρεται αποκλειστικά σε μονοκατοικίες και διπλοκατοικίες.

### **Δομική Ζημιά**

Η δομική ζημιά καταγράφηκε τοπικά σε συγκεκριμένες περιοχές της πόλης όπου παρατηρήθηκαν εξαιρετικά δυσμενείς πλημμυρικές συνθήκες. Επομένως, δομική ζημιά παρατηρήθηκε γενικά στην Ανατολική υποπεριοχή και στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου, όπου η αστοχία του «βιομηχανικού καναλιού» και των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων προκάλεσε εκτεταμένη πλημμύρα. Περισσότερο υπέφερε η γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward», η οποία βρισκόταν αμέσως κατάντη δυο εκτεταμένων ρηγμάτων σε αντιπλημμυρικό ανάχωμα κατά μήκος του «βιομηχανικού καναλιού». Οι περισσότερες κατοικίες σε αυτή τη γειτονιά καταστράφηκαν είτε επειδή είχαν μετακινηθεί τελείως από τα θεμέλια τους και είχαν παρασυρθεί μερικά μέτρα μακριά είτε επειδή είχαν καταρρεύσει από τη σφοδρότητα της δράσης των πλημμυρικών κυμάτων.

Επίσης, οι κατοικίες που βρίσκονταν ακριβώς κατάντη των πρωτευόντων ρηγμάτων στον προστατευτικό τοίχο κατά μήκος «του καναλιού της 17<sup>ης</sup> Οδού» υπέστησαν σοβαρές βλάβες, όπως είναι η διάβρωση κοιτόστρωσης λόγω ισχυρών υδροδυναμικών δυνάμεων. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση οι βλάβες δεν ήταν εκτεταμένες, αφού η ένταση των υδροδυναμικών δυνάμεων μπορεί να διατηρηθεί υψηλή σε ακτίνα λίγων δεκάδων μέτρων από το ρήγμα. Σοβαρές βλάβες παρατηρήθηκαν επιπλέον, σε κατοικίες που βρίσκονταν θεμελιωμένες σε σαθρά εδάφη. Ωστόσο, οι βλάβες αυτές ήταν τοπικής φύσεως και δεν οδήγησαν σε άμεση κατάρρευση της κατοικίας. Τέλος, πολλές από τις μονοκατοικίες και τις διπλοκατοικίες που ήταν θεμελιωμένες σε βάρθα από οπτοπλινθοδομή υπέστησαν σοβαρές δομικές ζημιές. Η αστοχία των βάθρων που διαπιστώθηκε ήταν αποτέλεσμα είτε της περιστροφής τους λόγω ανεπαρκούς βύθισης στο έδαφος είτε της αποκόλλησής τους από την ανωδομή λόγω ανεπαρκούς ενίσχυσης της σχετικής σύνδεσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η δομική ζημιά σε κατοικίες ποικίλλει ανάλογα με τη σφοδρότητα του πλημμυρικού κύματος, το μέγιστο βάθος νερού και τον τύπο κατασκευής και θεμελίωσης της κατοικίας. Μέχρι τώρα έγινε αναφορά σε κατοικίες που ανήκουν στους τύπους κατοικίας που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 11.2.1, δηλαδή σε κατασκευές από ξύλο ή από οπτοπλινθοδομή. Γενικά, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή με μεταλλικό σκελετό δεν υπέστησαν δομική ζημιά. Πολύ συγκεκριμένες εξαιρέσεις που εκτέθηκαν άμεσα στη δράση πλημμυρικών κυμάτων παρουσίασαν περιορισμένη μη δομική ζημιά στο περίβλημα κτηρίου και τον κινητό εξοπλισμό.

### **Μη δομική ζημιά**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτεταμένη μη δομική ζημιά παρατηρήθηκε σε περιοχές της Νέας Ορλεάνης που παρέμειναν για μεγάλη διάρκεια κάτω από το νερό. Οι περιοχές της πόλης που βρίσκονταν εντός του κλειστού περιμετρικού δικτύου αναχωμάτων δεν ήταν προσβάσιμες στους κατοίκους για περίπου 3 εβδομάδες

λόγω της μη απόσυρσης των νερών της πλημμύρας. Ως άμεση συνέπεια, το εσωτερικό των περισσότερων πλημμυρόπληκτων κατοικιών υπέστη μη αναστρέψιμη μη δομική ζημιά. Τυπικές ενδείξεις αυτού του τύπου ζημιών είναι η καταστροφή της μόνωσης, των δαπέδων, των επιχρισμάτων και των κουφωμάτων καθώς και όλου του οικιακού εξοπλισμού. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίστηκε μούχλα, της οποίας η ανάπτυξη ποίκιλε από μικρή έως εκτεταμένη ανάλογα με το βάθος του νερού που εισχώρησε στο εσωτερικό της κατοικίας, τον τύπο του επιχρίσματος και το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την άντληση των νερών. Επιπρόσθετα, το νερό της πλημμύρας στο εσωτερικό των κατοικιών προκάλεσε χημικές και βακτηριολογικές μολύνσεις σε πορώδη υλικά κατασκευής.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, παρόλο που ο τυφώνας Κατρίνα είχε ως αποτέλεσμα εξαιρετικής έντασης πλημμύρα και ανέμους, η καταστροφή ή η βλάβη που καταγράφηκε στις μονοκατοικίες και διπλοκατοικίες στην πόλη, θεωρήθηκε ως αποτέλεσμα αποκλειστικά και μόνο της πλημμύρας. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της Ομάδας Αξιολόγησης Επιπτώσεων (MAT), ακόμη και εάν είχε συμβεί ζημιά μόνο λόγω της επίδρασης του ανέμου σε κάποιες κατοικίες πριν τη πλημμύρα, οι ενδείξεις σβήστηκαν με τη δράση των πλημμυρικών κυμάτων. Εκτεταμένη καταστροφή σε δομημένο περιβάλλον λόγω ανέμου προκλήθηκε κυρίως σε περιοχές κατά μήκος της ακτογραμμής του κόλπου του Μεξικού. Επιπλέον, η ίδια ομάδα μελέτης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα του ανέμου λόγω τυφώνα σε ηπειρωτικές περιοχές, όπως είναι η πόλη της Νέας Ορλεάνης ήταν σαφώς μικρότερης έντασης από την ταχύτητα σχεδιασμού για φορτίο ανέμου, σύμφωνα με την οποία κατασκευάστηκαν οι πληγείσες κατοικίες.

### 11.3.1 Βάση δεδομένων

Η δημοτική αρχή της πόλης της Νέας Ορλεάνης δημιούργησε μια ψηφιακή βάση δεδομένων ζημιών σε κατοικίες λόγω του τυφώνα Κατρίνα με σκοπό να εξυπηρετήσει πιο αποτελεσματικά τους πληγέντες κατοίκους στη διαδικασία χορήγησης αποζημίωσης για την αποκατάσταση των κατοικιών τους. Η πληροφορία αυτή αρχειοθετήθηκε ψηφιακά σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) και παραχωρήθηκε για δημόσια πρόσβαση στην ιστοσελίδα της πόλης της Νέας Ορλεάνης τον Μάρτιο του 2008 (<http://gisweb.cityofno.com/cnogis/dataportal.aspx>). Τα δεδομένα ζημιών των κατοικιών καταχωρήθηκαν σε περιβάλλον ΓΠΣ, χρησιμοποιώντας τα προγράμματα ArcView 9.1 και ArcView 9.2 σε συνδυασμό με την ψηφιακή βάση των διευθύνσεων των κατοικιών των ΗΠΑ. Η επεξεργασία της βάσης έγινε από τους Ezra Boyd και Carol Friedland, ερευνητές του Κρατικού Πανεπιστημίου της Λουϊζιάνα και μετά από διορθώσεις και συμπληρώσεις το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων οριστικοποιήθηκε τον Δεκέμβριο του 2007. Η βάση δεδομένων περιέχει πληροφορία για την άμεση πλημμυρική ζημιά για περίπου 95 000 πληγείσες κατοικίες της πόλης της Νέας Ορλεάνης και καλύπτει την έκταση της Κεντρικής και Ανατολικής υποπεριοχής, ενώ από την υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου, καλύπτει μόνον την έκταση της γειτονιάς «Lower 9<sup>th</sup> Ward». Πληροφορία για άλλες περιοχές στην πολιτεία της Λουϊζιάνα, τις οποίες επίσης έπληξε ο τυφώνας δεν περιλαμβάνεται στη βάση.

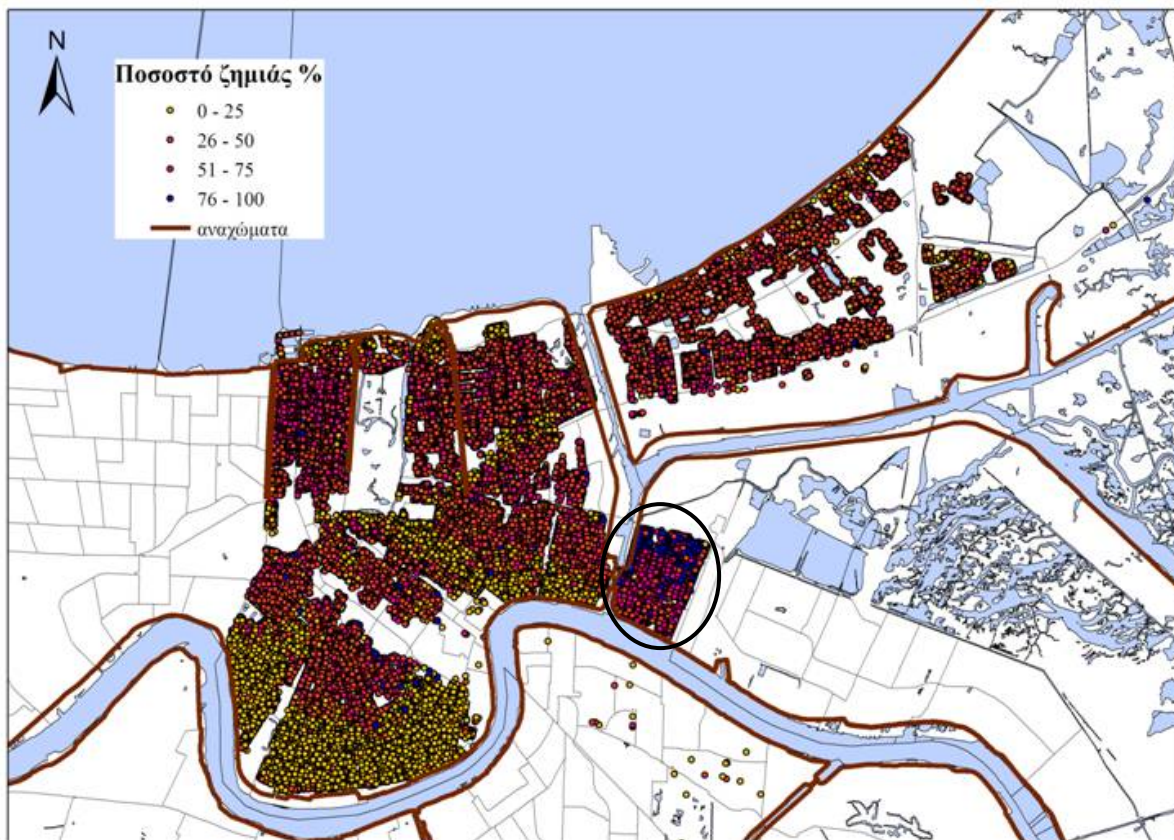
Διάφορες δημοσιευμένες εκθέσεις αναφέρονται σε οικονομικές εκτιμήσεις της άμεσης και έμμεσης πλημμυρικής ζημιών λόγω του τυφώνα Κατρίνα. Το υπουργείο Εσωτερικής Ασφάλειας [DHS 2006] συνέταξε λεπτομερείς πίνακες για να αξιολογήσει την έκταση της πλημμυρικής ζημιών στις κατοικίες λόγω των τυφώνων Κατρίνα, Ρίτα (Rita) και Βίλμα (Wilma). Η αρχή προστασίας και πρόληψης των ακτών της Λουϊζιάνα [LCpra 2006] δημοσίευσε μια τεχνική έκθεση που αφορούσε τον αντίκτυπο του τυφώνα στην οικονομία της Λουϊζιάνα για το έτος 2005. Οι Brinkmann και Ragas (2006) διερεύνησαν την οικονομική βιωσιμότητα της επισκευής ή ανακατασκευής πολλών πλημμυρόπληκτων κατοικιών στην Νέα Ορλεάνη. Ο Hallegatte (2008) παρουσίασε μία μελέτη εκτίμησης των έμμεσων πλημμυρικών ζημιών στην οικονομία της Λουϊζιάνα. Οι πα-



ραπάνω δημοσιεύσεις βασίστηκαν κυρίως στην εφαρμογή μοντέλων για την πρόβλεψη της ζημιάς. Ωστόσο, η βάση δεδομένων δεν συμπεριέλαβε καμία πληροφορία για την έμμεση πλημμυρική ζημιά.

Το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων ζημιάς αφορά μόνο στις πληγείσες μονοκατοικίες και περιλαμβάνει για κάθε πλημμυρόπληκτη κατοικία την ακόλουθη πληροφορία: τη γεωγραφική της θέση (διεύθυνση κατοικίας, κωδικός οικοδομικού τετραγώνου και γειτονιάς, ταχυδρομικός κώδικας και καρτεσιανές συντεταγμένες) και την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς. Στη βάση δεδομένων δεν συμπεριλήφθηκε πληροφορία για τα υλικά κατασκευής ή τον τύπο κατασκευής της κάθε πληγείσας κατοικίας. Δείγμα του περιεχομένου της βάσης δεδομένων διατίθεται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π11.1.

Η Εικόνα 11-8 δείχνει την χωρική κατανομή όλων των τιμών του ποσοστού ζημιάς της βάσης δεδομένων ζημιάς στην πόλη της Νέας Ορλεάνης, ταξινομημένες σε τέσσερις κλάσεις εύρους τιμών ποσοστού ζημιάς. Η βάση δεδομένων καλύπτει την πλειοψηφία των κατοικιών στην Κεντρική υποπεριοχή, στην Ανατολική υποπεριοχή και στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward». Από την Εικόνα 11-8 παρατηρείται ότι η πιο εκτεταμένη δομική ζημιά καταγράφηκε στην πλειοψηφία των μονοκατοικιών της γειτονιάς «Lower 9<sup>th</sup> Ward».



Εικόνα 11-8. Χωρική κατανομή των τιμών του ποσοστού ζημιάς που περιέχονται στη βάση δεδομένων

## 11.4 Αποτίμηση δεδομένων ζημιάς

Η αποτίμηση δεδομένων άμεσης ζημιάς που καταγράφηκαν και συλλέχθηκαν σε πλημμυρόπληκτες κατοικίες λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης υλοποιήθηκε με βάση το μέγεθος του ποσοστού ζημιάς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 7.2.2, το ποσοστό ζημιάς εκφράζεται γενικά, ως η απώλεια της αρχικής εμπορικής αξίας μιας ιδιοκτησίας, δηλαδή το κλάσμα του κόστους επισκευής ενός πλημμυ-

ρόπληκτου κτηρίου προς την αρχική εμπορική αξία του κτηρίου πριν την πλημμύρα (βλέπε εξίσωση (11.1)).

$$\text{Ποσοστό ζημιάς} = \frac{\text{Κόστος επισκευής πλημμυρόπληκτου κτηρίου}}{\text{Εμπορική αξία κτηρίου πριν την πλημμύρα}} \quad (11.1)$$

Υπενθυμίζεται ότι στο κόστος επισκευής δεν περιλαμβάνεται η άμεση ζημιά στο κινητό εξοπλισμό κτηρίου και επίσης ότι η αρχική εμπορική αξία κτηρίου είναι η αντικειμενική αξία ακινήτου προσαρμοσμένη στις τιμές της κτηματομεσιτικής αγοράς πριν το συμβάν της φυσικής καταστροφής.

Ωστόσο, ο τρόπος υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς δεν βασίστηκε στην εξίσωση (11.1), γνωστή και ως «Road Home Formula» για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Στην εξίσωση βασίστηκε η αποτίμηση με οικονομικούς όρους του κόστους επισκευής, δηλαδή με δεδομένη την τιμή του ποσοστού ζημιάς. Στο εδάφιο που ακολουθεί περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς και στο εδάφιο 11.4.2 ακολουθεί σχολιασμός για την αποτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς βάσει του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς».

### 11.4.1 Ποσοστό Ζημιάς

Η επίσημη έκθεση του Υπουργείου Κρατικής Ασφάλειας με τίτλο «Ανασκόπηση των δραστηριοτήτων του τυφώνα Κατρίνα» [DHS 2006] αναφέρει ότι το υπολογιστικό πρόγραμμα «Εκτιμητής της ουσιαστικής ζημιάς σε κατοικίες» (Residential Substantial Damage Estimator - RSDE) έπαιξε ουσιαστικό ρόλο στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς στις πληγείσες μονοκατοικίες της πόλης της Νέας Ορλεάνης.

Το πρόγραμμα RSDE αναπτύχθηκε από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Έκτακτων Αναγκών (FEMA) για την επιθεώρηση κατοικιών που έχουν υποστεί βλάβη από πλημμύρα. Το πρόγραμμα υπολογίζει το ποσοστό ζημιάς διακρίνοντας 16 κατηγορίες φερόντων και μη φερόντων στοιχείων μίας τυπικής κατοικίας. Από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της πλημμύρας λαμβάνεται υπόψη μόνο το βάθος νερού για την εκτίμηση της ζημιάς, το οποίο κατηγοριοποιείται στις εξής τρεις κλάσεις: 0 - 1 ft, 2 - 7 ft και > 8 ft. Ο Πίνακας 11-2 παρουσιάζει τα κριτήρια εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς για καθεμία από τις 16 κατηγορίες στοιχείων μονοκατοικίας με βάση την κλάση βάθους νερού και το συντελεστή βάρους για καθεμία κατηγορία.

Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα χρησιμοποιεί κλάσεις βάθους νερού, οι οποίες ίσως διαθέτουν υπερβολικά μεγάλο εύρος για να παρέχουν ακριβείς υπολογισμούς του ποσοστού ζημιάς για κάθε κατοικία [FEMA 2001, Skinner 2006]. Για παράδειγμα, μία μονοκατοικία που πλημμύρισε σε βάθος νερού ίσο με 2 ft μπορεί να εκτιμηθεί με το ίδιο ποσοστό ζημιάς που αντιστοιχεί σε κατοικία που πλημμύρισε σε βάθος νερού ίσο με 7 ft. Με αλλά λόγια, εάν για μία κατοικία που πλημμύρισε σε βάθος νερού μεταξύ 2 και 7 ft, ο επιθεωρητής της ζημιάς δεν έκανε τις απαραίτητες προσαρμογές στη μέθοδο υπολογισμού του RSDE, οι 11 κατηγορίες από τις 16 θα βαθμολογούνταν με ποσοστό ζημιάς 100%, το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα ολικό ποσοστό ζημιάς για την κατοικία πάνω από το κατώφλι του 50%. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σαφώς υπερτιμημένο, αλλά από τις επίσημες αρχές του Σώματος Μηχανικών Στρατού θεωρείται αποτέλεσμα υπέρ της ασφαλείας και κατά συνέπεια είναι προτιμότερο από την υποτίμηση της ζημιάς [Skinner 2006].

Πίνακας 11-2. Κριτήρια εκτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σύμφωνα με το πρόγραμμα RSDE

	Ποσοστό Ζημιάς %	Ποσοστό Ζημιάς %	Ποσοστό Ζημιάς %	Συντελεστής στάθμισης %
<b>Βάθος νερού (ft)</b>	<b>0 - 1</b>	<b>2 - 7</b>	<b>&gt; 8</b>	
<b>Στοιχεία κατοικίας</b>				
Θεμελίωση	0	0	0	16.9
Ανωδομή (σκελετός / πλήρωση)	0	0	0	18.5
Σκεπή	0	0	100	3.9
Μόνωση	25	100	100	3.2
Επίχρισμα στο εξωτερικό κατοικίας	2	10	12	6.2
Επίχρισμα στο εσωτερικό κατοικίας	25	100	100	8.7
Πόρτες / παράθυρα (εσωτερικό κατοικίας)	50	100	100	4.1
Στοιχεία από ξύλο στο εσωτερικό της κατοικίας	70	100	100	4.1
Μόνιμος οικιακός εξοπλισμός κατοικίας	100	100	100	1.2
Ντουλάπες	100	100	100	5.2
Δάπεδα	100	100	100	4.5
Υδραυλικές εγκαταστάσεις (εσωτερικό)	10	50	50	8
Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (εσωτερικό)	0	100	100	5.4
Εντοιχισμένες οικιακές συσκευές	50	100	100	2.5
Σύστημα κεντρικής θέρμανσης	45	100	100	4.2
Ελαιοχρωματισμοί (εσωτερικό)	100	100	100	3.4
Σύνολο				<b>100</b>
Ολικό ποσοστό ζημιάς	<b>26</b>	<b>51</b>	<b>55</b>	

Το μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1 (ή μεταξύ 0 % και 100 %). Ειδικά, η τιμή 50 % του ποσοστού ζημιάς έχει ιδιαίτερη βαρύτητα, καθώς ορίζει την έννοια της «ουσιαστικής ζημιάς». Ως «ουσιαστική ζημιά» ορίζεται η άμεση ζημιά που έχει υποστεί μία κατοικία, στην οποία το κόστος αποκατάστασης ισούται ή υπερβαίνει το 50 % της αρχικής εμπορικής αξίας της πριν την καταστροφή. Όταν το ποσοστό ζημιάς εκτιμηθεί κάτω από το κατώφλι της τιμής του 50 %, σημαίνει ότι στην πράξη ο ιδιοκτήτης δεν είναι υποχρεωμένος να ανακατασκευάσει την πληγείσα κατοικία, σύμφωνα με τους όρους δόμησης για αντιπλημμυρική προστασία που επιβάλλει το Εθνικό Πρόγραμμα Ασφάλισης έναντι Πλημμύρας [National



Flood Insurance Program (NFIP) 2009]. Το Εθνικό Πρόγραμμα Ασφάλισης έναντι Πλημμύρας είναι ένα ομοσπονδιακό πρόγραμμα, το οποίο δίνει στους ιδιοκτήτες κατοικιών των κοινοτήτων που συμμετέχουν κάλυψη ασφάλισης έναντι πλημμύρας με την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχες κοινότητες εφαρμόζουν τους όρους δόμησης για αντιπλημμυρική προστασία που ορίζει το πρόγραμμα NFIP. Σημείο-κλειδί στο πρόγραμμα NFIP αποτελεί το κατώφλι της τιμής της «ουσιαστικής ζημιάς». Όταν μία πληγείσα κατοικία βρίσκεται εντός των ορίων αυτών των κοινοτήτων και έχει αξιολογηθεί με κόστος αποκατάστασης πάνω από το 50 % της εμπορικής αξίας, οι κοινότητες είναι υποχρεωμένες να εξασφαλίσουν ότι η κατοικία θα ανακατασκευαστεί σύμφωνα με τους περιορισμούς δόμησης του NFIP. Στόχος του περιορισμού της «ουσιαστικής ζημιάς» είναι να αντικαταστήσει τις σοβαρά πληγείσες κατοικίες με αντιπλημμυρικές κατασκευές υπερυψωμένες επαρκώς από το έδαφος. Με δεδομένη την παραπάνω διαδικασία εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς, αναμένεται ότι οι τιμές του ποσοστού ζημιάς που είναι μικρότερες από 50 %, να υποδηλώνουν συνήθως μη δομική ζημιά στο εσωτερικό του κτηρίου, ενώ οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από 50 % να υποδηλώνουν κάποιο βαθμό βλάβης στο κτήριο.

Βάσει της διαδικασίας που τελικά εφαρμόστηκε για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων, η μέθοδος εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς ακολούθησε γενικά το πρόγραμμα RSDE, αλλά βασίστηκε ιδιαίτερα στις παρατηρήσεις από τις επιτόπιες επισκέψεις και επιθεωρήσεις των κατοικιών, από εξειδικευμένους μηχανικούς της FEMA. Επομένως, η διαδικασία εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς φαίνεται ότι σε μεγάλο βαθμό υπήρξε υποκειμενική, αφού εξαρτήθηκε άμεσα από την ικανότητα και την εμπειρία του επιθεωρητή να προσαρμόσει την καταγραφή της ζημιάς στις κατευθυντήριες αρχές του προγράμματος RSDE σε κάθε περίπτωση πλημμυρόπληκτης κατοικίας.

Επίσης, στη διαδικασία καταγραφής της ζημιάς υπήρξαν και οι αντικειμενικές δυσκολίες: (α) του εξαιρετικά μεγάλου πλήθους πληγείσων κατοικιών και (β) της αδυναμίας πρόσβασης στο εσωτερικό της πληγείσας κατοικίας, με αποτέλεσμα οι επιθεωρητές να βασίζονται πολλές φορές στην αξιολόγηση της ζημιάς σε ίχνη της στάθμης της πλημμύρας στο εξωτερικό της κατοικίας [Skinner 2006]. Επιπρόσθετα, για περιοχές που η επιτόπια επίσκεψη στις πληγείσες κατοικίες υπήρξε αδύνατη, επιστρατεύτηκαν τεχνικές φωτοερμηνείας δορυφορικών εικόνων για την καταγραφή της ζημιάς [Friedland 2009].

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες συντέλεσαν στο να υπερεκτιμηθεί περίπου το 1% του συνόλου των τιμών του ποσοστού ζημιάς που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων [Skinner 2006]. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε περίπου 6 400 προσφυγές στη δικαιοσύνη από ιδιοκτήτες κατοικιών, των οποίων οι κατοικίες είχαν εκτιμηθεί ότι ξεπερνούν σε ποσοστό ζημιάς το κατώφλι της τιμής του 50 %. Η επίσημη έκθεση επανεξέτασης των αμφισβητούμενων στοιχείων της βάσης δεδομένων που ακολούθησε το 2006 και συντάχθηκε από το γενικό επιθεωρητή R.L. Skinner, κατέληξε στο ότι υπάρχει βάση στην αμφισβήτηση της ακρίβειας των εκτιμώμενων ποσοστών ζημιάς για τις συγκεκριμένες πληγείσες κατοικίες. Σύμφωνα με την έκθεση αυτή, η επιθεώρηση που βασίζεται μόνο στο εξωτερικό του σπιτιού έχει αμφισβητήσιμα αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική οδηγία της FEMA σύμφωνα με την οποία το 51 % της εκτίμησης της ζημιάς θα πρέπει να βασίζεται στην εξέταση του εσωτερικού της κατοικίας. Ωστόσο, στο σύνολο τους, τα αποτελέσματα των επιθεωρήσεων των κατοικιών ως προς την καταγραφή της άμεσης ζημιάς και τον υπολογισμό της τιμής του ποσοστού ζημιάς θεωρήθηκαν έγκυρα από τις κρατικές αρχές. Συνεπώς, στη διατριβή χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων στην τελική μορφή του Δεκεμβρίου του 2007, αφού είχε υποστεί όλες τις συμπληρώσεις και τις επανεξετάσεις που έλαβαν χώρα μετά το τέλος των επιθεωρήσεων των κατοικιών, δηλαδή από το Μάρτιο του 2006.

### 11.4.2 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εκτίμησης του ποσοστού ζημιές

Η εκτίμηση με το μέγεθος «ποσοστό ζημιές» της άμεσης πλημμυρικής ζημιές σε κατοικίες λόγω του τυφώνα Κατρίνα είναι έντονα αμφισβητήσιμη σήμερα λόγω προβληματικών συνεπειών στη χορήγηση της κρατικής επιχορήγησης για την αποκατάσταση των πληγείσων κατοικιών. Σύμφωνα με πρόσφατα δημοσιεύματα στον τοπικό Τύπο της Νέας Ορλεάνης [The Times-Picayune 2009], οι κρατικές αποζημιώσεις στους πληγέντες κατοίκους δίνονται ανάλογα με την εμπορική αρχική αξία της κατοικίας τους (πριν την πλημμύρα) και την εκτίμηση του ποσοστού ζημιές σύμφωνα με την εξίσωση (11.1).

Συγκεκριμένα όταν το ποσοστό ζημιές εκτιμάται μεγαλύτερο του 50 %, δηλαδή η άμεση πλημμυρική ζημιές έχει χαρακτηριστεί «ουσιαστική ζημιές», θεωρείται ότι η πληγείσα κατοικία είναι πλήρως κατεστραμμένη και κατά συνέπεια η κρατική αποζημίωση ισούται με την εμπορική αρχική αξία της κατοικίας μείον τα έξοδα για τα ασφάλιστρα έναντι πλημμύρας. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα οι ιδιοκτήτες δυο πληγείσων κατοικιών με πανομοιότυπο κόστος αποκατάστασης της ζημιές λόγω διαφορετικής αξίας γης, να αποζημιωθούν τελείως διαφορετικά. Με άλλα λόγια με τη συγκεκριμένη μέθοδο εκτίμησης του ποσοστού ζημιές ζημιώνονται κυρίως οι ιδιοκτήτες κατοικιών, που, ενώ υπέστησαν σοβαρές βλάβες λόγω πλημμύρας, βρίσκονται σε υποβαθμισμένες, φτωχικές γειτονιές όπου η αρχική (πριν την πλημμύρα) εμπορική αξία των κατοικιών τους ήταν μικρή.

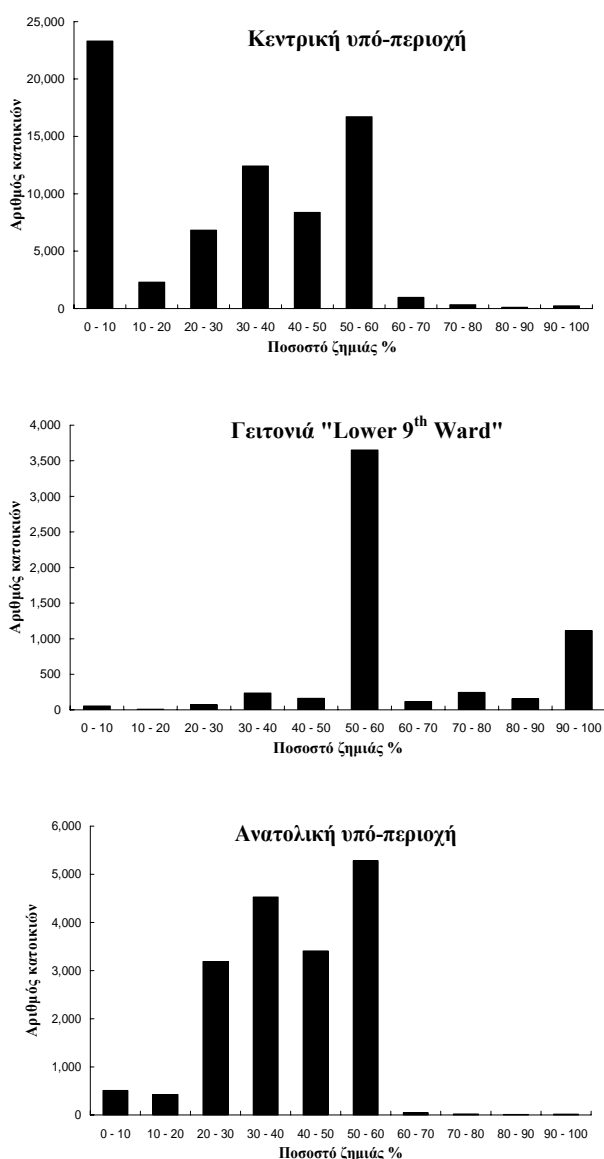
## 11.5 Στατιστική περιγραφή βάσης δεδομένων άμεσης ζημιές

Στις 2 Μαρτίου 2006, οι επιθεωρητές της FEMA ολοκλήρωσαν περίπου 95 000 καταγραφές άμεσης πλημμυρικής ζημιές και εκτίμησης του ποσοστού ζημιές σε μονοκατοικίες της πόλης της Νέας Ορλεάνης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας της βάσης δεδομένων ζημιές δίνονται στον Πίνακα 11-3 και τα γραφικά αποτελέσματα στην Εικόνα 11-9.

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή ποσοστού ζημιές για όλο το σύνολο δεδομένων προκύπτει ίση με 43.3%, και ότι περίπου το 28% του συνόλου έλαβε ποσοστό ζημιές μεγαλύτερο από το κατώφλι του 50%, γεγονός που υποδεικνύει αξιοσημείωτη έκταση βλάβης στο σύνολο των πλημμυρόπληκτων κατοικιών. Παρατηρείται επίσης ότι σχεδόν το 90% των πλημμυρόπληκτων κατοικιών στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» παρουσιάζει ποσοστό ζημιές μεγαλύτερο από το κατώφλι του 50 %, ενώ στην Κεντρική υποπεριοχή μόλις το 22.6% υπερβαίνει το κατώφλι του 50%.

Πίνακας 11-3. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων ανά υποπεριοχή της πόλης της Νέας Ορλεάνης

Υποπεριοχή	Βάση δεδομένων			Ποσοστό ζημιάς > 50%	
	Αριθμός πλημμυρόπληκτων κατοικιών	Μέση τιμή ποσοστού ζημιάς %	Τυπική απόκλιση ποσοστού ζημιάς %	Αριθμός πλημμυρόπληκτων κατοικιών	Ποσοστό στο σύνολο κατοικιών
Κεντρική	71 579	28.2	22.1	16 174	22.6
Ανατολική	17 451	39.0	12.9	4 876	27.9
Αγ. Βερνάρδου	5 820	62.8	20.3	5 155	88.6
Σύνολο	94 850	43.3	20.8	26 205	27.6



Εικόνα 11-9. Ιστογράμματα του ποσοστού ζημιάς για κάθε υποπεριοχή της Νέας Ορλεάνης (Προσοχή: οι κλιμακίες στους κάθετους άξονες διαφέρουν)

Επίσης, σημειώνεται ότι το πλήθος των πλημμυρόπληκτων κατοικιών στην Κεντρική υποπεριοχή αντιπροσωπεύει περίπου το 75 % του συνόλου. Από τα ιστογράμματα παρατηρείται, επίσης, ότι το εύρος των τιμών του ποσοστού ζημιές είναι μεγάλο στην Κεντρική υποπεριοχή, ενώ αντίθετα στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου παρατηρείται συγκέντρωση των τιμών ποσοστού ζημιές στη κλάση τιμών 50 – 60 %. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο στατιστικής προσαρμογής BestFit [Palisade Corporation 2004], η προσαρμογή στατιστικής συνάρτησης στο υποσύνολο ζευγών τιμών ποσοστού ζημιές και πλήθους στην Κεντρική υποπεριοχή οδήγησε στην επιλογή της λογαριθμο-ομοιόμορφης (LogUniform) κατανομής, γεγονός που επιβεβαιώνει την παρατήρηση από το ιστόγραμμα ότι η διαφοροποίηση των τιμών ποσοστού ζημιές είναι μεγάλη στην Κεντρική υποπεριοχή και κατά συνέπεια η ομοιόμορφη κατανομή είναι πολύ πιθανό να προσαρμόζεται στα δεδομένα. Ομοίως, χρησιμοποιώντας το ίδιο στατιστικό εργαλείο, η προσαρμογή συνάρτησης κατανομής στο υποσύνολο ζευγών τιμών ποσοστού ζημιές στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου οδήγησε στην απόρριψη της λογαριθμοομοιόμορφης (LogUniform) κατανομής και στην επιλογή διακριτής κατανομής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα:

- για τιμές ποσοστού ζημιές 50 – 60 % :  $p_f = 0.66$
- για τιμές ποσοστού ζημιές 95 – 100 % :  $p_f = 0.33$

όπου  $p_f$  = συχνότητα εμφάνισης της τιμής του ποσοστού ζημιές

Αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσαρμογής στατιστικής συνάρτησης στα υποσύνολα των δεδομένων ζημιές για τις δύο υποπεριοχές παρατίθενται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π11.2.

Η στατιστική περιγραφή της βάσης συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των πλημμυρικών συνθηκών που σημειώθηκαν από την Ομάδα Αξιολόγησης Επιπτώσεων (MAT) της FEMA [FEMA 2006a], δηλαδή φαίνεται ότι οι διαφοροποιήσεις στην χωρική κατανομή της ζημιές ανά υποπεριοχή μπορεί να σχετιστεί με τις διαφοροποιήσεις στις πλημμυρικές συνθήκες όπου παρατηρούνται.

### **Γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» (υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου)**

Σε αυτήν την περιοχή η μέση τιμή του ποσοστού ζημιές είναι σαφώς η πιο υψηλή. Περίπου το 90 % των πληγεισών κατοικιών βαθμολογήθηκαν με ποσοστό ζημιές πάνω από 50 %. Στην ίδια περιοχή παρατηρήθηκαν εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες πλημμύρας ως προς το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής κυρίως λόγω των εκτεταμένων ρηγμάτων στα περιμετρικά αναχώματα. Οι παρατηρήσεις της άμεσης ζημιές στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» υπέδειξαν εκτεταμένες βλάβες και καταρρεύσεις σε κατοικίες λόγω δράσης πλημμυρικών κυμάτων και πολύ μεγάλων τιμών βάθους νερού και ταχύτητας ροής. Τα πλημμυρικά μεγέθη υψηλής έντασης είχαν ως αποτέλεσμα να παρασυρθούν κατοικίες από τις θεμελιώσεις τους και να καταρρεύσουν φέρουσες τοιχοποιίες [FEMA 2006a]. Τα υψηλότερα ποσοστά ζημιές (95 – 100 %) σημειώθηκαν στις περιοχές γειννίασης των ρηγμάτων στα αντιπλημμυρικά αναχώματα.

### **Κεντρική υποπεριοχή**

Στην Κεντρική υποπεριοχή οι υψηλότερες τιμές πλημμυρικής στάθμης σημειώθηκαν στο βορειότερο μέρος της υποπεριοχής και οι υψηλότερες τιμές ταχύτητας ροής υπολογίστηκαν μόνο για τις περιοχές ακριβώς κατάντη των ρηγμάτων των αναχωμάτων. Το ποσοστό ζημιές στην περιοχή ποικίλει σημαντικά και η πλειοψηφία των τιμών του ποσοστού ζημιές είναι μικρότερη από το κατώφλι του 50 %. Επίσης, ένας σχετικά μεγάλος αριθμός περιπτώσεων πληγεισών κατοικιών εκτιμάται με πολύ χαμηλό ποσοστό ζημιές (< 10 %). Η σχετικά υψηλή τιμή της τυπικής απόκλισης για αυτή την υποπεριοχή αναμένεται να σχετίζεται με τη μεγάλη

ποικιλία πλημμυρικών συνθηκών και τη μεγάλη διαφοροποίηση στους τύπους και στα υλικά κατασκευής των κατοικιών. Σημειώνεται επίσης ότι στη συγκεκριμένη υποπεριοχή βρίσκεται και η πλειοψηφία των κατοικιών αποικιοκρατικής εποχής, στα οποία τα ευάλωτα τμήματα κατασκευής έναντι πλημμύρας είναι λίγα (βλέπε εδάφιο 11.2.1).

Σύμφωνα με την ομάδα MAT [FEMA 2006a] βλάβη ή κατάρρευση έπαθαν μόνο οι μονοκατοικίες που βρίσκονταν ακριβώς κατάντη από το εκτεταμένο ρήγμα του καναλιού «της 17<sup>ης</sup> Οδού». Οι πληγείσες κατοικίες σε εκείνο το κομμάτι της Κεντρικής υποπεριοχής υπέστησαν κατάρρευση φέρουσα τοιχοποιίας και εκτεταμένη διάβρωση θεμελίωσης λόγω της δράσης ισχυρών υδροδυναμικών δυνάμεων που προκλήθηκαν από το ρήγμα. Στα υπόλοιπα μέρη της υποπεριοχής παρατηρήθηκε κυρίως μη δομική ζημιά στο εσωτερικό των πληγείσων κατοικιών.

### **Ανατολική υποπεριοχή**

Στην Ανατολική υποπεριοχή υπάρχει σχετικά μικρός αριθμός κατοικιών που υπέστησαν βλάβη παρόλο που οι πλημμυρικές συνθήκες περιγράφονται από μεγάλες τιμές βάθους νερού και ρυθμού ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης. Ομοίως με την Κεντρική υποπεριοχή, ο κυρίαρχος τύπος πλημμυρικής ζημιάς είναι η μη δομική ζημιά λόγω μακράς παραμονής πολλών κατοικιών κάτω από το νερό [FEMA 2006a].

## **11.6 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια**

Το κεφάλαιο αυτό δίνει μια γενική εικόνα των πλημμυρικών συνθηκών και της επακόλουθης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες που προκλήθηκε στην πόλη της Νέας Ορλεάνης λόγω του τυφώνα Κατρίνα. Με βάση τα περιγραφικά χαρακτηριστικά κατασκευής διακρίθηκαν χαρακτηριστικοί τύποι κατοικίας στην πόλη και με βάση αυτούς τους τύπους και την χωρική κατανομή της καταγεγραμμένης άμεσης ζημιάς από επιτόπιες επιθεωρήσεις αναφέρθηκαν πιθανά αίτια πρόκλησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κατοικίες ανά περίπτωση υποπεριοχής.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η οικονομική εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς δεν περιλαμβάνει ανάλυση των φυσικών μηχανισμών αστοχίας των πληγέντων στοιχείων μιας κατοικίας αλλά σχετίζεται μόνον με την καταγεγραμμένη στάθμη πλημμύρας, δηλαδή βασίζεται κυρίως στη μέθοδο καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς. Χρησιμοποιώντας μια απλοποιημένη εκδοχή αυτής της μεθόδου, καταρτίστηκε ψηφιακά η βάση οικονομικών δεδομένων ζημιάς με τη μορφή τιμών ποσοστού ζημιάς σε περίπου 95 000 πληγείσες κατοικίες στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Η διαθέσιμη πληροφορία στη βάση δεδομένων περιλαμβάνει μόνο τη γεωγραφική θέση της πληγείσας κατοικίας και την αντίστοιχη εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς ανά κατοικία. Αναφορά σε δομικά χαρακτηριστικά της πληγείσας κατοικίας, όπως είναι ο τύπος κατασκευής, το υλικό κατασκευής και ο τύπος θεμελίωσης, δεν έχουν καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων. Επομένως, η στατιστική ανάλυση και συσχέτιση των παραπάνω ποιοτικών μεταβλητών με τα αντίστοιχα πλημμυρικά μεγέθη και κατ'επέκταση με την πρόκληση της άμεσης ζημιάς σε κατοικίες δεν κατέστη δυνατή.

Τέλος, στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π11.3 διατίθεται φωτογραφικό υλικό για την καλύτερη δυνατή κατανόηση των πλημμυρικών συνθηκών που αναπτύχθηκαν στην πόλη της Νέας Ορλεάνης λόγω του τυφώνα Κατρίνα και της επακόλουθης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που προκλήθηκε σε κατοικίες.



## Κεφάλαιο 12

# Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη Νέα Ορλεάνη

Το κεφάλαιο εστιάζει στη στατιστική ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς σε κατοικίες που συλλέχθηκαν από την πλημμύρα λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη κριτηρίου ζημιάς σε κατοικίες με βάση μεγέθη πλημμύρας. Το κριτήριο ζημιάς έχει ως αποτέλεσμα την κατηγοριοποίηση της άμεσης ζημιάς σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής. Η περιοχή μελέτης στην πόλη της Νέας Ορλεάνης καλύπτει τρεις υποπεριοχές της πόλης: την Ανατολική υποπεριοχή, την Κεντρική υποπεριοχή και τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» της υποπεριοχής του Αγ. Βερνάρδου, οι οποίες περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 9.

Η κατηγορία πλημμύρας υπό εξέταση είναι η πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής που οφείλεται σε αστοχία αναχώματος και χαρακτηρίζεται από ραγδαία ανύψωση πλημμυρικής στάθμης και μεγάλη ταχύτητα ροής. Σ' αυτή την κατηγορία πλημμύρας τα πλημμυρικά μεγέθη που εξετάζονται για την πρόκληση άμεσης ζημιάς είναι το βάθος νερού, το γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής και ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν αποτελέσματα της διδιάστατης προσομοίωσης των πλημμυρικών συνθηκών που προκλήθηκαν λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Οι τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι οι μέγιστες τιμές που προέκυψαν από την χρονικά μεταβαλλόμενη μοντελοποίηση της πλημμύρας. Σημειώνεται επίσης, ότι παρόλο που οι πλημμυρικές συνθήκες στην πόλη προκλήθηκαν από τον τυφώνα Κατρίνα και κατά συνέπεια είναι συνδυασμός πλημμύρας με δράση μεγάλων κυμάτων και με υψηλή ταχύτητα ροής, θεωρήθηκε ότι η πλημμύρα παράκτιου τύπου δεν είναι υπεύθυνη για την πρόκληση άμεσης ζημιάς σε κατοικίες μέσα στην πόλη.

Τα δεδομένα άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας που συμμετέχουν στην ανάλυση ανήκουν στη βάση δεδομένων ζημιάς που περιγράφηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 11. Συνεπώς η άμεση οικονομική ζημιά αντιπροσωπεύεται από το αδιάστατο μέγεθος «ποσοστό ζημιάς» στην ανάλυση, που εκφράζει την απώ-

λεια της αρχικής εμπορικής αξίας κάθε πλημμυρόπληκτης κατοικίας στην πόλη. Η μέθοδος εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου για την περιοχή μελέτης έχει περιγραφεί και συζητηθεί στο κεφάλαιο 11.

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς οδηγεί στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μεσοκλιμακας σύμφωνα με τη μορφή της Εικόνας 7-3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, το μοντέλο ζημιάς μεσοκλιμακας αναφέρεται στην κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής και σε μοντέλο πλημμύρας μονοδιάστατης/διδιάστατης προσομοίωσης πλημμύρας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο συνδυασμός αυτού του μοντέλου πλημμύρας με μοντέλο ζημιάς μεσοκλιμακας οδηγεί σε ιδανικό ταίριασμα του βαθμού πολυπλοκότητας των μοντέλων (βλέπε Εικόνα 7.2) και κατά συνέπεια θεωρείται ότι αποδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον. Το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς αναφέρεται σε διαδικασία αποτίμησης ζημιάς με βάση την εμπορική αξία ενός κτηρίου και υπολογισμό του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς» ως απώλεια της αρχικής αξίας ενός κτηρίου. Σε ό,τι αφορά το δομημένο περιβάλλον, το μοντέλο ζημιάς εξετάζει μόνο κατοικίες χωρίς πρόσθετη διάκριση σε τύπους κτηρίου και η άμεση ζημιά αφορά μόνο το περιβλήμα ενός κτηρίου. Τέλος, ως καταλληλότερη μέθοδος εκτίμησης ζημιάς επιλέγεται η μέθοδος κριτηρίου ζημιάς που έχει ως αποτέλεσμα την χωρική διάκριση σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής ζημιάς.

Το κεφάλαιο αυτό διαρθρώνεται σε οκτώ υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 12.1 περιγράφεται γενικά η μοντελοποίηση των πλημμυρικών συνθηκών στην περιοχή μελέτης και παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες των πλημμυρικών μεγεθών υπό εξέταση, όπως αυτά προέκυψαν ως αποτελέσματα της διδιάστατης προσομοίωσης. Το υποκεφάλαιο 12.2 αναφέρεται στην χωρική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ζημιάς. Το υποκεφάλαιο 12.3 αναφέρεται στην πρωτογενή επεξεργασία των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που απαιτείται για τους σκοπούς της στατιστικής ανάλυσης που ακολουθεί. Το υποκεφάλαιο 12.4 αναφέρεται στη στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και του ποσοστού ζημιάς. Το υποκεφάλαιο 12.5 αναφέρεται στη στατιστική ανάλυση της σχέσης του βάθους νερού και του ποσοστού ζημιάς που υλοποιήθηκε για κάθε υποπεριοχή χωριστά και για το σύνολο της περιοχής μελέτης, ενώ το υποκεφάλαιο 12.6 αναφέρεται στη στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής και ποσοστού ζημιάς που υλοποιήθηκε μόνο για την υποπεριοχή του Αγ. Βερνάνδου (γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»). Στο υποκεφάλαιο 12.7 με βάση τα αποτελέσματα των στατιστικών αναλύσεων της σχέσης κάθε πλημμυρικού μεγέθους και ποσοστού ζημιάς, η ανάλυση προχωρά στην ανάπτυξη κριτηρίου άμεσης ζημιάς βάσει των πλημμυρικών μεγεθών και τελικά προτείνει ένα εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς, που οδηγεί σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής της άμεσης ζημιάς σε κατοικίες. Τα ανακεφαλαιωτικά σχόλια αυτού του κεφαλαίου συνοψίζονται στο υποκεφάλαιο 12.8.

## 12.1 Δεδομένα πλημμύρας

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης της πλημμύρας που προκλήθηκε λόγω τυφώνα Κατρίνα τον Αύγουστο 2005 στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Αναφέρονται συνοπτικά η μελετητική ομάδα από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft που εκπόνησε την προσομοίωση και το υπολογιστικό περιβάλλον της μοντελοποίησης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, οι αναγκαίες παραδοχές και απλοποιήσεις για την υλοποίηση της προσομοίωσης και, τέλος, οι καταγεγραμμένες παρατηρήσεις και επιτόπιες μαρτυρίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Παρουσιάζονται επίσης, οι χάρτες των μέγιστων τιμών των αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) για όλη την περιοχή μελέτης.



### 12.1.1 Γενικά

Διάφοροι κρατικοί οργανισμοί, όπως είναι η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Έκτακτων Αναγκών (FEMA) και το Κέντρο Τυφώνων του Κρατικού Πανεπιστημίου της Λουιζιάνα (LSU), ανέπτυξαν χάρτες χωρικής κατανομής του βάθους νερού σε περιβάλλον ΓΣΠ βάσει παρατηρήσεων για την πόλη της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα Κατρίνα. Αυτοί οι χάρτες βασίστηκαν σε δορυφορικές εικόνες που λήφθηκαν αμέσως μετά το πέρας του τυφώνα και τις καταγεγραμμένες τιμές πλημμυρικής στάθμης που συλλέχθηκαν στην πληγείσα περιοχή. Ωστόσο, η άντληση πλημμυρικών νερών και η επίδραση της παλιρροίας άφησαν πολλά διαφορετικά ίχνη πλημμυρικής στάθμης στο δομημένο περιβάλλον κατοικίας, με αποτέλεσμα η ερμηνεία τους να είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσκολη. Επιπλέον, η άμεση ζημιά από πλημμύρα στο δομημένο περιβάλλον θεωρήθηκε ότι είναι αποτέλεσμα και άλλων μεγεθών πλημμύρας πέρα από το βάθος νερού, τα οποία δεν αφήνουν ίχνη μετά το πέρας του πλημμυρικού γεγονότος (π.χ. ταχύτητα ροής, ρυθμός αύξησης της στάθμης) [Jonkman et al. 2009] και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, δεν κατέστη δυνατό να καταγραφούν.

Επομένως, για τη διερεύνηση των αιτιών της καταστροφικής πλημμύρας κρίθηκε αναγκαίο από τις κρατικές αρχές, να υλοποιηθεί μοντελοποίηση των πλημμυρικών συνθηκών λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Η μοντελοποίηση επικονήθηκε από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft (TU Delft) και την ολλανδική εταιρεία υδραυλικών μελετών με την επωνυμία «Svasek Hydraulics». Η ομάδα μελέτης αποτελούνταν από τον M. Kok Ph.D. MSc. (συντονιστής του έργου), B. Maaskant MSc και M. Aalberts BSc (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ, Ολλανδία) και τον L. de Wit MSc («Svasek B.V», Ολλανδία). Ανεξάρτητος σύμβουλος της μελετητικής ομάδας ήταν ο καθηγητής J.K.Vrijling MSc (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ, Ολλανδία). Το μελετητικό έργο της προσομοίωσης ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο 2007, και δημοσιεύτηκε υπό τον τίτλο «Προσομοίωση πλημμύρας των πληγείσων υποπεριοχών στην ευρύτερη περιοχή της Νέας Ορλεάνης» [Kok et al. 2007]. Τα αποτελέσματα των πλημμυρικών μεγεθών που προέκυψαν από το μελετητικό έργο της προσομοίωσης διατέθηκαν στη συγγραφέα για την εκπόνηση μέρους της διδακτορικής διατριβής, κατά την παραμονή της στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ το ακαδημαϊκό έτος 2007- 2008.

### 12.1.2 Μοντελοποίηση συνθηκών πλημμύρας στην Νέα Ορλεάνη

#### Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου στη μοντελοποίηση διατέθηκαν από αμερικανούς εμπειρογνώμονες και είναι τα ακόλουθα:

(α) Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) υψομετρικής ακρίβειας  $\pm 0.2$  m ( $\pm 0.7$  ft) για όλη την περιοχή μελέτης που προέρχεται από δεδομένα LIDAR διακριτοποίησης 5m και λήψης 2004. Ειδικά, για τις στέψεις των αναχωμάτων η διακριτοποίηση αυξήθηκε σε 0.3 m. Τα δεδομένα αυτά διατέθηκαν από τον κ. Chad Morris, τοπογράφο μηχανικό.

(β) Γραφήματα στάθμης πλημμυρικού κύματος / χρόνου που λήφθηκαν για 10 χαρακτηριστικές θέσεις στις υποπεριοχές από τον Δρ. Paul Kemp, ωκεανογράφο και εμπειρογνώμονα σε τσουνάμι. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

(γ) Πληροφορία για τη θέση των ρηγμάτων και το μέγεθος τους διατέθηκε σε περιβάλλον ΓΣΠ από τον κ. Chad Morris. Η χρονική διάρκεια σχηματισμού των ρηγμάτων λήφθηκε από την έκθεση της ομάδας Λουιζιάνα [van Heerden et al. 2006].

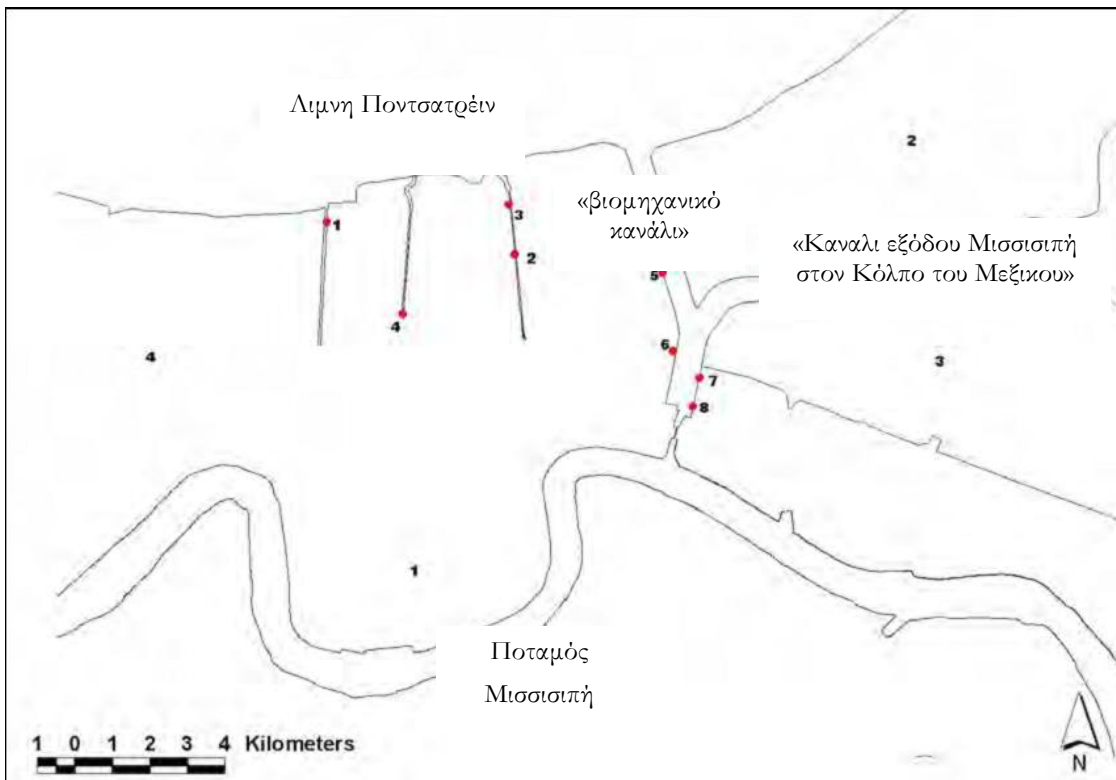
(δ) Τα υετογράμματα βροχόπτωσης διατέθηκαν για κάθε υποπεριοχή από τον Dr. Lee E. Branscome (CCM, Climatological Consulting Corporation).

### Δεδομένα για τη βαθμονόμηση μοντέλου και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων

Η ομάδα μελέτης στην Ολλανδία επιβεβαίωσε στα όρια του δυνατού την αξιοπιστία των δεδομένων αυτών συγκρίνοντας με άλλα διαθέσιμα δεδομένα από δημοσιευμένες εκθέσεις καταγραφής παρατηρημένων τιμών της Κοινής Ομάδας Εκτέλεσης Αξιολόγησης Συνεπειών (Interagency Performance Evaluation Task Force – IPET), της Ομάδας Λουιζιάνα (Team Louisiana) και της Ανεξάρτητης Ομάδας Διερεύνησης του συστήματος Αντιπλημμυρικών Αναχωμάτων (Independent Levee Investigation Team).

Κατά τη διάρκεια φυσικών φαινομένων εξαιρετικής έντασης, όπως είναι ο τυφώνας Κατρίνα, είναι σχεδόν αδύνατο να πάρει κανείς επιτόπιες μετρήσεις π.χ. πλημμυρικής στάθμης, ιδιαίτερα κατά την χρονική στιγμή έναρξης ενός ρήγματος σε ανάχωμα. Ωστόσο, η ομάδα IPET [IPET 2007a, 2007b] κατάφερε να αναπτύξει υδρογραφήματα και γραφήματα στάθμης / χρόνου βασισμένα σε επιτόπιες μαρτυρίες και σταματημένα ρολόγια που συλλέχθηκαν με το πέρασμα της πλημμύρας. Τα εμπειρικά αυτά γραφήματα χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση του μοντέλου πλημμύρας, έτσι ώστε να συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα υδρογραφήματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της πλημμύρας [Kok et al. 2007]. Οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων τιμών και των παρατηρημένων τιμών μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου κυμαίνονται μεταξύ 0.1 - 0.3 m (0.3 – 1 ft) και επομένως, για τους σκοπούς της προσομοίωσης της πλημμύρας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρούνται πλήρως αξιόπιστα.

Η Εικόνα 12-1 απεικονίζει τις θέσεις των ρηγμάτων και υπερπηδήσεων σε ανάχωματα, τα οποία προσομοιώθηκαν στο Sobek 1D2D για την αναπαράσταση των πλημμυρικών συνθηκών λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην Νέα Ορλεάνη.



Εικόνα 12-1. Θέσεις ρηγμάτων και αστοχιών αναχωμάτων που μοντελοποιήθηκαν στην Νέα Ορλεάνη [de Bruijn 2006]

Η προσομοίωση του πλημμυρικού πεδίου υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα υδραυλικών υπολογισμών Sobek 1D2D. Το πρόγραμμα αυτό περιγράφεται θεωρητικά στο κεφάλαιο 6. Η επιφανειακή πλημμύρα λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης κατέκλυσε τις τρεις υποπεριοχές της πόλης (Κεντρική υποπεριοχή, Ανατολική υποπεριοχή και υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου). Η προσομοίωση της πλημμύρας υλοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε υποπεριοχή, χρησιμοποιώντας τρία ανεξάρτητα μοντέλα ορθογωνικού κανάβου, αφού κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος θεωρήθηκε ότι δεν υπήρχε καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των υποπεριοχών.

### **Κάβναβος**

Η διδιάστατη περιοχή στο μοντέλο αποτελείται από ορθογωνικό κάβναβο πλευράς φατνίου ίσης με 50 m. Το υψόμετρο στο κέντρο κάθε φατνίου υπολογίστηκε με βάση το ΨΜΕ. Ειδικά τα υψόμετρα στη στέψη αναχωμάτων εισήχθησαν στο μοντέλο ξεχωριστά βάσει παρατηρημένων τιμών πλημμυρικής στάθμης. Το Sobek 1D2D υπολογίζει το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής στο κέντρο κάθε φατνίου σε συνάρτηση με τον χρόνο.

### **Περίοδος προσομοίωσης**

Όλες οι προσομοιώσεις ξεκίνησαν στις 28 Αυγούστου 2005 0:00 π.μ. και διήρμησαν τουλάχιστον 2 μέρες. Δεν έγιναν προσομοιώσεις μετά την 2<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2005 12:00 μ.μ.

### **Υπερπήδηση**

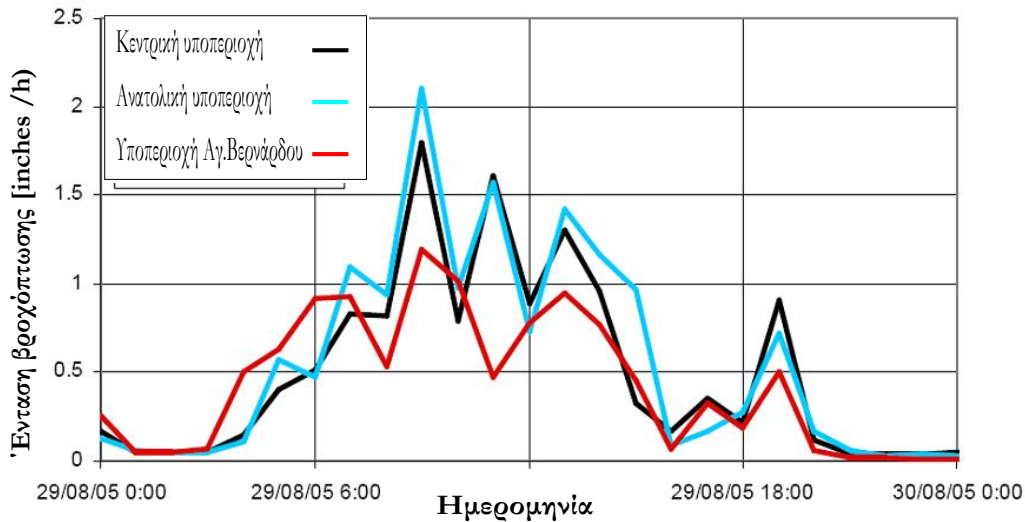
Τα υδάτινα σώματα που περικλείουν κάθε υποπεριοχή μοντελοποιήθηκαν βάσει των γραφημάτων στάθμης / χρόνου που υπήρχαν διαθέσιμα σε χαρακτηριστικές θέσεις της περιοχής μελέτης [Kok et al. 2007]. Όταν η ελεύθερη επιφάνεια της στάθμης των υδάτινων σωμάτων ξεπερνούσε το υψόμετρο της στέψης μέρους του αναχώματος, τότε θεωρούνταν ότι άρχιζε το φαινόμενο της υπερπήδησης και το νερό άρχιζε να εισέρχεται στην υποπεριοχή.

### **Ρήγματα / Αντλίες**

Τα πιο σημαντικά ρήγματα στο δίκτυο αναχωμάτων κάθε υποπεριοχής προσομοιώθηκαν (βλέπε Εικόνα 12-1) εισάγοντας στο μοντέλο ως αρχικές συνθήκες συγκεκριμένες διαστάσεις σχήματος ρήγματος, την τιμή αρχικής πλημμυρικής στάθμης κατά την έναρξη του ρήγματος και την χρονική διάρκεια εξέλιξης του ρήγματος, όπως ακριβώς καταγράφηκαν στην πραγματικότητα. Ειδικά στην Κεντρική υποπεριοχή, προσομοιώθηκαν δυο αντλητικά συγκροτήματα που εν μέρει λειτούργησαν κατά τη διάρκεια της πλημμύρας.

### **Βροχόπτωση**

Τα υετογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για εισαγωγή βροχόπτωσης στο μοντέλο φαίνονται στην Εικόνα 12-2. Θεωρήθηκε κατά τη μοντελοποίηση ότι η βροχόπτωση συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλη την έκταση κάθε υποπεριοχής.



Εικόνα 12-2. Χρονοσειρά βροχόπτωσης για την προσομοίωση πλημμύρας [Kok et al. 2007]

Τα αίτια πλημμύρας που λήφθηκαν υπόψη στη μοντελοποίηση είναι:

- (α) Βροχόπτωση
- (β) Επιδράσεις της λειτουργίας των αντλιοστασίων
- (γ) Υπερπήδηση των αναχωμάτων και άλλων υδραυλικών κατασκευών
- (δ) Ρήγματα σε αναχώματα
- (ε) Ρήγματα σε προστατευτικούς τοίχους έναντι πλημμύρας

Επίσης, οι αναγκαίες παραδοχές και υποθέσεις για την υλοποίηση της προσομοίωσης συνοψίζονται παρακάτω [Kok et al 2007]:

(α) Η υπερπήδηση λόγω πλημμυρικού κύματος δεν λήφθηκε υπόψη από την αρχή του φαινομένου, αλλά μόνο όταν άρχισε να συμβαίνει διάβρωση στον πόδα του αναχώματος. Δηλαδή το φαινόμενο της υπερπήδησης λήφθηκε υπόψη, μόνον όταν η ανύψωση της πλημμυρικής στάθμης ξεπέρασε το υψόμετρο της στέφης του αναχώματος. Ο όγκος νερού από την υπερπήδηση λόγω κύματος θεωρήθηκε μικρός σε σύγκριση με τον όγκο νερού από την υπερπήδηση σε όλο το μήκος της στέφης, όταν δηλαδή η στάθμη πλημμύρας βρισκόταν υψηλότερα από τη στέφη του αναχώματος.

(β) Αποχετευτικά φρεάτια, χαντάκια και άλλου τύπου μικρές διοδεύσεις πλημμυρικών νερών δεν προσομοιώθηκαν. Θεωρήθηκε, ότι τέτοιου τύπου διοδεύσεις μπορεί να συνέβαλαν πιθανώς σε μια πιο γρήγορη, αρχική εξάπλωση της πλημμύρας, αλλά τελικά είχαν ασήμαντη επιρροή στη διαμόρφωση των μέγιστων τιμών πλημμυρικής στάθμης στις τρεις υποπεριοχές της πόλης.

(γ) Κτήρια και άλλες ανωδομές δεν συμπεριλήφθηκαν στη μοντελοποίηση, παρόλο που μπορεί να εμπόδισαν την πλημμυρική ροή και να άλλαξαν την κατεύθυνση της. Αυτή η επίδραση της ανωδομής στη ροή θεωρήθηκε τοπική. Η συνολική επίδραση των κτηρίων συνυπολογίστηκε στην τραχύτητα του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε ως υδραυλική παράμετρος στη μοντελοποίηση.

(δ) Καμία διάκριση δεν έγινε στη μοντελοποίηση μεταξύ οικοδομικών τετραγώνων και δρόμων, σε ό,τι αφο-

ρά το υψόμετρο και το συντελεστή τραχύτητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν τη γενική εικόνα της πλημμύρας. Είναι προφανές, ότι στις θέσεις των κατοικιών οι τιμές ταχύτητας ροής υπερτιμήθηκαν και αντίστοιχα στις θέσεις των δρόμων υποτιμήθηκαν.

(ε) Η αλληλεπίδραση μεταξύ της επιφανειακής και της υπόγειας ροής αγνοήθηκε. Θεωρήθηκε ότι το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο, το οποίο είναι μια πολύ λογική υπόθεση λίγο πριν το χτύπημα του τυφώνα στην πόλη.

(ζ) Η άμεση επίδραση του ανέμου δεν λήφθηκε υπόψη.

(η) Η ροή δια μέσου αναχώματος ή υδραυλικής κατασκευής αγνοήθηκε. Όλες οι ενδείξεις συμφωνούν στο ότι οι διαρροές μέσου αναχώματος ήταν αμελητέοι όγκοι νερού σε σύγκριση με τους επιφανειακούς όγκους νερού.

Δεδομένου της πολυπλοκότητας των πλημμυρικών συνθηκών, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πλημμύρας θεωρήθηκε ότι δίνουν μια πλήρως αξιόπιστη αναπαράσταση των πλημμυρικών συνθηκών στις πληγείσες περιοχές, αλλά δεν αποτελούν ακριβείς αποτυπώσεις της χρονικής εξέλιξης των πλημμυρικών συνθηκών [Kok et al. 2007]. Παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές στην τιμή πλημμυρικής στάθμης μεταξύ υπολογισμένων και εμπειρικών υδρογραφημάτων δεν ξεπερνούν το 1 ft. Επίσης, η χρονική εξέλιξη των περισσότερων υδρογραφημάτων σχεδόν ταυτίζεται. Στη δημοσιευμένη έκθεση της μελέτης προσομοίωσης [Kok et. al 2007] μπορεί να βρει κανείς λεπτομερή περιγραφή της μοντελοποίησης του πλημμυρικού γεγονότος, της βαθμολόμησης του μοντέλου και της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων του σε όλες τις υποπεριοχές.

### 12.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης πλημμύρας

Η υδροδυναμική διδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας είχε ως αποτέλεσμα να υπολογιστούν σε κάθε φατνίο του ορθογωνικού καναλιού οι χρονοσειρές των πλημμυρικών μεγεθών: (α) του βάθους ροής, (β) της ταχύτητας ροής και (γ) του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης. Στην ανάλυση ζημιάς χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες τιμές των μεγεθών αυτών.

Από την Εικόνα 12-3 έως την Εικόνα 12-6 παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες μέγιστες τιμές του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής, του γινομένου του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής και του ρυθμού ανύψωσης της στάθμης πλημμύρας με τη μορφή χαρτών κανναβικής δομής σε περιβάλλον ΓΠΣ που καλύπτουν την Κεντρική υποπεριοχή, την Ανατολική υποπεριοχή και τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου.

Όπως φαίνεται από τους χάρτες, παρατηρούνται εξαιρετικά υψηλές τιμές σχεδόν για όλα τα πλημμυρικά μεγέθη κατά μήκος του «καναλιού εξόδου του Μισισιπύ στον Κόλπο του Μεξικού», που βρίσκεται κατά μήκος του νότιου περιμετρικού αναχώματος της Ανατολικής υποπεριοχής (βλέπε Εικόνα 12-1). Αυτό συμβαίνει, γιατί το κανάλι αυτό μοντελοποιήθηκε ως μονοδιάστατο στοιχείο αρχικής συνθήκης. Επομένως, οι εξαιρετικά υψηλές τιμές των πλημμυρικών μεγεθών στο κανάλι αγνοούνται στην ανάλυση άμεσης ζημιάς.

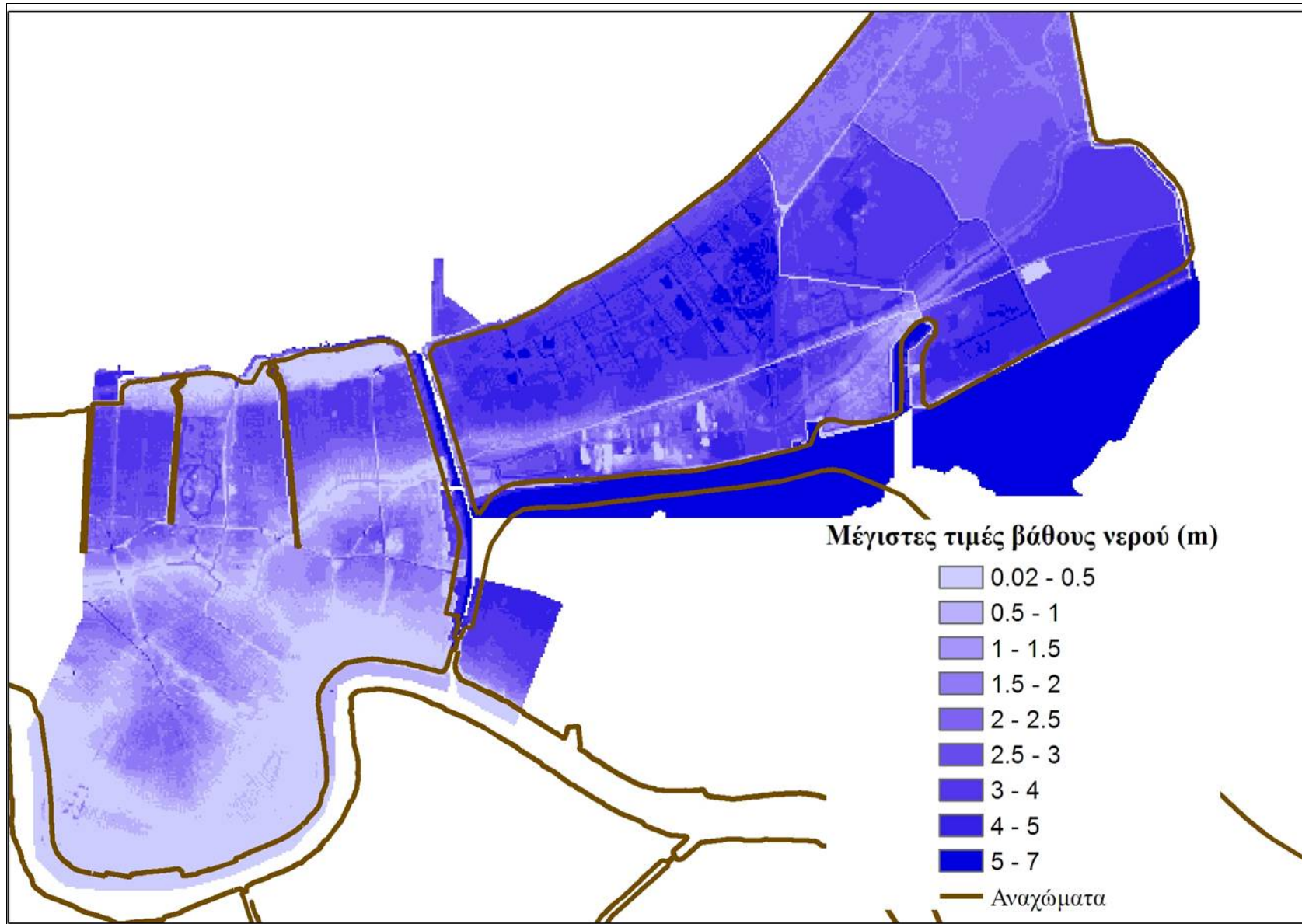
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι οι πιο δυσμενείς πλημμυρικές συνθήκες υπολογίστηκαν για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» της υποπεριοχής του Αγ. Βερνάρδου. Τα βάθη νερού στη γειτονιά αυτή κυμαίνονται σε 4 - 5 m στα πιο βαθιά σημεία και οι ρυθμοί ανύψωσης στάθμης είναι μεγάλοι (> 4 m/h) για το μεγαλύτερο κομμάτι της περιοχής. Υψηλές τιμές της ταχύτητας ροής (3 - 10 m/s) υπολογίστηκαν ιδιαίτερα για τις περιοχές ακριβώς κατάντη των δύο εκτεταμένων ρηγμάτων (τα ρήγματα αυτά συμβολίζονται με τους αριθμούς 7 και 8 στην Εικόνα 12-1) των αναχωμάτων κατά μήκος του «βιομηχανικού καναλιού». Τα αποτε-

λέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με τις καταγεγραμμένες παρατηρήσεις στο πεδίο και τις επιτόπιες μαρτυρίες της ομάδας IPET.

Οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής στην Κεντρική υποπεριοχή προέκυψαν κατά κύριο λόγο πολύ πιο μικρές σε σύγκριση με τις τιμές της ταχύτητας ροής στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward». Συγκεκριμένα, οι τιμές της ταχύτητας ροής είναι αξιοσημείωτες (1- 2 m/s) μόνο στις περιοχές πολύ κοντά στα ρήγματα των προστατευτικών τοίχων έναντι πλημμύρας (τα ρήγματα συμβολίζονται με τους αριθμούς 1, 2 και 3 στην Εικόνα 12-1). Επίσης, στην Κεντρική υποπεριοχή υπολογίστηκαν μεγάλα βάρη νερού μόνο σε ορισμένες περιοχές (π.χ. το μέτωπο της πόλης προς τη λίμνη Ποντσατρέιν), όπου η μέγιστη τιμή στάθμης πλημμύρας υπολογίστηκε περίπου στα 3 m. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Στη μεγαλύτερη έκταση της υποπεριοχής αυτής, ο ρυθμός ανύψωσης της πλημμυρικής στάθμης είναι μικρός. Οι μεγαλύτερες τιμές ρυθμού ανύψωσης (1 - 2 m/h) υπολογίστηκαν επίσης στο βόρειο μέρος της υποπεριοχής.

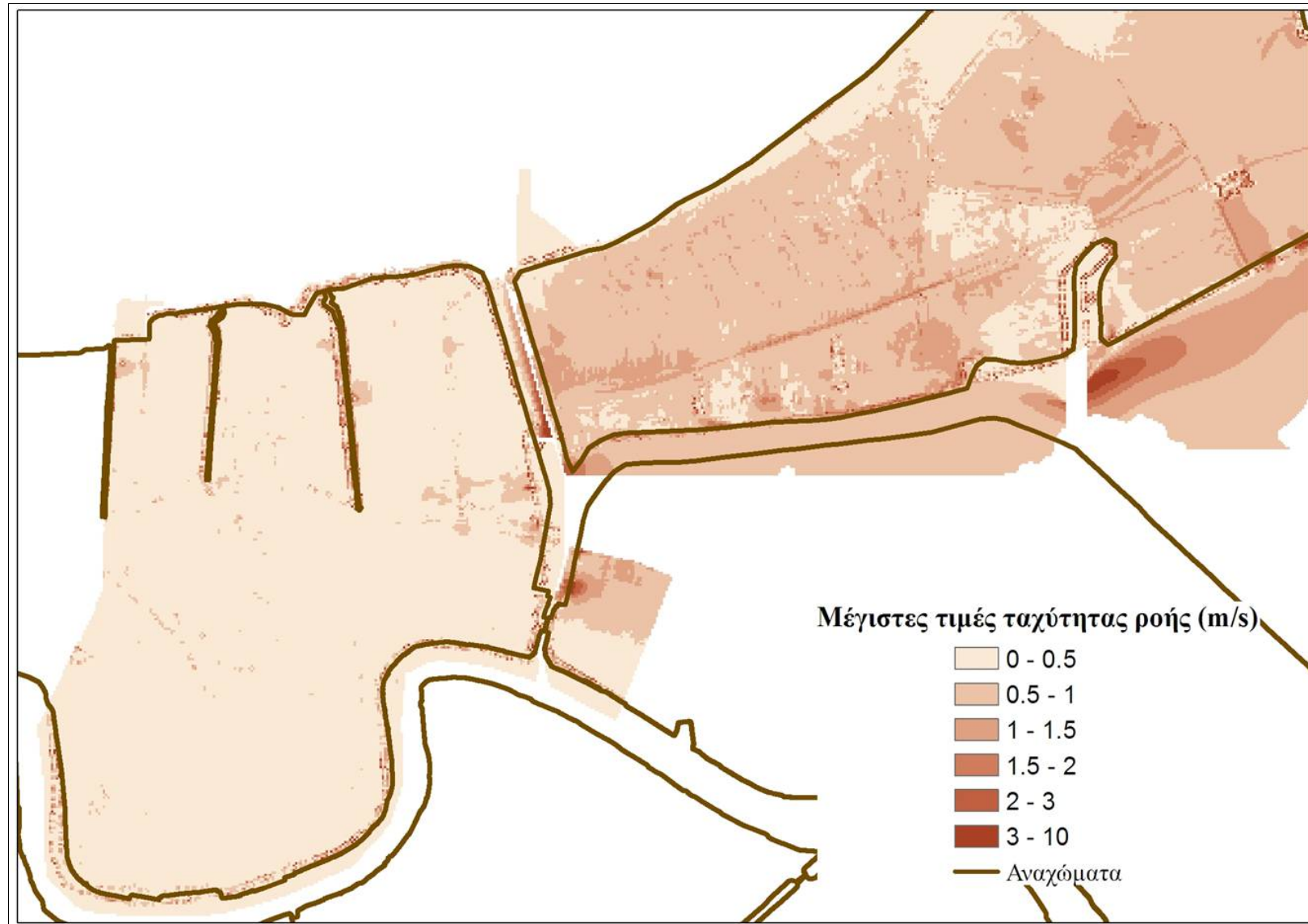
Τέλος, παρατηρεί κανείς ότι στην Ανατολική υποπεριοχή υπολογίστηκαν μεγάλα βάρη νερού (> 4 m), τα οποία κάλυψαν σταδιακά το μεγαλύτερο κομμάτι της υποπεριοχής. Περίπου 7 ώρες υπολογίστηκε το χρονικό διάστημα έως ότου πλημμυρίσει ολόκληρη η υποπεριοχή. Επιπλέον, υπολογίστηκαν υψηλές τιμές του ρυθμού ανύψωσης.

Συνολικά, η προσομοίωση της πλημμύρας λόγω του τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης είχε ως αποτέλεσμα οι μέγιστες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών που εξετάστηκαν να συμφωνούν ικανοποιητικά με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις και μαρτυρίες [Kok et al. 2007]. Επιπρόσθετα, η διαδικασία της προσομοίωσης συμπεριέλαβε ιεράρχηση των αιτιών της πλημμύρας (υερόπληξη αναχωμάτων, ρήγματα αναχωμάτων, βροχόπτωση και λειτουργία αντλιοστασίων) μέσω της εκτέλεσης εναλλακτικών σεναρίων πλημμύρας. Η διερεύνηση αυτή κατέληξε στο γενικό συμπέρασμα, ότι η συμβολή των αιτιών πλημμύρας στην έκταση και το μέγεθος πλημμύρας εξαρτάται σημαντικά από τη θέση τους. Ειδικά για κάθε υποπεριοχή τα κύρια αίτια πλημμύρας είναι: (α) στην Ανατολική υποπεριοχή η βροχόπτωση και η υερόπληξη αναχωμάτων για την πλημμύρα και (β) στην Κεντρική υποπεριοχή και στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» η αστοχία των αναχωμάτων, καθώς η συμβολή της βροχόπτωσης και της υερόπληξης ήταν σχετικά μικρή.



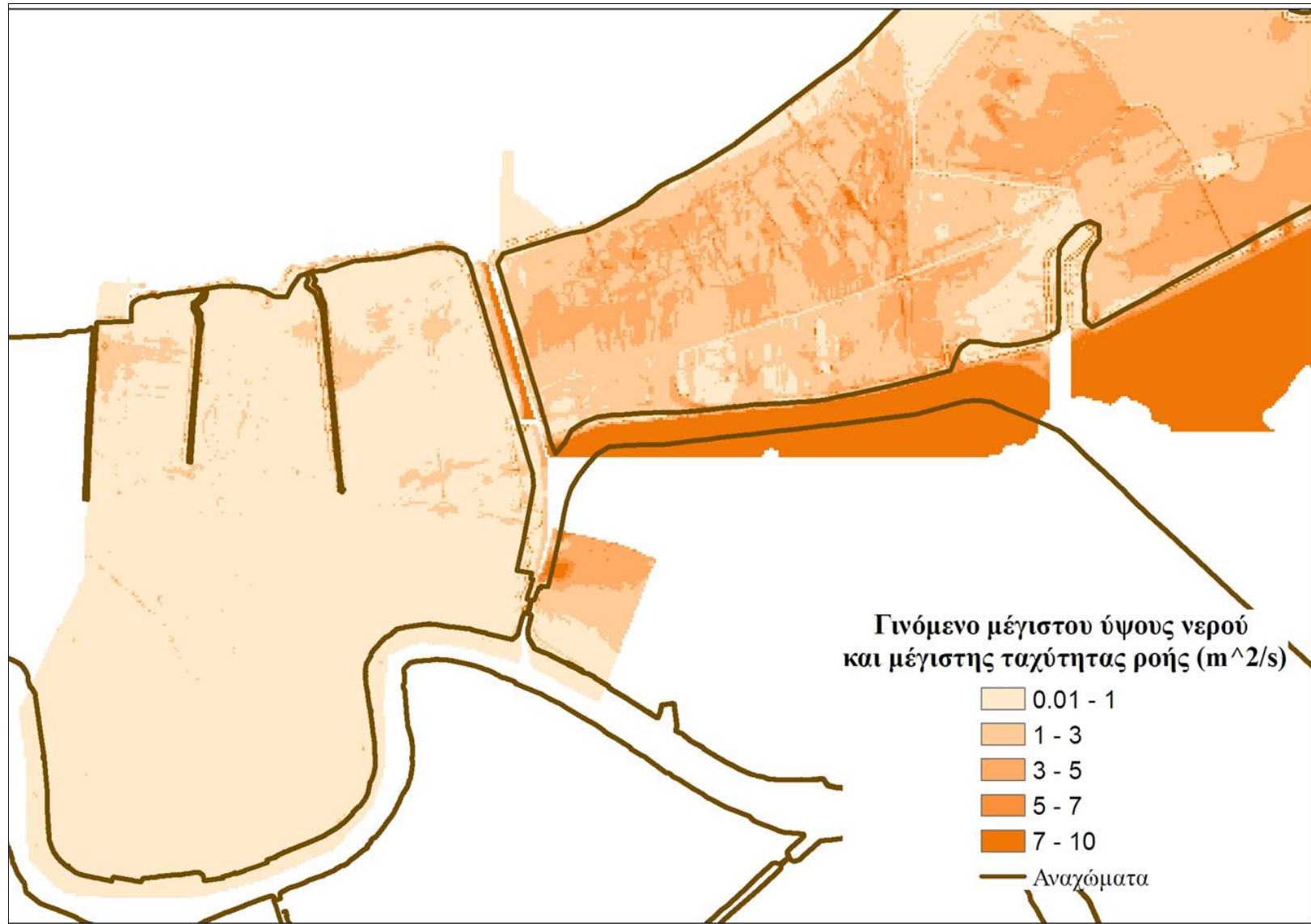
Εικόνα 12-3. Οι μέγιστες τιμές βάθους νερού υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης



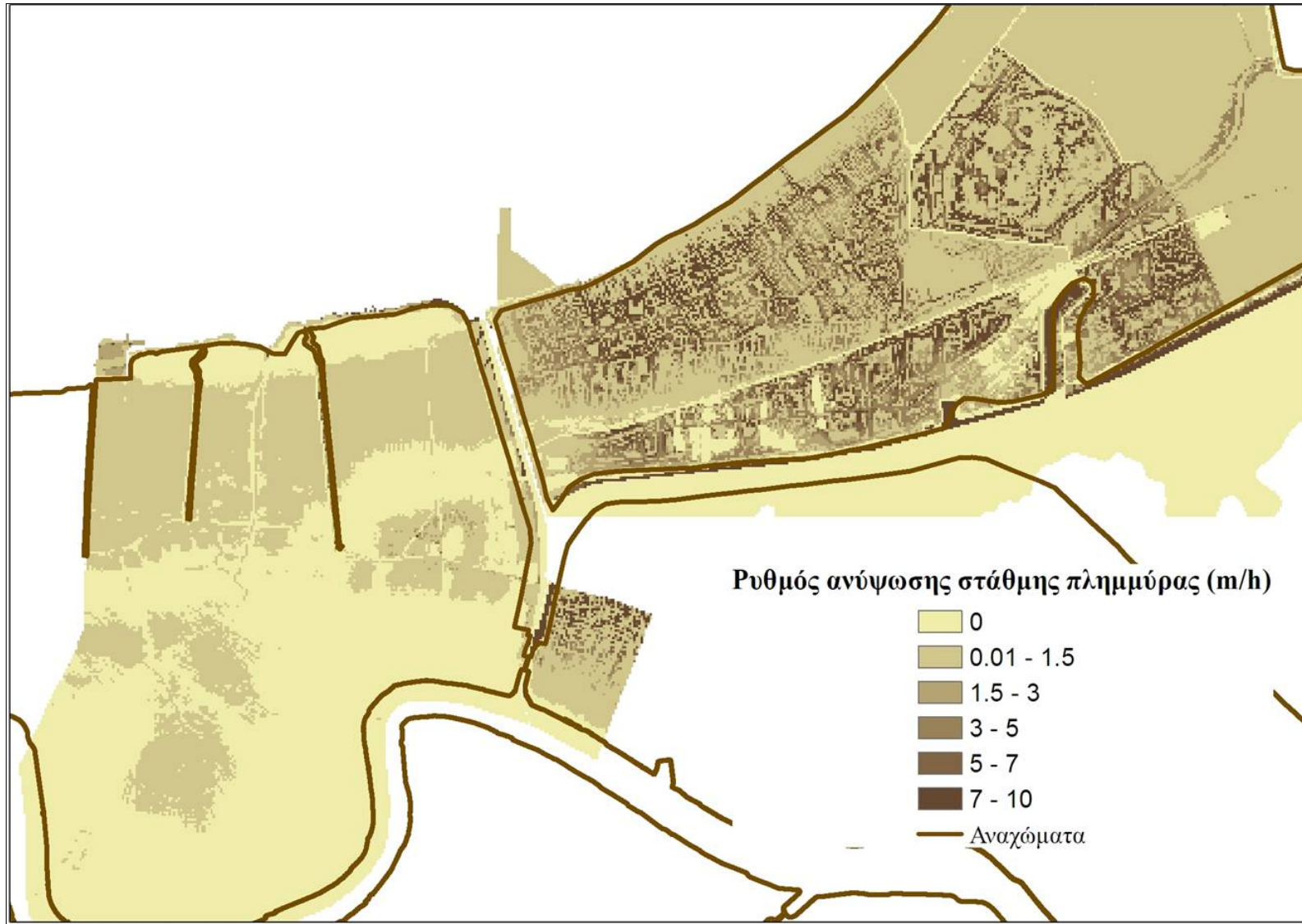


Εικόνα 12-4. Οι μέγιστες τιμές ταχύτητας ροής υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης





Εικόνα 12-5. Οι τιμές γινομένου μέγιστου βάθους νερού και μέγιστης ταχύτητας ροής υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης



Εικόνα 12-6. Οι μέγιστες τιμές του ρυθμού ανύψωσης στάθμης για το πρώτο 1.5m υπολογισμένες από τη διαδικασία προσομοίωσης

## 12.2 Χωρική κλίμακα ανάλυσης

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης των πλημμυρικών μεγεθών και του ποσοστού ζημιάς προϋποθέτει ότι οι τιμές των μεταβλητών έχουν αναχθεί στο ίδιο χωρικό επίπεδο ανάλυσης. Είναι γνωστό ότι κάθε τιμή ποσοστού ζημιάς αντιστοιχεί σε μία κατοικία. Επομένως η κατοικία θεωρητικά είναι η πιο λεπτομερής χωρική μονάδα ανάλυσης για τις τιμές του ποσοστού ζημιάς. Είναι όμως επίσης γνωστό, ότι οι τιμές των πλημμυρικών μεγεθών είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης σε ορθογωνικό κάρναβο, πλευράς φατνίου ίσης με 50 m. Επομένως, το ορθογωνικό φατνίο 50 m x 50 m θεωρητικά είναι η πιο λεπτομερής χωρική μονάδα ανάλυσης για τη στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ πλημμυρικών μεγεθών και ποσοστού ζημιάς αφού αποτελεί μεγαλύτερη μονάδα ανάλυσης σε σύγκριση με την ανάλυση ανά κατοικία.

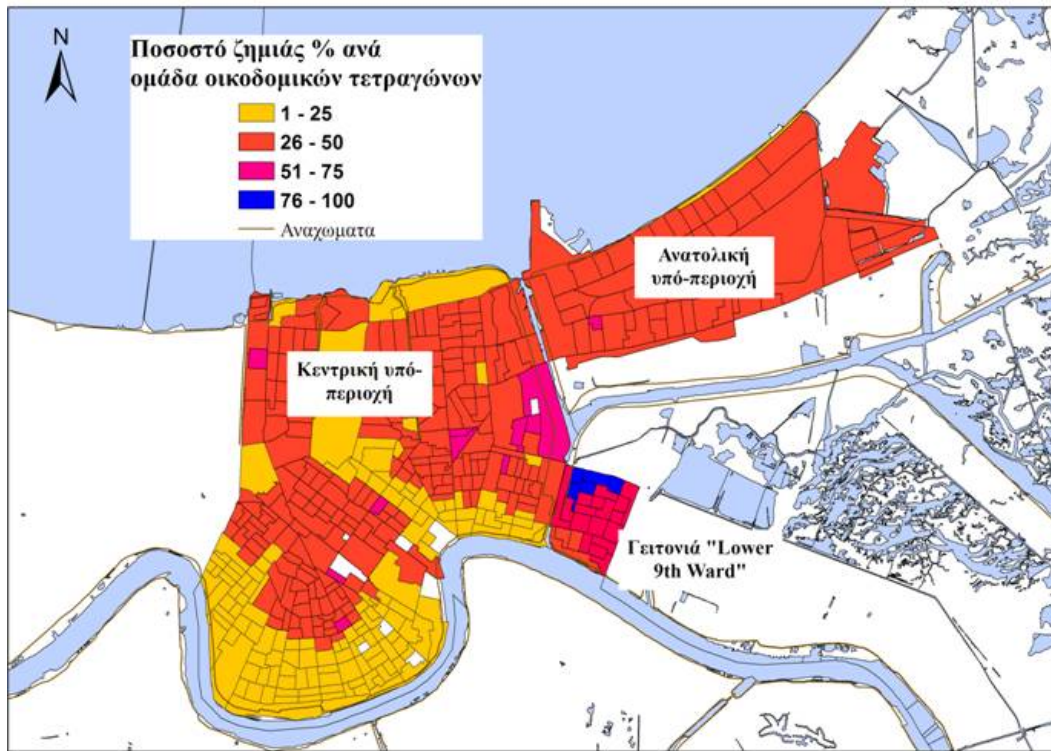
Η επιλογή της χωρικής μονάδας ανάλυσης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Η χωρική μονάδα ανάλυσης δεν πρέπει να επιλεγεί πολύ μικρή, γιατί τότε η διαφοροποίηση στις τιμές του ποσοστού ζημιάς μεταξύ κατοικιών είναι σημαντική (η κλίμακα χωρικής ανάλυσης προσεγγίζει την μικροκλίμακα). Επίσης, η χωρική μονάδα ανάλυσης δεν πρέπει να επιλεγεί πολύ μεγάλη, γιατί οι ανηγμένες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών αποκλίνουν σημαντικά από τις προσομοιωμένες τιμές. Τέλος, η επιλογή της χωρικής μονάδας ανάλυσης θα πρέπει να λάβει υπόψη τις τοπικές συνθήκες κάθε υποπεριοχής ως προς την πλημμύρα και τους τύπους άμεσης ζημιάς.

Η ανάπτυξη μοντέλου ζημιάς μεσοκλίμακας στην πόλη της Νέας Ορλεάνης προϋποθέτει την αναγωγή των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας. Ως χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας διακρίνονται τρεις επιμέρους χωρικές μονάδες ανάλυσης:

- Το διαμέρισμα (tract)
- Η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων (blockgroup)
- Το οικοδομικό τετράγωνο (block)

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 7, ένα διαμέρισμα περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 100 οικοδομικά τετράγωνα, μια ομάδα οικοδομικού τετραγώνου περίπου 15 οικοδομικά τετράγωνα και ένα οικοδομικό τετράγωνο περίπου 15 οικιστικές μονάδες. Στη στατιστική ανάλυση εφαρμόζονται κυρίως η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων και το οικοδομικό τετράγωνο, ανάλογα με το πλημμυρικό μέγεθος υπό εξέταση και σε ελάχιστες περιπτώσεις το διαμέρισμα για λόγους σύγκρισης.

Στην Εικόνα 12-7 απεικονίζεται η χωρική κατανομή του ποσοστού ζημιάς στο σύνολο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας ως επιμέρους χωρική μονάδα ανάλυσης, την ομάδα οικοδομικών τετραγώνων.



Εικόνα 12-7. Χωρική κατανομή ποσοστού ζημιάς ανηγμένου στην χωρική μονάδα «ομάδα οικοδομικών τετραγώνων»

### 12.3 Επεξεργασία δεδομένων

Η στατιστική ανάλυση της σχέσης πλημμυρικών μεγεθών και ποσοστού ζημιάς υλοποιείται χωριστά για τα ακόλουθα πλημμυρικά μεγεθη: (α) βάθος νερού, (β) γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής και (γ) ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης. Η στατιστική ανάλυση υλοποιείται για κάθε υποπεριοχή χωριστά και για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Ανάλογα με το πλημμυρικό μέγεθος και την υποπεριοχή, εξετάζονται μία ή περισσότερες μονάδες χωρικής ανάλυσης μεσοκλίμακας. Ο Πίνακας 12-1 παρουσιάζει τους συνδυασμούς πλημμυρικών μεγεθών και χωρικών επιπέδων που θα εφαρμοστούν στην ανάλυση, τονίζοντας με έντονα γράμματα τις περιπτώσεις στις οποίες επικεντρώθηκε η στατιστική ανάλυση.

Πίνακας 12-1. Συνδυασμοί πλημμυρικών μεγεθών και χωρικών επιπέδων για την ανάλυση ζημιάς

Μέγεθος Μονάδα ανάλυσης	<b>Βάθος νερού</b>	<b>Γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής</b>	<b>Ρυθμός ανύψωσης στάθμης</b>
<b>Διαμέρισμα</b>	Ανάλυση με ισχνά αποτελέσματα	Ανάλυση με ισχνά αποτελέσματα	Ανάλυση με ισχνά αποτελέσματα
<b>Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων</b>	<b>Ανάλυση</b>	Ανάλυση με ισχνά αποτελέσματα	Ανάλυση με ισχνά αποτελέσματα
<b>Οικοδομικό τετράγωνο</b>	Δεν έγινε ανάλυση	<b>Ανάλυση</b>	Δεν έγινε ανάλυση

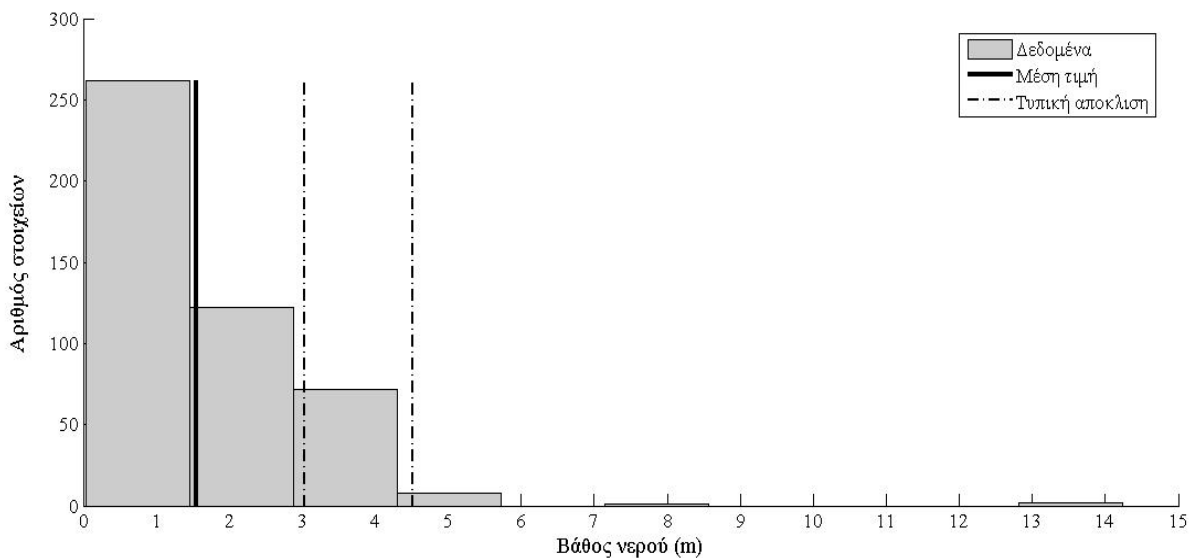
Γι' αυτές τις περιπτώσεις ανάλυσης παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο αυτό η επεξεργασία δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς που προηγήθηκε το στάδιο της ανάλυσης. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις ανάλυσης, για τις οποίες

τα αποτελέσματα υπήρξαν ισχνά είτε παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα εδάφια είτε παρατίθενται στο παράρτημα αυτού του κεφαλαίου.

### 12.3.1 Πρωτογενής επεξεργασία

Εδώ εφαρμόζεται το στάδιο της πρωτογενούς επεξεργασίας σε σύνολο δεδομένων πλημμυρικού μεγέθους με σκοπό την αφαίρεση των εξωδευγματικών τιμών από το σύνολο όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών περιγράφηκε στο εδάφιο 7.3.2.. Γενικά, στην στατιστική ανάλυση ως ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$ , θεωρείται το πλημμυρικό μέγεθος υπό εξέταση και ως εξαρτημένη μεταβλητή  $y$ , το ποσοστό ζημιάς.

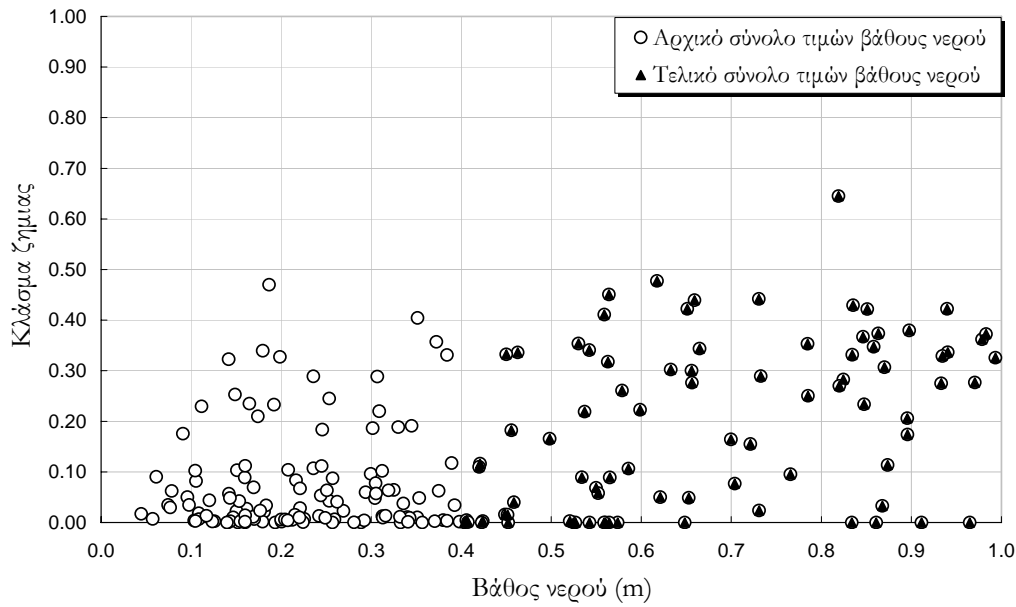
Έστω, το σύνολο τιμών βάθους νερού ανηγμένων σε χωρική μονάδα της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για όλη την περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 12-8 απεικονίζεται η μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών για το σύνολο αυτό και προκύπτει ότι οι τιμές βάθους νερού είναι ακραίες για  $x > 5$  m και κατά συνέπεια οι τιμές αυτές εξαιρούνται από το σύνολο.



Εικόνα 12-8. Μέθοδος αναγνώρισης εξωδευγματικών τιμών για το σύνολο των τιμών βάθους νερού

Η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στον υπολογισμό των προσομοιωμένων τιμών του βάθους νερού λόγω: (α) σφάλματος στην ανάπτυξη του ΨΜΕ και (β) σφάλματος κατά την μοντελοποίηση της πλημμύρας οδηγεί σε μία πρόσθετη εξαίρεση τιμών βάθους νερού από το σύνολο. Σύμφωνα με την περιγραφή της μοντελοποίησης της πλημμύρας στην περιοχή μελέτης, η υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ εκτιμήθηκε ίση  $\pm 0.7$  ft και αντίστοιχα η ακρίβεια της προσομοίωσης της πλημμύρας ίση με  $\pm (0.2 - 1$  ft). Σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 6.5 που αναφέρεται στην ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων μίας προσομοίωσης, θεωρείται ότι το ολικό σφάλμα λόγω των παραπάνω ακριβειών ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή ίση με το 0 και επομένως η ποσοτικοποίηση του μπορεί να προσεγγιστεί από τη τιμή της διασποράς στην κατανομή, η οποία εκτιμήθηκε ίση με 0.4 m.

Έτσι, εξαιρέθηκαν πρόσθετα από το αρχικό σύνολο, οι τιμές βάθους νερού για τις οποίες ισχύει  $x < 0.4$  m. Στην Εικόνα 12-9 παρατηρείται, ότι οι εξαιρούμενες τιμές βάθους νερού παρουσιάζουν συμπεριφορά νέφους. Η στατιστική ανάλυση που ακολουθεί, αφορά στο υποσύνολο τιμών βάθους νερού  $x \in [0.4, 5]$ .



Εικόνα 12-9. Απεικόνιση τιμών βάθους νερού που εξαιρέθηκαν από την ανάλυση ζημιάς, ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων

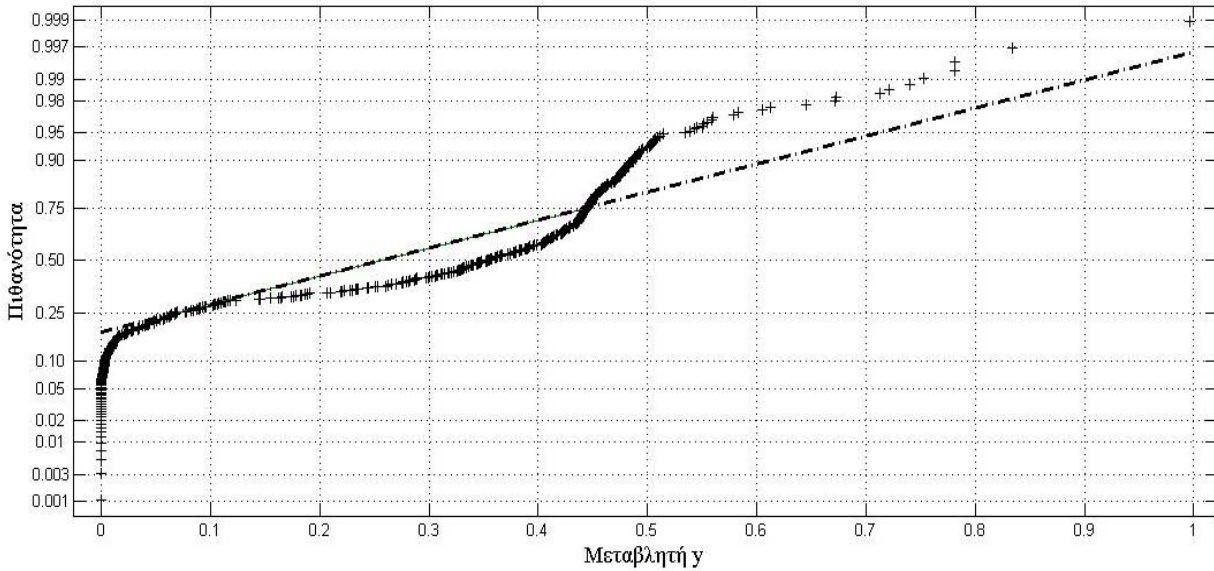
Η εξαίρεση των τιμών βάθους νερού επεκτείνεται επίσης, στο σύνολο τιμών του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής, ανηγμένων σε χωρική μονάδα της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για όλη την περιοχή μελέτης. Με άλλα λόγια, εξαιρούνται οι τιμές του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής που αντιστοιχούν στις εξαιρούμενες τιμές του βάθους νερού.

### 12.3.2 Έλεγχος κανονικότητας δεδομένων

Μετά το στάδιο της πρωτογενούς επεξεργασίας ακολουθεί ο έλεγχος κανονικότητας των δεδομένων για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης που ξεχωρίζουν στον Πίνακα 12-1.

Σε χωρική μονάδα της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για όλη την περιοχή μελέτης εξετάζεται το σύνολο τιμών ποσοστού ζημιάς και βάθους νερού. Από το χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας στην Εικόνα 12-10, διαπιστώνεται ότι το σύνολο τιμών  $y$  (ποσοστό ζημιάς) δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αντίστοιχα εξετάζοντας το σύνολο τιμών  $x$  (βάθος νερού) επιβεβαιώνεται ότι το σύνολο τιμών  $x$ , ακολουθεί κανονική κατανομή.





Εικόνα 12-10. Έλεγχος κανονικότητας της μεταβλητής  $y$  σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας

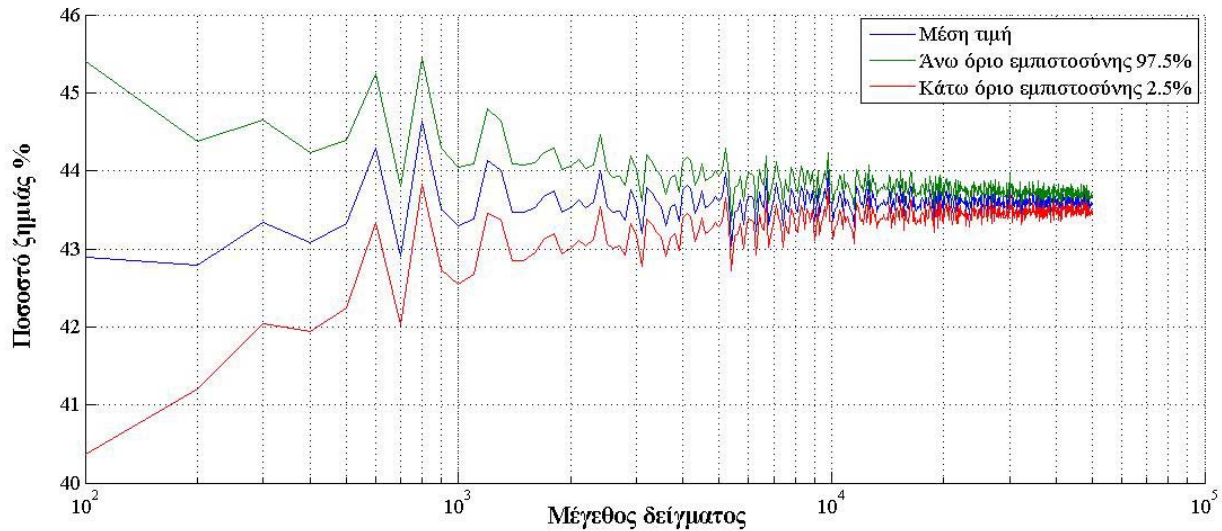
Η επιλογή του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης για την εκτίμηση της μεταβλητής  $y$  απορρίπτεται. Διερευνήθηκε ακόμη, το ενδεχόμενο του μετασχηματισμού (transformation) της εξαρτημένης μεταβλητής  $y$  σε λογαριθμική μορφή ή σε μορφή δυναμοσυνάρτησης με στόχο τη γραμμικοποίηση μη γραμμικών μοντέλων παλινδρόμησης. Ωστόσο, μετά από δοκιμές, θεωρήθηκε ότι οι μετασχηματισμοί αυτοί δεν συνέβαλαν στη βελτίωση της προσαρμογής μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης στα δεδομένα και έτσι απορρίφθηκαν ως προσέγγιση διερεύνησης.

Σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για την υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου (γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward») εξετάζονται με τη γραφική μέθοδο σε χαρτί κανονικής κατανομής πιθανότητας τα σύνολα τιμών του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής (μεταβλητή  $x$ ) και του ποσοστού ζημιάς (μεταβλητή  $y$ ) και διαπιστώνεται ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αντίθετα, σε χωρική μονάδα οικοδομικού τετραγώνου διαπιστώνεται ότι τα σύνολα τιμών των μεταβλητών  $x$  και  $y$ , δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή.

### 12.3.3 Μέθοδος bootstrapping

Η στατιστική μέθοδος «bootstrapping» εφαρμόζεται στο εδάφιο αυτό για τον υπολογισμό του τυπικού σφάλματος της μέσης τιμής ενός δείγματος τιμών ποσοστού ζημιάς. Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι ότι το δείγμα προέρχεται από ένα ανεξάρτητο και ομοιόμορφα κατανομημένο πληθυσμό, γι' αυτό και επιλέγεται δείγμα τιμών ποσοστού ζημιάς το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 100 πλημμυρόπληκτες κατοικίες με παρόμοιες τιμές πλημμυρικής στάθμης.

Η Εικόνα 12-11 δείχνει τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου στο δείγμα. Παρατηρείται ότι όταν ο αριθμός στοιχείων του δείγματος είναι μόλις 100 (αρχικό υποσύνολο), η μέση τιμή του ποσοστού ζημιάς παρουσιάζει τυπικό σφάλμα  $\pm 2.5\%$ , ενώ όταν ο αριθμός αυξηθεί σε 50 000, τότε το τυπικό σφάλμα στην εκτίμηση της μέσης τιμής του ποσοστού ζημιάς ελαχιστοποιείται.



Εικόνα 12-11. Ποσοστό ζημιάς έναντι αριθμού πλημμυρόπληκτων κατοικιών

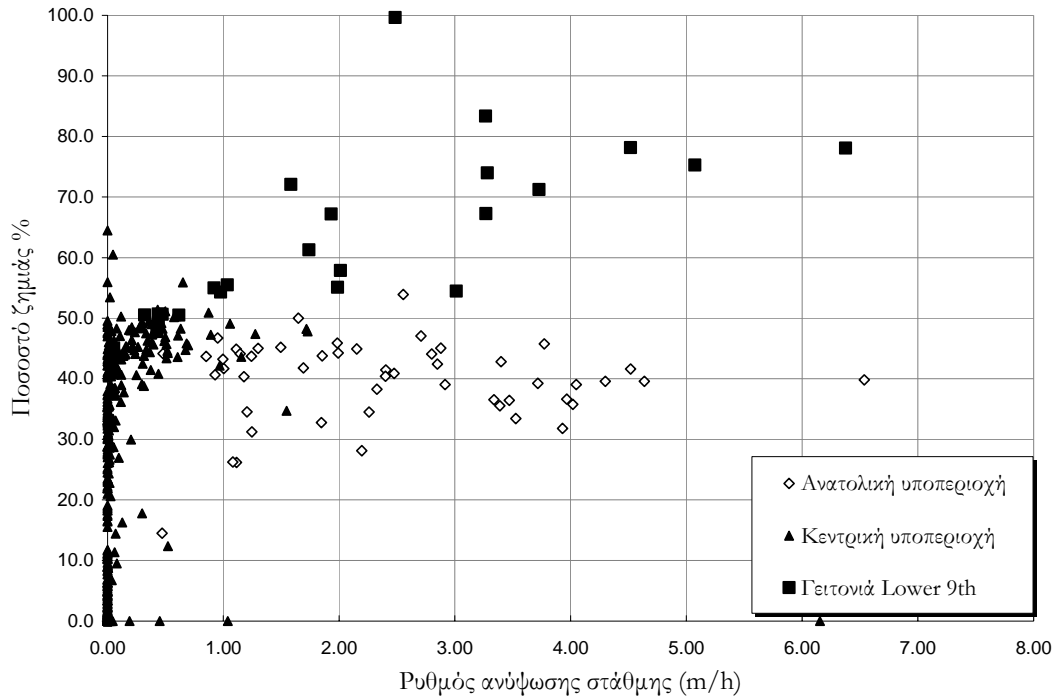
Οι Merz et al. (2004) κατέληξαν επίσης στο ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς μειώνεται όσο ο αριθμός των πλημμυρόπληκτων κτηρίων αυξάνει, με την προϋπόθεση ότι το δείγμα προέρχεται από κατακλυσμένη περιοχή χωρίς μεγάλες διαφοροποιήσεις στη μέγιστη στάθμη πλημμύρας.

## 12.4 Ανάλυση της σχέσης ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και ποσοστού ζημιάς

Ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης περιλαμβάνεται ως πλημμυρικό μέγεθος στην ανάλυση, γιατί θεωρείται μέγεθος που επηρεάζει το διαθέσιμο χρόνο εκκένωσης από την πληγείσα περιοχή (βλέπε εδάφιο 6.1.3.). Η ανάλυση της σχέσης ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και ποσοστού ζημιάς υλοποιείται σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για κάθε υποπεριοχή χωριστά και για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Επίσης, η ανάλυση υλοποιήθηκε για κάθε υποπεριοχή χωριστά και σε χωρική μονάδα διαμερίσματος για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων.

Στην Εικόνα 12-12 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς του ρυθμού ανύψωσης στάθμης πλημμύρας (μεταβλητή  $x$ ) και του ποσοστού ζημιάς (μεταβλητή  $y$ ), ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων. Αρχικά, παρατηρείται ότι για το ίδιο εύρος τιμών του ρυθμού ανύψωσης, οι τιμές εκτίμησης του ποσοστού ζημιάς είναι διαφορετικές για τα σύνολα τιμών της Κεντρικής υποπεριοχής και της γειτονιάς «Lower 9<sup>th</sup> Ward». Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα, ότι μία μονοσήμαντη συνάρτηση για την εκτίμηση του  $y$  ως προς  $x$  δεν είναι εφικτή. Δεύτερον, για το σύνολο τιμών της Κεντρικής υποπεριοχής παρατηρείται μια συγκέντρωση τιμών  $x$  κοντά στη τιμή 0, όταν οι αντίστοιχες τιμές  $y$  είναι σημαντικές, γεγονός που πιθανώς σημαίνει ότι η μεταβλητή  $x$  δεν επαρκεί για την εκτίμηση της μεταβλητής  $y$ . Οι παραπάνω παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι δεν υφίσταται συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών  $x$  και  $y$ , για το σύνολο της περιοχής μελέτης.





Εικόνα 12-12. Διάγραμμα διασποράς του ρυθμού ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης και του ποσοστού ζημιάς, ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων

Η επιβεβαίωση των παρατηρήσεων από το γράφημα γίνεται με τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα, η οποία εφαρμόστηκε και στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα αποτελέσματα είναι μη ικανοποιητικά. Τα διαγράμματα διασποράς των συνόλων δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς για κάθε υποπεριοχή χωριστά και στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης παρατίθενται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π12.1

Η αποτυχία συσχέτισης των μεταβλητών  $x$  και  $y$  μπορεί να οφείλεται εν μέρει και στο γεγονός, ότι ο ρυθμός ανύψωσης στάθμης αναφέρεται εξ ορισμού στο πρώτο 1.5 m βάθους νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κατακλυσμένες περιοχές, στις οποίες η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε το 1.5 m βάθος νερού, να υπολογίζονται οι μη μηδενικές ανηγμένες τιμές της μεταβλητής  $x$ , ενώ αντίθετα σε κατακλυσμένες περιοχές, στις οποίες η μέγιστη στάθμη πλημμύρας υπολογίστηκε κάτω από 1.5 m βάθος νερού, να υπολογίζονται μηδενικές τιμές της μεταβλητής  $x$ . Ακολουθώντας αυτό το σκεπτικό μπορεί να εξηγηθεί η μεγάλη διασπορά που εμφανίζει το σύνολο των τιμών  $x$  γύρω από τη μέση τιμή και το γεγονός ότι οι τιμές της μεταβλητής  $x$  προκύπτουν μεγαλύτερες όσο πιο λεπτομερές γίνεται το χωρικό επίπεδο της ανάλυσης (από χωρική μονάδα διαμερίσματος σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, ο ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης δεν επαρκεί για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς και κατά συνέπεια το πλημμυρικό αυτό μέγεθος δεν συμμετείχε περαιτέρω στην ανάλυση ζημιάς.

## 12.5 Ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς

Στο υποκεφάλαιο λαμβάνει χώρα η στατιστική ανάλυση της σχέσης του βάθους νερού και του ποσοστού ζημιάς για κάθε υποπεριοχή χωριστά και για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Η ανάλυση υλοποιείται σε μεσοκλίμακα εφαρμόζοντας τις επιμέρους χωρικές μονάδες ανάλυσης του οικοδομικού τετραγώνου, της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και του διαμερίσματος. Η χωρική μονάδα του οικοδομικού τετραγώνου δεν

είναι διαθέσιμη για το σύνολο της περιοχής μελέτης και κατά συνέπεια εφαρμόζεται μόνο στην υποπεριοχή του Αγ. Βερνάρδου (γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»).

Τα στάδια της στατιστικής ανάλυσης διακρίνονται στην επιλογή και προσαρμογή της συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα, στην εκτίμηση των συντελεστών της συνάρτησης και σε έλεγχο καταλληλότητας της προσαρμογής. Οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης  $a$  και  $b$  εκτιμούνται με τη μέθοδο του ελάχιστου αθροίσματος των τετραγώνων των καταλοίπων (Least Sum of Squares Error – LSSE). Ο έλεγχος καταλληλότητας πραγματοποιείται με τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και τον έλεγχο σημαντικότητάς του. Υπενθυμίζεται ότι ως εξαρτημένη μεταβλητή  $y$ , θεωρείται η αδιάστατη μεταβλητή του ποσοστού ζημιάς και ως ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$ , θεωρείται το βάθος νερού.

Από τον έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων, διαπιστώθηκε ότι το σύνολο τιμών ποσοστού ζημιάς δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Επομένως, στην ανάλυση εφαρμόζονται μοντέλα μη γραμμικής παλινδρόμησης για την προσαρμογή συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα. Ο Πίνακας 12-2 παρουσιάζει τον τύπο και την εξίσωση των επιλεγμένων συναρτήσεων, που είχαν ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη δυνατή προσαρμογή στα δεδομένα.

Πίνακας 12-2. Επιλεγμένες στατιστικές κατανομές για την ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης
Εκθετική συνάρτηση	$y = 1 - e^{-b(x-a)}$
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	$y = b\sqrt{(x-a)}$

Στα ακόλουθα εδάφια περιγράφεται η ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για κάθε υποπεριοχή χωριστά, λόγω της διαφοροποίησης των πλημμυρικών συνθηκών και του τύπου άμεσης ζημιάς σε κάθε υποπεριοχή και για το σύνολο της περιοχής μελέτης.

### 12.5.1 Υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου (γειτονιά «Lower 9th Ward»)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 11, η γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» έπαθε εκτεταμένες βλάβες στις κατοικίες. Ιδιαίτερα κοντά στα ρήγματα των αναχωμάτων, οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής προέκυψαν ως οι υψηλότερες τιμές στο σύνολο της περιοχής μελέτης. Επομένως, πιθανόν, η ταχύτητα ροής να παίζει σημαντικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε κατοικίες στην υποπεριοχή αυτή. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, επιλέγεται να εφαρμοστεί και το πιο λεπτομερές χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας, δηλαδή το χωρικό επίπεδο του οικοδομικού τετραγώνου, για την ανάλυση της σχέσης βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς στην υποπεριοχή αυτή. Επίσης, η ανάλυση πραγματοποιείται και στις χωρικές μονάδες της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και του διαμερίσματος αντίστοιχα για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων. Ο Πίνακας 12-3 δίνει τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής των μοντέλων μη γραμμικής παλινδρόμησης και για τα τρία χωρικά επίπεδα ανάλυσης.

Πίνακας 12-3. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	Συντελεστές παλινδρόμησης		LSSE
			a	b	
Εκθετική	$y = 1 - e^{(-b(x-a))}$	Διαμέρισμα	-2.194	0.185	0.040
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-1.502	0.209	0.243
		Οικοδομικό τετράγωνο	-1.912	0.191	7.774
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	$y = b\sqrt{(x-a)}$	Διαμέρισμα	-1.237	0.299	0.039
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-0.695	0.316	0.189
		Οικοδομικό τετράγωνο	-0.969	0.304	7.691

Πίνακας 12-4. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Εκθετική	Διαμέρισμα	0.55	0.75	Οριακά αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.45	0.40	Αποδεκτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.24	0.10	Αποδεκτή
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	Διαμέρισμα	0.56	0.75	Οριακά αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.57	0.40	Αποδεκτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.25	0.10	Αποδεκτή

Σύμφωνα με τον Πίνακα 12-3, η προσαρμογή της συνάρτησης τετραγωνικής ρίζας στα δεδομένα έδωσε λίγο καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις χωρικές μονάδες ανάλυσης σε σύγκριση με την εκθετική συνάρτηση. Παρατηρείται ότι η συσχέτιση των μεταβλητών  $x$  και  $y$  εξαρτάται άμεσα από την χωρική μονάδα ανάλυσης. Όταν η χωρική μονάδα ανάλυσης γίνει πιο λεπτομερές, δηλαδή μεταβληθεί από διαμέρισμα σε ομάδα οικοδομικών τετραγώνων, η συσχέτιση του βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς είναι οριακά αποδεκτή με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  στατιστικά σημαντικό και οριακά ίσο με 0.5. Όταν όμως εφαρμοστεί η χωρική μονάδα του οικοδομικού τετραγώνου στην υποπεριοχή, η συσχέτιση του βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς δεν είναι πλέον εφικτή. Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι στη συγκεκριμένη υποπεριοχή μόνο το βάθος νερού (ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$ ) δεν επαρκεί για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς (εξαρτημένη μεταβλητή  $y$ ).

### 12.5.2 Κεντρική υποπεριοχή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 11, στην Κεντρική υποπεριοχή οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής είναι γενικά μικρές. Επομένως, το βάθος νερού είναι πιθανόν να παίζει καθοριστικό ρόλο στην

πρόκληση άμεσης ζημιάς σε κατοικίες στην υποπεριοχή αυτή και κατά συνέπεια κατάλληλο χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας θεωρείται ότι είναι η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων. Επιπλέον η ανάλυση πραγματοποιείται σε χωρική μονάδα διαμερίσματος για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων. Ο Πίνακας 12-5 δίνει τα αποτελέσματα της βέλτιστης προσαρμογής των μοντέλων μη γραμμικής παλινδρόμησης και στα δύο χωρικά επίπεδα ανάλυσης.

Πίνακας 12-5. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για την Κεντρική υποπεριοχή

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	Συντελεστές παλινδρόμησης		LSSE
			a	b	
Εκθετική	$y = 1 - e^{(-b(x-a))}$	Διαμέρισμα	-0.808	0.185	1.657
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-0.638	0.200	4.172
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	$y = b\sqrt{(x - a)}$	Διαμέρισμα	-0.164	0.262	1.591
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.187	0.308	3.975

Πίνακας 12-6. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Εκθετική	Διαμέρισμα	0.34	0.20	Αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.37	0.12	Αποδεκτή
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	Διαμέρισμα	0.38	0.20	Αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.40	0.12	Αποδεκτή

Σύμφωνα με τον Πίνακα 12-5 τα αποτελέσματα της προσαρμογής των δύο τύπων συνάρτησης στα δεδομένα και στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης συγκλίνουν. Παρατηρείται ότι η συσχέτιση των μεταβλητών  $x$  και  $y$  δεν είναι ικανοποιητική και επίσης ότι δεν εξαρτάται άμεσα από την χωρική μονάδα ανάλυσης. Όταν η χωρική μονάδα ανάλυσης γίνει πιο λεπτομερής, δηλαδή μεταβληθεί από διαμέρισμα σε ομάδα οικοδομικών τετραγώνων, η συσχέτιση του βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς βελτιώνεται οριακά, ωστόσο όμως ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  παραμένει μικρότερος της τιμής 0.5. Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι στη συγκεκριμένη υποπεριοχή μόνο το βάθος νερού (ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$ ) δεν επαρκεί για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς (εξαρτημένη μεταβλητή  $y$ ). Τέλος, παρατηρείται ότι οι παράμετροι  $a$  και  $b$  των συναρτήσεων προκύπτουν με παρόμοιες τιμές και στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης, γεγονός που αποδεικνύει συνέπεια των δεδομένων ως προς τις τιμές αυτές.

### 12.5.3 Ανατολική υποπεριοχή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 11, στην Ανατολική υποπεριοχή οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής είναι γενικά μικρές και οι προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού είναι γενικά μεγάλες. Επομένως πιθανόν, το βάθος νερού να παίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε κατοικίες στην υποπεριοχή αυτή. Συνεπώς κατάλληλο χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας θεωρείται ότι είναι η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων. Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιείται σε χωρική μονάδα διαμερίσματος για λόγους σύ-

γυρισής των γεωγραφικών οντοτήτων.

Η προσαρμογή των μοντέλων μη γραμμικής παλινδρόμησης, δηλαδή της εκθετικής συνάρτησης και της συνάρτησης τετραγωνικής ρίζας, στα δεδομένα έχει ως αποτέλεσμα ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  να τείνει στο μηδέν. Επομένως, θεωρείται ότι συσχέτιση μεταξύ βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς δεν υφίσταται για την υποπεριοχή αυτή ανεξάρτητα από την χωρική μονάδα ανάλυσης.

### 12.5.4 Σύνολο της περιοχής μελέτης

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της σχέσης του βάθους νερού και του ποσοστού ζημιάς για κάθε υποπεριοχή χωριστά προκύπτουν διαφορετικές παρατηρήσεις ως προς την χωρική κλίμακα ανάλυσης. Ωστόσο, για όλες τις υποπεριοχές ισχύει η παρατήρηση ότι το βάθος νερού δεν αρκεί για τη στατιστική πρόγνωση του ποσοστού ζημιάς, αφού η συσχέτιση των δύο μεταβλητών προκύπτει αδύναμη. Στο εδάφιο αυτό η ανάλυση εφαρμόζεται στο σύνολο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας τους ίδιους τύπους συνάρτησης κατανομής. Ως πιο κατάλληλη χωρική μονάδα ανάλυσης θεωρείται η ομάδα οικοδομικών τετραγώνων λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής στην οποία εφαρμόζεται η ανάλυση. Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιείται σε χωρική μονάδα διαμερίσματος για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής των μοντέλων μη γραμμικής παλινδρόμησης στο σύνολο της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 12-7 και στον Πίνακα 12-8.

Πίνακας 12-7. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για το σύνολο της περιοχής μελέτης

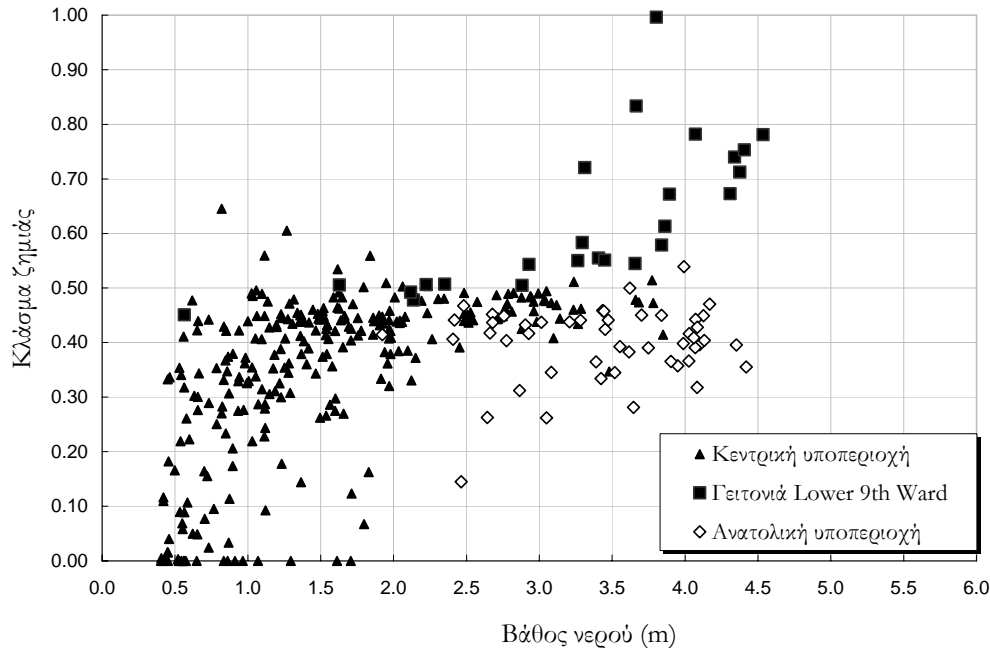
Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	Συντελεστές παλινδρόμησης		LSSE
			a	b	
Εκθετική	$y = 1 - e^{-b(x-a)}$	Διαμέρισμα	-1.387	0.140	2.163
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-1.194	0.153	5.849
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	$y = b\sqrt{(x-a)}$	Διαμέρισμα	-0.164	0.262	2.059
		Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-0.056	0.273	5.667

Πίνακας 12-8. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Εκθετική	Διαμέρισμα	0.35	0.18	Αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.36	0.11	Αποδεκτή
Συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας	Διαμέρισμα	0.38	0.18	Αποδεκτή
	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.38	0.11	Αποδεκτή

Παρατηρείται ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής των συγκεκριμένων συναρτήσεων κατανομής στα δεδομένα για το σύνολο της περιοχής μελέτης προσεγγίζουν τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσμα-

τα που προέκυψαν για την Κεντρική υποπεριοχή, αφού η Κεντρική υποπεριοχή καλύπτει πάνω από το 75% του συνόλου των πλημμυρόπληκτων κατοικιών στην περιοχή μελέτης. Συνεπώς, προκύπτει ότι η συσχέτιση μεταξύ βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς δεν είναι ικανοποιητική για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Η Εικόνα 12-13 δείχνει το διάγραμμα διασποράς τιμών βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς ανηγμένων σε χωρική μονάδα της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για το σύνολο της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 12-13. Διάγραμμα διασποράς βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για το σύνολο της περιοχής μελέτης

Προκύπτουν δυο βασικές παρατηρήσεις από το διάγραμμα διασποράς της Εικόνας 12-13. Η πρώτη παρατήρηση αφορά τα δεδομένα της Κεντρικής υποπεριοχής, που αντιστοιχούν σε τιμές βάθους νερού μικρότερες από 1 m και σε τιμές ποσοστού ζημιάς μικρότερες από την τιμή 10%. Η ύπαρξη αυτής της συστάδας δεδομένων μπορεί να δικαιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη δυο παράγοντες: α) την ύπαρξη συγκεκριμένων τύπων κατοικίας στην Κεντρική υποπεριοχή, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υπερύψωση του δαπέδου του ισόγειου μόλις λίγες δεκάδες εκατοστά (0.30 - 0.70 m) λόγω ημιυπογείων χώρων πάνω από το φυσικό έδαφος και β) την τοπογραφία της Κεντρικής υποπεριοχής, η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλα υψόμετρα εδάφους, ειδικά οι περιοχές που βρίσκονται στα όρια της κατακλυσμένης έκτασης (βλέπε Εικόνα 12-3).

Η δεύτερη παρατήρηση αφορά το γεγονός ότι στην πλειοψηφία των δεδομένων ζημιάς αντιστοιχούν τιμές του ποσοστού ζημιάς ίσες ή μικρότερες από την τιμή 50%. Εξαιρεση αποτελούν τα δεδομένα ζημιάς που ανήκουν στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward», η πλειοψηφία των οποίων εκτιμήθηκε με ποσοστό ζημιάς μεγαλύτερο του 50%. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μόνο το βάθος νερού δεν επαρκεί για την εκτίμηση μίας τιμής ποσοστού ζημιάς μεγαλύτερης από το κατώφλι του 50% για τους συγκεκριμένους τύπους κατοικίας.

Τέλος, σημαντικό αποτέλεσμα της ανάλυσης αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης του χωρικού επιπέδου ανάλυσης στη συσχέτιση των δύο μεταβλητών του βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης έδειξαν ότι η πιο αδρομερής χωρική μονάδα ανάλυσης, δηλαδή το διαμέρισμα, έχει ως αποτέλεσμα αδύναμη συσχέτιση μεταξύ στατιστικών προγνώσεων και παρατηρημένων τιμών του ποσοστού ζημιάς. Επίσης, η πιο λεπτομερής χωρική μονάδα ανάλυσης, δηλαδή το οικοδομικό τετράγωνο, έχει

ως αποτέλεσμα τη σημαντική διαφοροποίηση των τιμών ποσοστού ζημιάς και κατά συνέπεια μόνο το βάθος νερού δεν επαρκεί για την εκτίμηση της ζημιάς. Συνήθως δεν υφίσταται μονοσήμαντη συνάρτηση μεταξύ βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς σε χωρική μονάδα ανάλυσης υψηλής διακριτοποίησης.

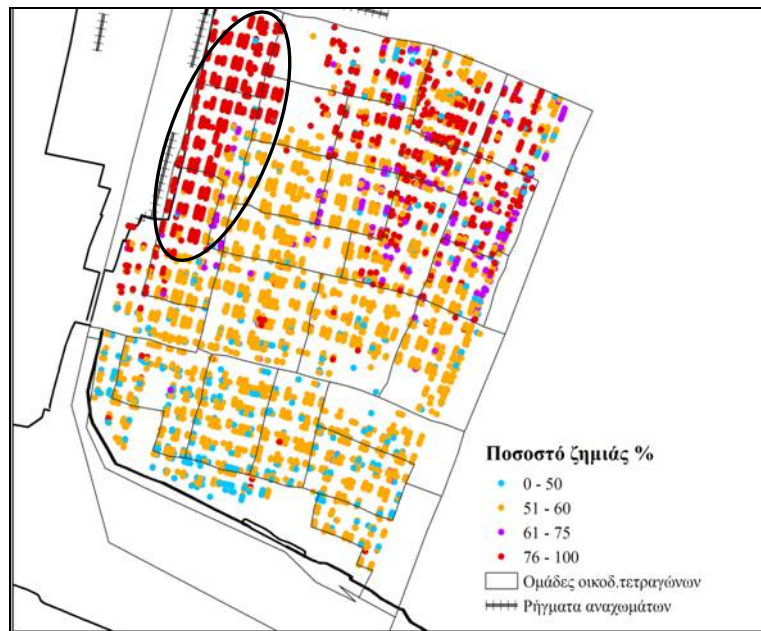
Η τελευταία παρατήρηση σχετίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς, η οποία λαμβάνει υπόψη μόνο το βάθος νερού στην εκτίμηση της ζημιάς. Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της μεθόδου σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε μεμονωμένο κτήριο ή σε μικρή συστάδα κτηρίων δεν δίνει επαρκή αποτελέσματα στατιστικής πρόγνωσης του ποσοστού ζημιάς [Pistrika and Jonkman 2009]. Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι όσο ο αριθμός των πλημμυρόπληκτων κατοικιών που περιλαμβάνονται στη χωρική μονάδα ανάλυσης, αυξάνει τόσο η διαφοροποίηση των τιμών ποσοστού ζημιάς εξομαλύνεται και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης βελτιώνονται. Επομένως, εάν η ανάλυση επεκταθεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια δομημένης περιοχής, τότε η σχέση βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς βελτιώνεται. Επομένως η μέθοδος της σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς θεωρείται αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης άμεσης οικονομικής ζημιάς, όταν εφαρμόζεται σε σχετικά μεγάλο αριθμό πλημμυρόπληκτων κατοικιών. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε προγενέστερο ερευνητικό έργο [Merz et al. 2004, Thieken et al. 2008] για τις εκτιμήσεις άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον λόγω της υπερχείλισης του ποταμού Έλβα στη Γερμανία το 2002.

## 12.6 Ανάλυση της σχέσης γινομένου $dv$ και ποσοστού ζημιάς

Από την ανάλυση του προηγούμενου υποκεφαλαίου, προέκυψε το συμπέρασμα ότι μόνο το βάθος νερού δεν είναι ικανό να προκαλέσει τις παρατηρημένες τιμές βλάβης σε κατοικίες στην περιοχή μελέτης. Σε αυτό το υποκεφάλαιο εξετάζεται η ταυτόχρονη επίδραση του βάθους νερού  $d$  [m], και της ταχύτητας ροής  $v$  [m/s], στην πρόκληση άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης ανάλυσης, οι μέγιστες τιμές βάθους νερού  $d_{max}$ , και ταχύτητας ροής  $v_{max}$ , που προέκυψαν από την προσομοίωση της πλημμύρας συνδυάζονται για να προσδιορίσουν το πλημμυρικό μέγεθος  $dv$  [m<sup>2</sup>/s]. Το μέγεθος αυτό περιγράφεται θεωρητικά στο εδάφιο 6.1.2.

Η ανάλυση της σχέσης γινομένου  $dv$  και ποσοστού ζημιάς υλοποιήθηκε μόνο για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward», που ανήκει στην υποπεριοχή Αγ. Βερνάρδου. Σύμφωνα με τη στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων ζημιάς οι εκτιμώμενες τιμές ποσοστού ζημιάς στην περιοχή αυτή είναι οι υψηλότερες στην πόλη. Η γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» περιλαμβάνει περίπου 5 820 πλημμυρόπληκτες κατοικίες, οι οποίες αντιστοιχούν σχεδόν στο 90% του συνόλου των κατοικιών στην περιοχή αυτή. Συνεπώς, η περιοχή αυτή έπαθε εξαιρετικά εκτεταμένες βλάβες στις κατοικίες κυρίως λόγω των πρωτεύοντων ρηγμάτων στα περιμετρικά αντιπλημμυρικά αναχώματα. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, οι προσομοιωμένες τιμές της ταχύτητας ροής σε αυτή την περιοχή είναι πολύ πιο υψηλές σε σύγκριση με τις άλλες περιοχές της Νέας Ορλεάνης (βλέπε Εικόνα 12-4). Η Εικόνα 12-14 απεικονίζει την χωρική κατανομή των τιμών ποσοστού ζημιάς ανά κατοικία στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ.

Η Εικόνα 12-15 δείχνει μια τυπική εικόνα ισοπεδωμένων κατοικιών που βρίσκονταν ακριβώς κατάντη από το πρωτεύον ρήγμα των περιμετρικών αναχωμάτων. Η λήψη της φωτογραφίας έγινε από τη θέση ρήγματος στο περιμετρικό ανάχωμα με κατεύθυνση ανατολικά. Επομένως, η φωτογραφία στην Εικόνα 12-15 συμφωνεί με τις εκτιμήσεις των τιμών ποσοστού ζημιάς στην Εικόνα 12-14, στην οποία οι τιμές ποσοστού ζημιάς προσεγγίζουν την τιμή 100% για τη ζώνη ακριβώς κατάντη του ρήγματος που απεικονίζεται στη φωτογραφία.



Εικόνα 12-14. Δεδομένα ζημιάς ανά πλημμυρόπληκτη κατοικία στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ



Εικόνα 12-15. Γειτονιά Lower 9<sup>th</sup> Ward: θέα προς τα ανατολικά από το ανάχωμα στη θέση του ρήγματος του περιμετρικού αναχώματος (Ημερομηνία λήψης: 20 Φεβρουαρίου 2006)

Η ανάλυση υλοποιείται εφαρμόζοντας το οικοδομικό τετράγωνο ως χωρική μονάδα ανάλυσης, η οποία θεωρείται κατάλληλη για τη συγκεκριμένη ανάλυση λόγω της συμμετοχής της ταχύτητας ροής στην πρόκληση ζημιάς. Επίσης, η ανάλυση υλοποιήθηκε και σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για λόγους σύγκρισης.

Τα στάδια της στατιστικής ανάλυσης διακρίνονται στην επιλογή και προσαρμογή της συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα, σε εκτίμηση των συντελεστών της συνάρτησης και σε έλεγχο καταλληλότητας της προσαρμογής. Ο έλεγχος καταλληλότητας πραγματοποιείται με τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και τον έλεγχο της σημαντικότητάς του. Υπενθυμίζεται ότι ως εξαρτημένη μεταβλητή  $y$ , θεωρείται η αδιά-



στατη μεταβλητή του ποσοστού ζημιάς και ως ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  θεωρείται το γινόμενο  $dh$ . Η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών  $x$  και  $y$  δεν περιλαμβάνει τις τιμές του βάρους νερού που εξαιρέθηκαν στο εδάφιο 12.3.1.

Ο έλεγχος κανονικότητας των δεδομένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων έδειξε ότι τα σύνολα τιμών του γινομένου  $dh$  και του ποσοστού ζημιάς ακολουθούν την κανονική κατανομή, ενώ σε χωρική μονάδα οικοδομικού τετραγώνου διαπιστώνεται ότι τα σύνολα τιμών των μεταβλητών  $x$  και  $y$  δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επομένως, στην ανάλυση εφαρμόζονται μοντέλα γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης για την προσαρμογή συνάρτησης κατανομής στα δεδομένα. Ο Πίνακας 12-9 παρουσιάζει τον τύπο και την εξίσωση των επιλεγμένων συναρτήσεων.

Πίνακας 12-9. Επιλεγμένες στατιστικές κατανομές για την ανάλυση της σχέσης γινομένου  $dh$  και ποσοστού ζημιάς

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης
Γραμμική	$y = b x + \alpha$
Λογαριθμική συνάρτηση	$y = b \log(x) + \alpha$
Λογαριθμοκανονική συνάρτηση	$y = \log \text{normdist}(x, \text{mean}, \text{stdv})$

Για λόγους πληρότητας, η στατιστική ανάλυση της σχέσης γινομένου  $dh$  και ποσοστού ζημιάς πραγματοποιείται στις υπόλοιπες υποπεριοχές της πόλης, δηλαδή στην Κεντρική υποπεριοχή και στην Ανατολική υποπεριοχή. Η ανάλυση αυτή υλοποιείται σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων και σε χωρική μονάδα διαμερίσματος για λόγους σύγκρισης των γεωγραφικών οντοτήτων. Όπως είναι αναμενόμενο, ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  προκύπτει για όλα τα χωρικά επίπεδα ανάλυσης με τιμές πολύ πιο μικρές του 0.5 και κατά συνέπεια η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών θεωρείται αδύναμη στις υποπεριοχές αυτές. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρατίθενται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π12.2.

Στα ακόλουθα εδάφια περιγράφεται η ανάλυση της σχέσης γινομένου  $dh$  και ποσοστού ζημιάς για τη γειτονιά 'Lower 9<sup>th</sup> Ward' και η διερεύνηση προσαρμογής ενός μη γραμμικού συνδυασμού βάρους νερού και ταχύτητας ροής στα δεδομένα.

### 12.6.1 Υποπεριοχή «Αγ. Βερνάρδου» (γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»)

Ο Πίνακας 12-10 δίνει τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσαρμογής των μοντέλων μη γραμμικής παλινδρόμησης στις χωρικές μονάδες του οικοδομικού τετραγώνου και της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων.

Πίνακας 12-10. Συνάρτηση κατανομής βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»

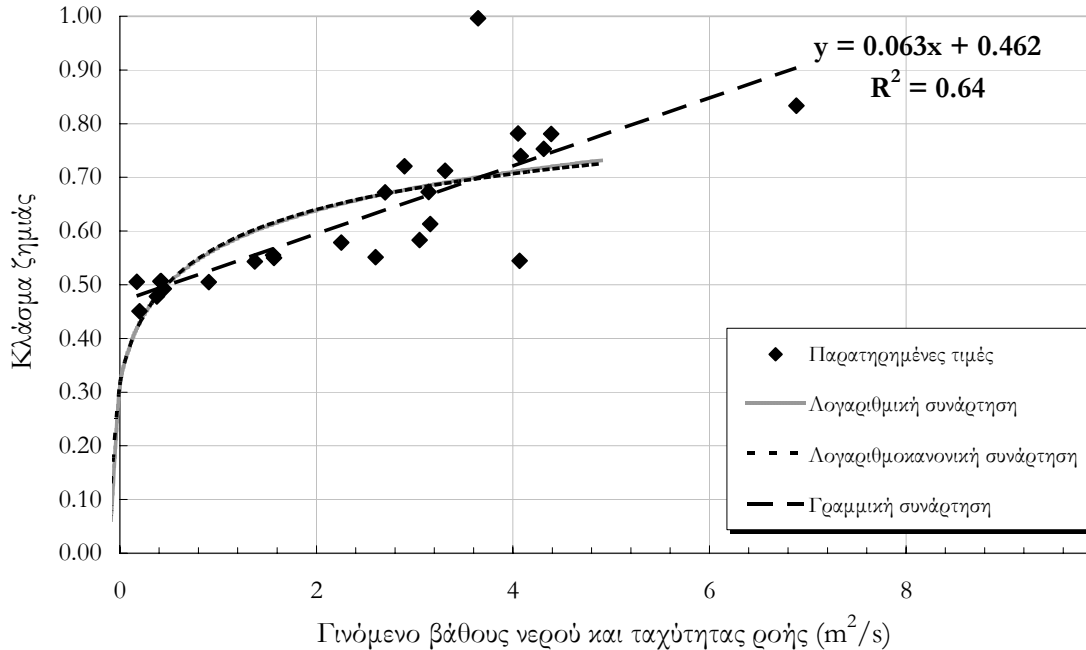
Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	Συντελεστές παλινδρόμησης	
			a	b
Γραμμική	$y = b x + \alpha$	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.462	0.063
		Οικοδομικό τετράγωνο	0.496	0.050
Λογαριθμική συνάρτηση	$y = b \log(x) + \alpha$	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.558	0.248
		Οικοδομικό τετράγωνο	0.577	0.198
Λογαριθμοκανονική συνάρτηση	$y = \log \text{normdist}(x, \text{mean}, \text{stdv})$	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	-0.549	3.602
		Οικοδομικό τετράγωνο	-0.760	4.144

Πίνακας 12-11. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Γραμμική	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.64	0.44	Αποδεικτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.36	0.10	Αποδεικτή
Λογαριθμική συνάρτηση	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.57	0.44	Αποδεικτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.32	0.10	Αποδεικτή
Λογαριθμοκανονική συνάρτηση	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.56	0.44	Αποδεικτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.32	0.10	Αποδεικτή

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη συσχέτιση ( $R^2 = 0.64$ ) των μεταβλητών  $x$  και  $y$ , επιτυγχάνεται με τη συνάρτηση γραμμικής μορφής. Όταν η χωρική μονάδα ανάλυσης γίνει πιο λεπτομερής τότε η συσχέτιση των μεταβλητών με τη συνάρτηση γραμμικής μορφής αποδυναμώνεται ( $R^2 = 0.36$ ). Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τη συσχέτιση των μεταβλητών  $x$  και  $y$  με τις συναρτήσεις λογαριθμικού και λογαριθμοκανονικού τύπου. Επίσης, παρατηρείται ότι οι συντελεστές παλινδρόμησης  $a$  και  $b$  για κάθε τύπο συνάρτησης έχουν παρόμοιες τιμές και στα δύο χωρικά επίπεδα ανάλυσης, γεγονός που αποδίδεται στη συνέπεια των μεταβλητών ως προς τις επιλεγμένες συναρτήσεις.

Οι επιλεγμένες συναρτήσεις και οι παρατηρημένες τιμές δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς σε χωρικό επίπεδο ομάδας οικοδομικών τετραγώνων απεικονίζονται στην Εικόνα 12-16.

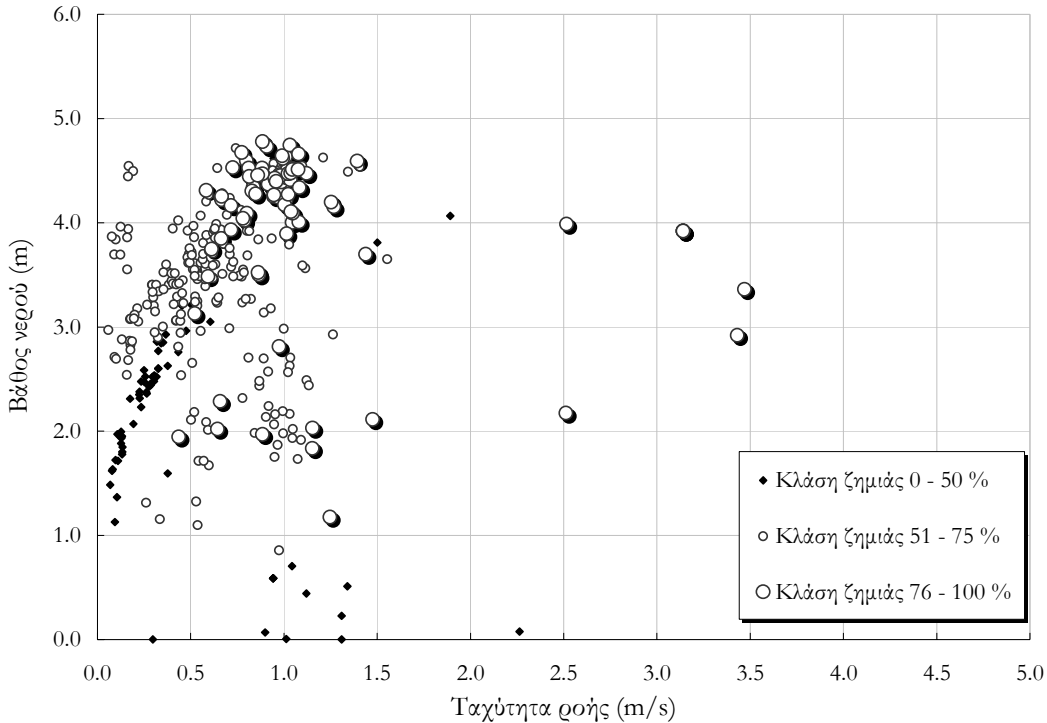


Εικόνα 12-16. Ανάλυση σχέσης γινόμενου  $dh$  και ποσοστού ζημιάς στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»

Η ανάλυση μέχρι τώρα υποθέτει ότι το πλημμυρικό μέγεθος του γινομένου  $dh$  αποτελεί την ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  στην συνάρτηση προσαρμογής. Στο εδάφιο που ακολουθεί γίνεται διερεύνηση της επίδρασης μη γραμμικού συνδυασμού του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής στην πρόκληση άμεσης ζημιάς και κατά συνέπεια στην εκτίμηση του μεγέθους «ποσοστό ζημιάς».

### 12.6.2 Μη γραμμικός συνδυασμός βάθους νερού και ταχύτητας ροής για την εκτίμηση ποσοστού ζημιάς

Η ανάλυση προχώρησε σε διερεύνηση της επίδρασης του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής στις εκτιμώμενες τιμές του ποσοστού ζημιάς, διακρίνοντας τις ακόλουθες τρεις κλάσεις τιμών ποσοστού ζημιάς: (α) 0 – 50 %, (β) 51 – 75 % και (γ) 76 – 100 %. Τα δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς σε χωρικό επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» απεικονίζονται στην Εικόνα 12-17.



Εικόνα 12-17. : Κλάσεις ζημιάς ως συναρτήσεις του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής στη «Lower 9<sup>th</sup> Ward»

Στην Εικόνα 12-17 παρατηρείται ότι οι υψηλές τιμές ποσοστού ζημιάς αντιστοιχούν ταυτόχρονα σε υψηλές τιμές του βάθους νερού και σε υψηλές τιμές της ταχύτητας ροής αντίστοιχα. Οι τιμές ποσοστού ζημιάς που αντιστοιχούν στις διακριτές κλάσεις ζημιάς εμφανίζουν κάποια συγκέντρωση τοπικά στο γράφημα, ωστόσο δεν διακρίνονται με ευκρίνεια σε ζώνες ζημιάς συναρτήσε του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Επίσης, σημειώνεται ότι, εάν οι παρατηρημένες τιμές ποσοστού ζημιάς για την Κεντρική υποπεριοχή υπερτεθούν στο γράφημα, οι περισσότερες από αυτές συγκεντρώνονται στην κάτω αριστερή γωνία του γραφήματος. Η περιοχή αυτή οριοθετείται από τις τιμές βάθους νερού  $d = 3$  m και ταχύτητας ροής  $v = 0.5$  m/s, η οποία σύμφωνα με το γράφημα, αντιστοιχεί κυρίως σε τιμές ποσοστού ζημιάς μικρότερες από την τιμή του 50%. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με την πραγματικότητα για την πλειοψηφία των εκτιμώμενων τιμών ποσοστού ζημιάς ανηγμένων σε χωρική μονάδα ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για την Κεντρική υποπεριοχή.

Στη συνέχεια εξετάστηκε το ενδεχόμενο προσαρμογής μη γραμμικής συνάρτησης στα δεδομένα συνδυάζοντας τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές  $x_1$  (βάθος νερού) και  $x_2$  (ταχύτητα ροής). Γι' αυτόν το σκοπό διερευνήθηκαν μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης σε δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης, ομάδα οικοδομικών τετραγώνων και οικοδομικό τετράγωνο. Τα αποτελέσματα της βέλτιστης προσαρμογής στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 12-12.

Πίνακας 12-12. Προσαρμογή μη γραμμικής συνάρτησης βάθους νερού και ταχύτητας στα δεδομένα ζημιάς

Τύπος συνάρτησης	Εξίσωση συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	Συντελεστές παλινδρόμησης		
			a	b	c
Μη γραμμική	$y = a + bx_1x_2^c$	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.422	0.075	0.682
		Οικοδομικό τετράγωνο	0.457	0.063	0.654

Πίνακας 12-13. Έλεγχος καταλληλότητας προσαρμογής της συνάρτησης και σημαντικότητας του  $R^2$

Τύπος συνάρτησης	Χωρική κλίμακα	$R^2$	$R_c$	Σημαντικότητα του $R^2$
Μη γραμμική	Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	0.654	0.44	Αποδεικτή
	Οικοδομικό τετράγωνο	0.364	0.10	Αποδεικτή

Σύμφωνα με τον Πίνακα 12-12, το μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης έχει ως αποτέλεσμα παρόμοιες τιμές για τους συντελεστές παλινδρόμησης  $a$ ,  $b$ , και  $c$  και στις δύο χωρικές μονάδες ανάλυσης, γεγονός που δείχνει ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνεπείς ως προς τη συμπεριφορά τους στο μοντέλο παλινδρόμησης. Επίσης, παρατηρείται ότι η πιο λεπτομερής χωρική μονάδα του οικοδομικού τετραγώνου έχει ως αποτέλεσμα στην ανάλυση αδύναμο βαθμό συσχέτισης μεταξύ στατιστικών προγνώσεων και παρατηρημένων τιμών ποσοστού ζημιάς σε αντίθεση με την χωρική μονάδα της ομάδας οικοδομικών τετραγώνων για την οποία ο βαθμός συσχέτισης προκύπτει ικανοποιητικός.

Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές  $x_1$  (βάθος νερού) και  $x_2$  (ταχύτητα ροής) δίνει παρόμοια αριθμητικά αποτέλεσμα βαθμού συσχέτισης με το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης με μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή  $x$  (το γινομένου  $dh$ ). Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την χωρική μονάδα ανάλυσης. Επομένως, η ανάλυση της σχέσης του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής και του ποσοστού ζημιάς δεν καταλήγει στην ανάπτυξη εμπειρικής στατιστικής συνάρτησης. Στο επόμενο υποκεφάλαιο υλοποιείται μία εναλλακτική προσέγγιση εκτίμησης της συσχέτισης μεταξύ των πλημμυρικών μεγεθών και του ποσοστού ζημιάς με την ανάπτυξη κριτηρίου ζημιάς.

## 12.7 Κριτήριο ζημιάς

Αυτό το υποκεφάλαιο στοχεύει στην ανάπτυξη κριτηρίου ζημιάς με βάση τα πλημμυρικά μεγέθη του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής με στόχο τη ζωνοποίηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς είτε σε κλάσεις τιμών ποσοστού ζημιάς είτε σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής.

Για τη διερεύνηση αυτή αναζητήθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία ποσοτικά κριτήρια άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον με βάση τα μεγέθη πλημμύρας. Περίπτωση διαδεδομένου κριτηρίου πλημμυρικής ζημιάς για τον τύπο πλημμύρας λόγω αστοχίας αναχώματος, αποτελεί η δημοσιευμένη εργασία της L. Clausen (1989) στο Πανεπιστήμιο του Κέμπριτζ. Το περιεχόμενο της εργασίας αυτής περιγράφηκε στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης στο εδάφιο 4.4.2. Το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen σχετίζεται

με τα πλημμυρικά μεγέθη του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής και έχει ως αποτέλεσμα τη ζωνοποίηση της άμεσης ζημιάς σε ζώνες ποιοτικής περιγραφής. Σύμφωνα με το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen, ισχύει:

Για είτε  $v < 2$  m/s είτε  $dv < 3$  m<sup>2</sup>/s προκύπτει ζώνη με «ζημιά από κατάκλυση»

Για  $v > 2$  m/s και  $3$  m<sup>2</sup>/s  $< dv < 7$  m<sup>2</sup>/s προκύπτει ζώνη με «μερική ζημιά»

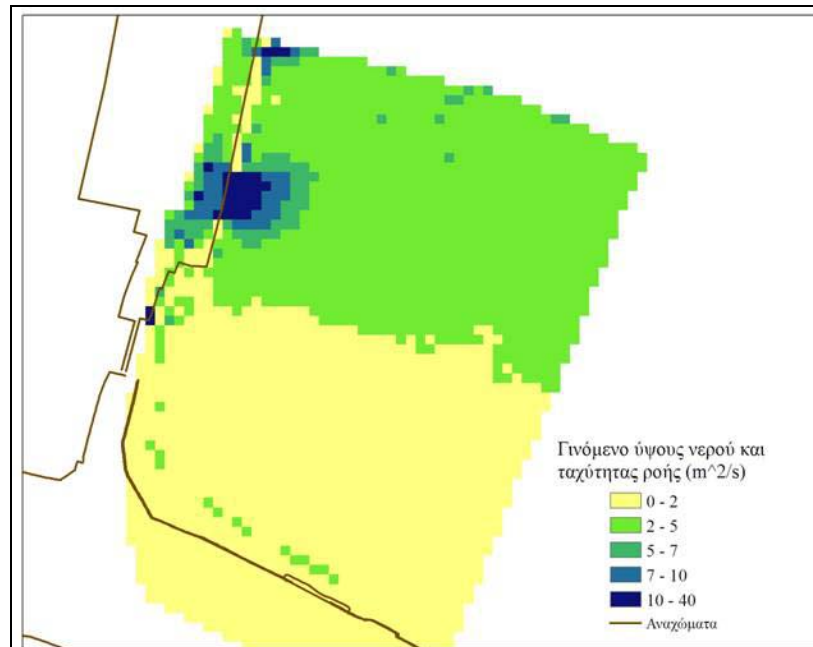
Για  $v > 2$  m/s και  $dv > 7$  m<sup>2</sup>/s προκύπτει ζώνη με «ολική καταστροφή»

Στο ακόλουθο εδάφιο εφαρμόζεται το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής.

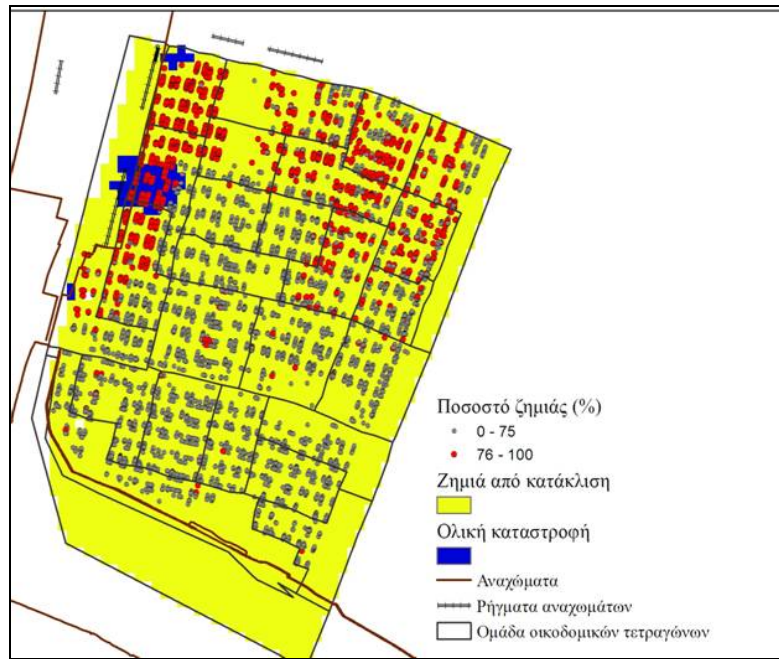
### 12.7.1 Εφαρμογή κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward»

Το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen εφαρμόστηκε στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» για να διερευνηθεί αρχικά εάν οι εκτιμώμενες τιμές ποσοστού ζημιάς συμφωνούν με τις ζώνες ποιοτικής περιγραφής της άμεσης ζημιάς κατά Clausen.

Η διερεύνηση υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ΓΣΠ χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τα πλημμυρικά μεγέθη του γινομένου  $dv$  και της ταχύτητας ροής. Η χωρική κατανομή των προσομοιωμένων τιμών του γινομένου  $dv$  απεικονίζεται στην Εικόνα 12-18. Η εφαρμογή του κριτηρίου κατά Clausen απεικονίζεται στην Εικόνα 12-19. Στην ίδια Εικόνα υπερθέτονται και οι εκτιμώμενες τιμές του ποσοστού ζημιάς ανά κατοικία.



Εικόνα 12-18. Απεικόνιση τιμών του γινομένου  $dv$  για τη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ



Εικόνα 12-19. Εφαρμογή κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ

Εάν υποθέσουμε ότι η ζώνη ζημιάς κατά Clausen «ολική καταστροφή» αντιστοιχεί σε εκτιμώμενες τιμές ποσοστού ζημιάς μεγαλύτερες από 75 %, τότε παρατηρείται ότι οι τιμές ποσοστού ζημιάς που είναι μεγαλύτερες από 75% καλύπτουν μια σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια από την ζώνη «ολική καταστροφή». Επομένως, η εφαρμογή του κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen έχει ως αποτέλεσμα πολύ πιο περιορισμένη ζώνη ζημιάς «ολική καταστροφή» από αυτή που εκτιμήθηκε στην πραγματικότητα. Επίσης, παρατηρείται, ότι η ζώνη ζημιάς κατά Clausen «μερικής ζημιάς» δεν απεικονίζεται στην Εικόνα 12-19, διότι η οριακή τιμή ταχύτητας ροής ίση με 2 m/s του κριτηρίου υπερβαίνεται μόνο όταν η τιμή του γινομένου  $dv$  γίνεται μεγαλύτερη από την τιμή 7 m<sup>2</sup>/s. Η τιμή του γινομένου  $dv$  δεν υπερβαίνει την τιμή 7 m<sup>2</sup>/s στη συγκεκριμένη περιοχή. Τέλος, παρατηρείται ότι η κατά Clausen ζώνη ζημιάς «ζημιά από κατάκλιση» καλύπτει επιφάνεια πολύ μεγαλύτερη από την παρατηρούμενη σύμφωνα με τις τιμές του ποσοστού ζημιάς. Κατά συνέπεια η εφαρμογή του κριτηρίου κατά Clausen στα αποτελέσματα των πλημμυρικών μεγεθών για την περιοχή «Lower 9<sup>th</sup> Ward» κρίνεται ως μη ικανοποιητική.

### 12.7.2 Εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen

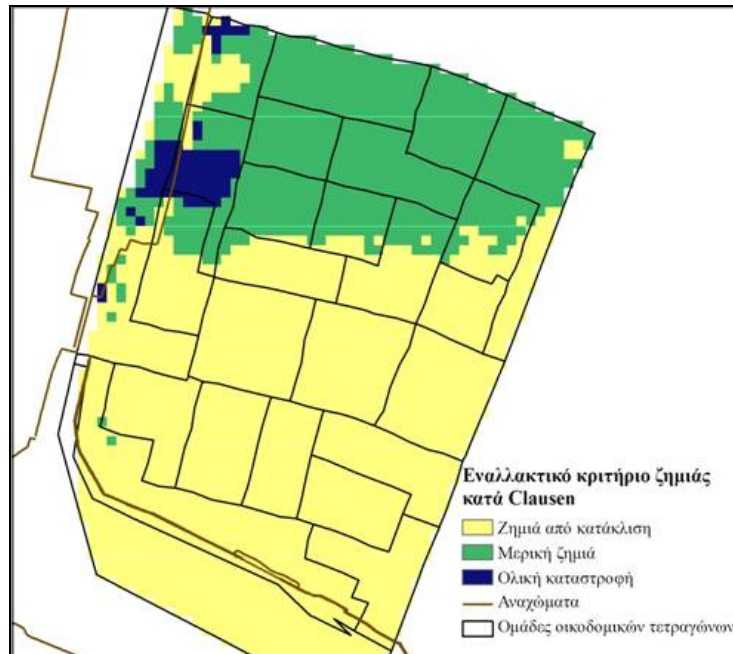
Εφόσον προέκυψε προφανής απόκλιση μεταξύ των παρατηρημένων τιμών ποσοστού ζημιάς και των προβλεπόμενων κατά Clausen ζωνών ζημιάς, σε αυτό το υποκεφάλαιο προτείνεται μια εναλλακτική προσέγγιση ανάπτυξης κριτηρίου ζημιάς. Η προσέγγιση αυτή εξετάζει μόνο το πλημμυρικό μέγεθος του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής ( $dv$ ). Οι τρεις ζώνες ποιοτικής περιγραφής άμεσης ζημιάς παραμένουν ίδιες με αυτές που αναπτύχθηκαν στο κριτήριο κατά Clausen.

Οι οριακές τιμές της μεγέθους  $dv$  για τη διακριτοποίηση των ζωνών ζημιάς επιλέχθηκαν μετά από επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου δοκιμών (trial and error procedure) με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύπτει σε περιβάλλον ΓΣΠ η μέγιστη σύγκλιση μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών ποσοστού ζημιάς και των προβλεπόμενων ζωνών ζημιάς. Αυτή η προσέγγιση ονομάστηκε «εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen» [Pistrika and Jonkman 2009], σύμφωνα με το οποίο ισχύουν τα παρακάτω:

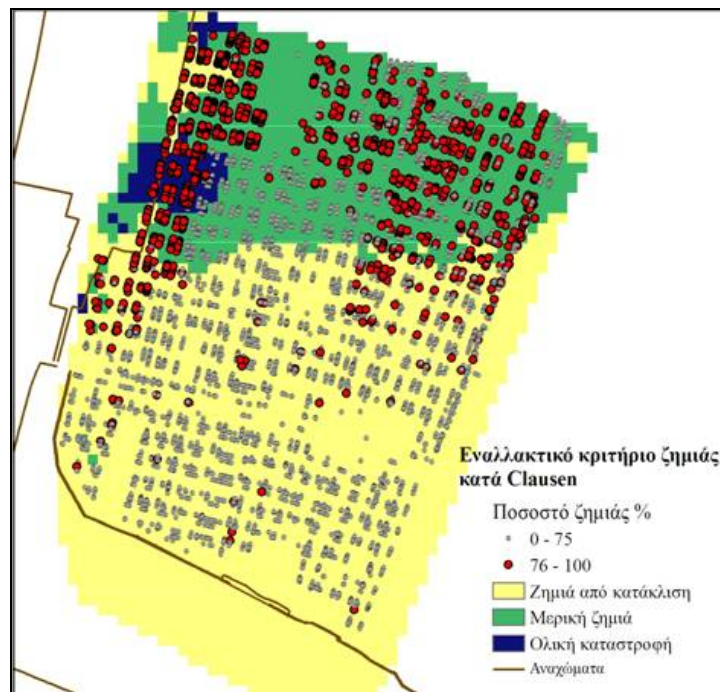
- Για  $dv < 3$  m<sup>2</sup>/s προκύπτει ζώνη «ζημιά από κατάκλιση»

- Για  $3 \text{ m}^2/\text{s} \leq dv < 7 \text{ m}^2/\text{s}$  προκύπτει ζώνη «μερική ζημιά»
- Για  $dv \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$  προκύπτει ζώνη «ολική καταστροφή»

Το εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen βασίζεται μόνο στο γινόμενο του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής ( $dv$ ) και έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό με ευκρίνεια των τριών ζωνών ζημιάς (βλέπε Εικόνα 12-20).



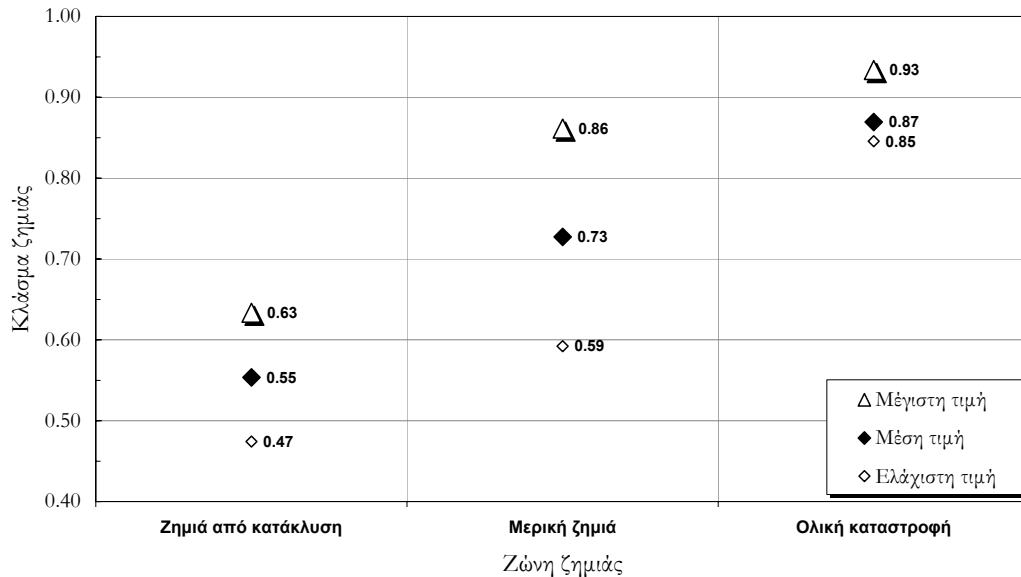
Εικόνα 12-20. Εφαρμογή εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen στη «Lower 9<sup>th</sup> Ward» σε περιβάλλον ΓΣΠ



Εικόνα 12-21. Εφαρμογή εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen και υπέρθεση τιμών ποσοστού ζημιάς



Στην Εικόνα 12-21 απεικονίζεται η εφαρμογή του εναλλακτικού κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen και η υπέρθεση των εκτιμώμενων τιμών του ποσοστού ζημιάς. Παρατηρείται ότι η χωρική κατανομή των τιμών ποσοστού ζημιάς με τιμές μεγαλύτερες από 75% δεν συμπίπτει πλήρως με τα όρια ζωνών ζημιάς που προκύπτουν από το εναλλακτικό κριτήριο κατά Clausen σε περιβάλλον ΓΣΠ. Μερικές τιμές ποσοστού ζημιάς μεγαλύτερες από 75%, σημειώνεται ότι ανήκουν ακόμη και στη ζώνη «ζημιά από κατάκλυση». Παρόλ' αυτά, η εφαρμογή του εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen έχει ως αποτέλεσμα την ευκρινή διάκριση της μέσης τιμής, της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής ποσοστού ζημιάς σε κάθε ζώνη για την χωρική ανάλυση οικοδομικού τετραγώνου (βλέπε Εικόνα 12-22). Όπως είναι αναμενόμενο, η υψηλότερη μέση τιμή ποσοστού ζημιάς προκύπτει για τη ζώνη «ολική καταστροφή».



Εικόνα 12-22. Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων για κάθε ζώνη ζημιάς του εναλλακτικού κριτηρίου κατά Clausen

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι το εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen συντελεί στην οριοθέτηση ζωνών ζημιάς βάσει του πλημμυρικού μεγέθους για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής, που οφείλεται σε αστοχία αντιπλημμυρικού αναχώματος.

## 12.8 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια

Σε αυτό το κεφάλαιο υλοποιήθηκε η ανάλυση της σχέσης μεταξύ μεγεθών πλημμύρας και άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον κατοικίας λόγω της πλημμύρας μετά τον τυφώνα Κατρίνα στην πόλη της Νέας Ορλεάνης. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση συνοψίζονται παρακάτω:

- Οι διαφοροποιήσεις στις χωρικές κατανομές των παρατηρημένων τιμών ποσοστού ζημιάς μεταξύ των εξεταζόμενων υποπεριοχών σχετίζονται άμεσα με τις διαφοροποιήσεις στις πλημμυρικές συνθήκες στις υποπεριοχές αυτές. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες τιμές ποσοστού ζημιάς εκτιμήθηκαν κυρίως σε περιοχές για τις οποίες υπολογίστηκαν οι υψηλότερες τιμές ταχύτητας ροής.
- Βάσει της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς, οι κατοικίες που έπαθαν βλάβες εκτιμήθηκαν με ποσοστά ζημιάς μεγαλύτερα από το 50% της εμπορικής τους αξίας.
- Η στατιστική ανάλυση δεν είχε αποτέλεσμα μονοσήμαντη σχέση μεταξύ μεγεθών πλημμύρας (βάθος νε-

ρού, γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής, ρυθμός ανύψωσης στάθμης) και ποσοστού ζημιάς. Στο ίδιο αποτέλεσμα είχε καταλήξει προγενέστερο ερευνητικό έργο που βασιζόταν σε παρατηρήσεις άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια [Merz et al. 2004].

- Η εφαρμογή της μεθόδου καμπύλης βάθους νερού –ποσοστού ζημιάς σε μεμονωμένα κτήρια (χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας) δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για την εκτίμηση της οικονομικής ζημιάς σε αυτά.
- Η εφαρμογή του κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward» δεν είχε ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην πρόβλεψη ζωνών ζημιάς.
- Προτάθηκε εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen, το οποίο διακρίνει τρεις ζώνες ζημιάς βάσει μόνο του γινομένου  $dh$ . Με την εφαρμογή αυτού του κριτηρίου διαχωρίστηκαν αριθμητικά η μέση τιμή, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή ποσοστού ζημιάς για κάθε ζώνη. Αυτό το κριτήριο θεωρείται εφαρμόσιμο για τον προσδιορισμό της έντασης πλημμυρικής ζημιάς και για τη διάκριση ζωνών ζημιάς σε περιοχή που έχει πληγεί από πλημμύρα λόγω αστοχίας αντιπλημμυρικού αναχώματος.
- Το χωρικό επίπεδο ανάλυσης ότι αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το βαθμό συσχέτισης μεταξύ στατιστικών προγνώσεων και παρατηρημένων τιμών ποσοστού ζημιάς για ανάλυση ζημιάς σε μεσοκλίμακα. Η διερεύνηση στην πιο λεπτομερή χωρική μονάδα του οικοδομικού τετραγώνου οδηγεί σε όλες τις περιπτώσεις της ανάλυσης σε αποδυνάμωση της συσχέτισης των μεταβλητών  $x$  και  $y$ . Το συμπέρασμα αυτό ενισχύει την άποψη ότι το εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς κατά Clausen θα πρέπει να εφαρμόζεται με επιφυλακτικότητα σε ανάλυση ζημιάς σε μικροκλίμακα, όπως είναι σε μεμονωμένα κτήρια.

## Κεφάλαιο 13

# Ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς για την κατηγορία πλημμύρας με υψηλή ταχύτητα ροής στη νήσο Ίο

Το κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που καταγράφηκαν από το πλημμυρικό γεγονός της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003 στη νήσο Ίο. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί ο μηχανισμός πρόκλησης άμεσης ζημιάς σε στοιχεία δομημένου περιβάλλοντος με βάση προσομοιωμένα μεγέθη πλημμύρας.

Το πλημμυρικό γεγονός που προκάλεσε την άμεση ζημιά οφείλεται σε υπερπήδηση του φράγματος Μυλοπότα λόγω ραγδαίας βροχόπτωσης, η οποία διέρκησε αρκετές ώρες. Παρά την υπερπήδηση του φράγματος, οι πλημμυρικές συνθήκες που αναπτύχθηκαν σε θέσεις καταγραφής άμεσης ζημιάς δεν περιλάμβαναν τη δράση μεγάλων κυμάτων σύμφωνα με τις επιτόπιες μαρτυρίες. Επομένως, στα πλημμυρικά μεγέθη που εξετάζονται για την πρόκληση άμεσης ζημιάς περιλαμβάνονται το βάθος νερού και η ταχύτητα ροής. Τα μεγέθη αυτά είναι αποτελέσματα της μονοδιάστατης διόδευσης πλημμυρικού κύματος που προέκυψε από την μοντελοποίηση της υπερπήδησης του φράγματος. Οι τιμές βάθους νερού που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι οι μέγιστες τιμές που προέκυψαν από την χρονικά μεταβαλλόμενη διόδευση του πλημμυρικού κύματος στην περιοχή κατάντη του φράγματος, ενώ οι τιμές ταχύτητας ροής είναι οι μέγιστες των μέσων τιμών που υπολογίστηκαν σε κάθε διατομή γεωμετρίας εδάφους που επιλέχθηκε για τη διόδευση του κύματος.

Σ' αυτή την περίπτωση μελέτης η ανάλυση της σχέσης των μεγεθών πλημμύρας και ζημιάς οδηγεί στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς μικροκλίμακας σύμφωνα με τη μορφή της Εικόνας 7-3. Η κατηγορία πλημμύρας υπό εξέταση είναι η πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής, η οποία χαρακτηρίζεται από ραγδαία ανύψωση πλημμυρικής στάθμης και υψηλή ταχύτητα ροής. Το μοντέλο πλημμύρας αναφέρεται σε μονοδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας και κατα συνέπεια ο συνδυασμός του μοντέλου πλημμύρας με μοντέλο ζημιάς μικροκλίμακας θεωρείται ότι δεν αποδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζη-

μιάς σε δομημένο περιβάλλον (βλέπε Εικόνα 7.2). Τα δεδομένα άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον στην περιοχή μελέτης περιορίζονται σε περιγραφή της παρατηρούμενης ζημιάς στο περιβλήμα κτηρίου και δεν περιλαμβάνουν επιμέτρηση και αποτίμηση της ζημιάς. Επομένως, το συγκεκριμένο μοντέλο ζημιάς δεν περιλαμβάνει διαδικασία υπολογισμού ποσοστού ζημιάς και σε ό,τι αφορά το δομημένο περιβάλλον, δεν είναι εφικτή η διάκριση σε χρήσεις και τύπους κτηρίου. Επομένως, το μοντέλο ζημιάς περιορίζεται στη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας πληγέντων στοιχείων κτηρίου με βάση πλημμυρικά μεγέθη.

Το κεφάλαιο αυτό διαρθρώνεται σε πέντε υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 13.1 δίνει γενική πληροφορία για την περιοχή μελέτης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος και την περιγραφή του πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003. Στο υποκεφάλαιο 13.2 περιγράφονται συνοπτικά οι υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί για την μοντελοποίηση του πλημμυρικού γεγονότος και, επίσης δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στο υποκεφάλαιο 13.3 περιγράφονται τα διαθέσιμα στοιχεία άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που καταγράφηκαν στην περιοχή κατάντη του φράγματος Μυλοπότα. Στο υποκεφάλαιο 13.4 περιγράφεται ο μηχανισμός αστοχίας που αναλύθηκε για τη διερεύνηση της σχέσης των προσομοιωμένων τιμών των πλημμυρικών μεγεθών και της παρατηρούμενης άμεσης ζημιάς και, τέλος στο υποκεφάλαιο 13.5 συγκεντρώνονται τα ανακεφαλαιωτικά σχόλια αυτού του κεφαλαίου.

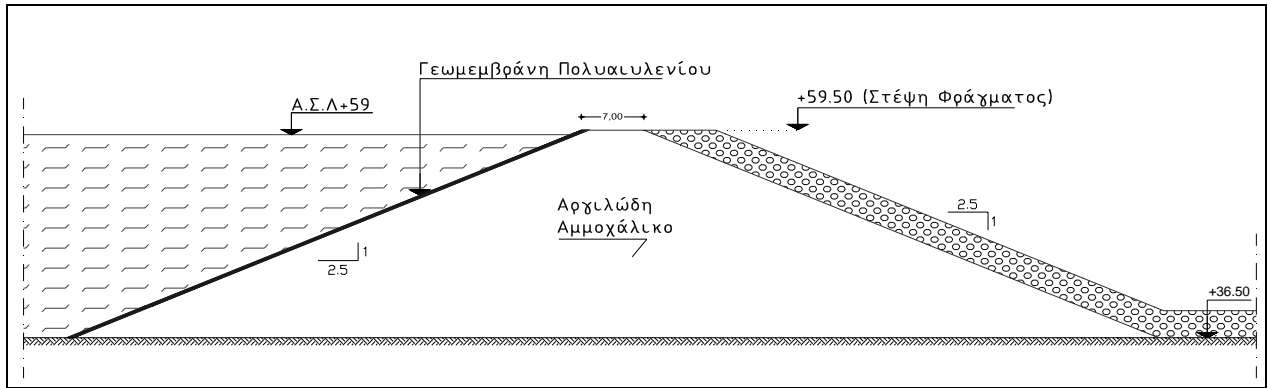
## 13.1 Γενική πληροφορία

### 13.1.1 Φράγμα Μυλοπότα

Το φράγμα του Μυλοπότα βρίσκεται στη δυτική πλευρά της νήσου Ιο των Κυκλάδων, σε απόσταση 1.5 km από τον παραθαλάσσιο οικισμό, και κατασκευάστηκε για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής. Η κατασκευή του έργου άρχισε το 1992 και ολοκληρώθηκε το 1996. Κύριος του έργου είναι το υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (πρώην υπουργείο Γεωργίας) . Η δημοσίευση του Δρ. Μουτάφη [Μουτάφης 2007] αναφέρει συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος και τις συνθήκες του πλημμυρικού γεγονότος υπερπήδησης του φράγματος που συνέβη στις 27 Ιανουαρίου 2003 και είχε ως αποτέλεσμα την υπερπήδηση του φράγματος.

Το φράγμα είναι ομοιογενές χωμάτινο, ύψους 23 m, πλάτους στέφης 7 m και μήκους στη στέφη ~100 m και δημιουργεί εσωποτάμιο ταμιευτήρα χωρητικότητας ~240.000 m<sup>3</sup>. Η καμπύλη στάθμης – όγκου ταμιευτήρα σρατίζεται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π13.1. Οι κλίσεις αμφοτέρων των πρανών του αναχώματος είναι 2.5:1 (Ο:Κ). Το σώμα του φράγματος κατασκευάστηκε με αργιλώδη αμμοχάλικα από τη λειάνη κατάκλισης του ταμιευτήρα και υλικά παλαιάς αναβαθμίδας μεταξύ των δύο χειμάρρων που συμβάλλουν ανάντη του φράγματος. Η στεγανοποίηση του φράγματος επιτυγχάνεται με γεωμεμβράνη πολυαιθυλενίου διαστρωμένη στο ανάντη πρανές του αναχώματος. Η μεμβράνη συγκρατείται στη θέση της με πλαστικούς σωλήνες γεμάτων με τσιμεντένεμα.

Στο κατάντη πρανές του φράγματος υπάρχει ζώνη από βραχώδη προϊόντα εκσκαφής πλάτους 3 m, ενώ στον πόδα του πρανούς υπάρχει αναβαθμός από λίθους πλάτους της τάξης των 20 έως 30 m. Το κατάντη πρανές του φράγματος και ο αναβαθμός ποδός χρησιμοποιήθηκαν ως χώρος απόρριψης βραχωδών προϊόντων από τις απαιτούμενες εκσκαφές του έργου.

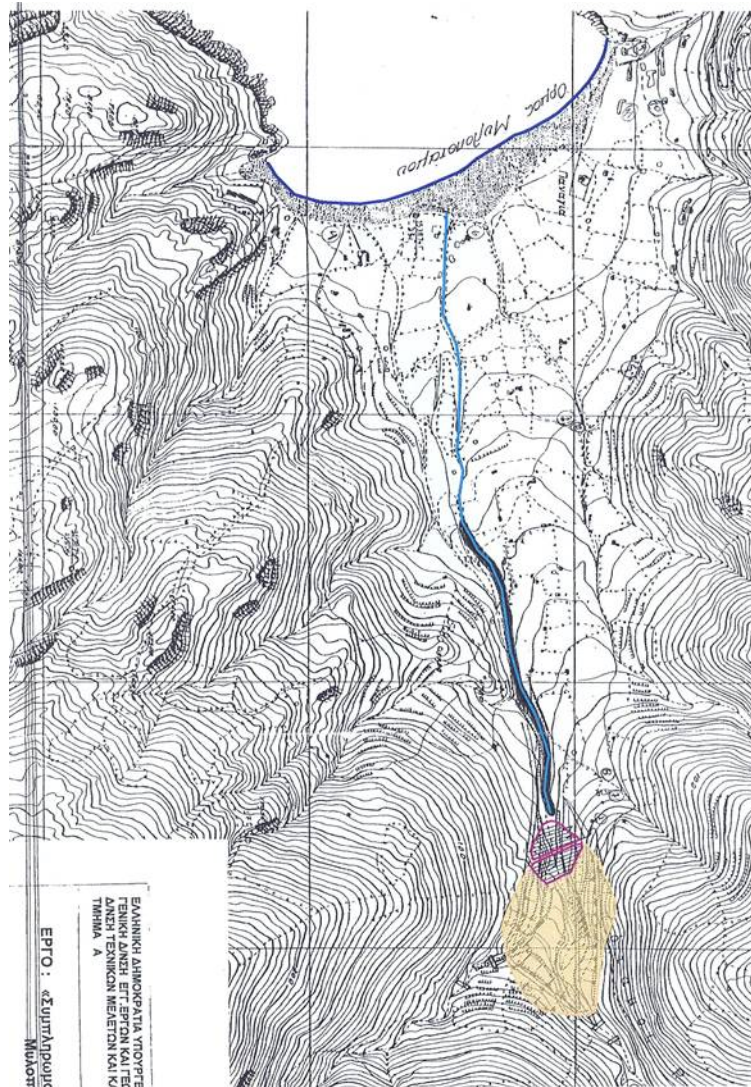


Εικόνα 13-1. Σκαρίφημα τυπικής διατομής φράγματος

Ο υπερχειλιστής είναι μετωπικός, χωρίς ρυθμιστικό αναβαθμό, πλάτους 5.0 m, ενώ στη διώρυγα πτώσης το πλάτος μειώνεται στα 4.0 m. Η παροχή σχεδιασμού ανέρχεται σε  $1.95 \text{ m}^3/\text{s}$  και το ελεύθερο ύψος φράγματος (freeboard) σε 0.30 m. Φωτογραφικό υλικό από το τεχνικό του υπερχειλιστή παρατίθεται στον Τόμο ΙΙ, υποκεφάλαιο Π13.4.

### 13.1.2 Περιοχή μελέτης

Η μορφολογία της περιοχής κατάντη του φράγματος Μυλοπότα χαρακτηρίζεται από ήπιες κλίσεις εδάφους και εκτείνεται σε απόσταση 1.5 km έως το όριο της ακτογραμμής. Στην Εικόνα 13-2 φαίνεται ο χάρτης της περιοχής μελέτης σε κλίμακα 1:5 000, στον οποίο σημειώνονται η κάτοψη του φράγματος, η λεκάνη κατάκλυσης του ταμιευτήρα, και η οδοποιία προσπέλασης στο τεχνικό τμήμα του φράγματος, η οποία εκτείνεται μέχρι το μέσο της απόστασης από την παραλία του Μυλοπότα.



Εικόνα 13-2. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης

### 13.1.3 Περιγραφή πλημμυρικού γεγονότος

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (International Committee of Large Dams) [ICOLD 2003] ως αστοχία φράγματος ορίζεται «η κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της θεμελίωσης του, τέτοια ώστε το φράγμα να μην μπορεί να συγκρατήσει νερό». Συνεπώς, ένα μεμονωμένο φαινόμενο υπερπήδησης ενός φράγματος δεν καταγράφεται ως αστοχία φράγματος.

Τον Ιανουάριο του 2003 καταγράφηκαν ακραίες βροχοπτώσεις στο νησί, που κατέληξαν σε υψηλή πλημμυρική παροχή εισροής στον ταμιευτήρα. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία από το βροχομετρικό σταθμό του νησιού, το συνολικό ύψος βροχοπτώσης σε διάστημα 14 ωρών μετρήθηκε ίσο με 126 mm και στη συνέχεια οι μετρήσεις διακόπηκαν λόγω υπερχείλισης του δοχείου μέτρησης. Η λειτουργία του υπερχειλιστή του φράγματος ήταν σχετικά άμεση. Η στάθμη στον ταμιευτήρα έφθασε στη στέψη του φράγματος και στη συνέχεια ακολούθησε υπερπήδηση. Από ίχνη που άφησε η πλημμύρα στη στέψη του φράγματος, καταγράφεται ότι η στάθμη του νερού έφθασε σε ύψος μεγαλύτερο του 0.4 m πάνω από τη στέψη. Η υπερπήδηση συνέβαινε σε όλο το πλάτος του φράγματος συν τους εκατέρωθεν δρόμους, δηλαδή σε πλάτος που υπερέβαι-



νε τα 100 m. Με τα δεδομένα υπερχειλίσης, η μέγιστη παροχή εκτιμήθηκε ότι ξεπέρασε τα 35 m<sup>3</sup>/s, δηλαδή βρεθηκε σημαντικά υψηλότερη από την παροχή σχεδιασμού του υπερχειλιστή (1.95 m<sup>3</sup>/s). Η υπερπήδηση του φράγματος θα ήταν φυσικά αναπόφευκτη ακόμη και αν δεν είχε κατασκευαστεί αυθαίρετα τοιχίο στη στέψη του υπερχειλιστή [Μουτάφης 2007].

Σύμφωνα με μαρτυρίες κατοίκων, η υπερπήδηση του φράγματος συνεχιζόταν για ώρες. Παρά την υπερπήδηση του το φράγμα δεν διαβρώθηκε αλλά έπαθε μόνο εκτεταμένες ζημιές [Στεφανδούρος 2003]. Η αντοχή του στη διάβρωση οφείλεται στη ζώνη βραχιδών υλικών που είχαν διαστρωθεί (είχαν ουσιαστικά απορριφθεί) στο κατάντη πρανές του φράγματος καθώς και στον αναβαθμό ποδός του πρανούς. Τμήματα του φράγματος και των δρόμων πρόσβασης διαβρώθηκαν και τα υλικά παρασύρθηκαν και αποτέθηκαν κατάντη του φράγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13-3. Οι επιπτώσεις της υπερπήδησης ήταν οι ζημιές στο φράγμα, τους δρόμους και τις κατάντη περιοχές από διαβρώσεις και αποθέσεις υλικών. Σημειώνεται, ότι εάν είχε διαβρωθεί το φράγμα θα είχε πιθανότατα καταρρεύσει και κατά συνέπεια θα είχαν τεθεί σε σοβαρό κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και περιουσίες κατάντη του έργου. Το ατυχές συμβάν εκτιμάται ότι οφείλεται σε λανθασμένη επιλογή της πλημμύρας σχεδιασμού του υπερχειλιστή [Μουτάφης 2007].



Εικόνα 13-3. Κατάντη όψη φράγματος μετά το ατυχές συμβάν και υλικά που διαβρώθηκαν και παρασύρθηκαν

Στην Εικόνα 13-4 φαίνονται βραχώδη υλικά που διαβρώθηκαν από το κατάντη πρανές του φράγματος και παρασύρθηκαν στο δρόμο προσπέλασης κατάντη, με αποτέλεσμα να προκληθούν υλικές ζημιές (ξήλωμα ασφαλτοτάπητα, διάβρωση υλικού) στο δρόμο. Πρόσθετο φωτογραφικό υλικό που λήφθηκε κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος παρατίθεται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π13.4. Από το φωτογραφικό υλικό συμπεραίνεται ότι η οδοποιία προσπέλασης λειτούργησε ως δίοδος διόδευσης του πλημμυρικού κύματος κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος.



Εικόνα 13-4. Οδοποιία προσπέλασης στο φράγμα Μυλοπότα μετά την πλημμύρα της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003

## 13.2 Δεδομένα πλημμύρας

### 13.2.1 Υδρολογικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS

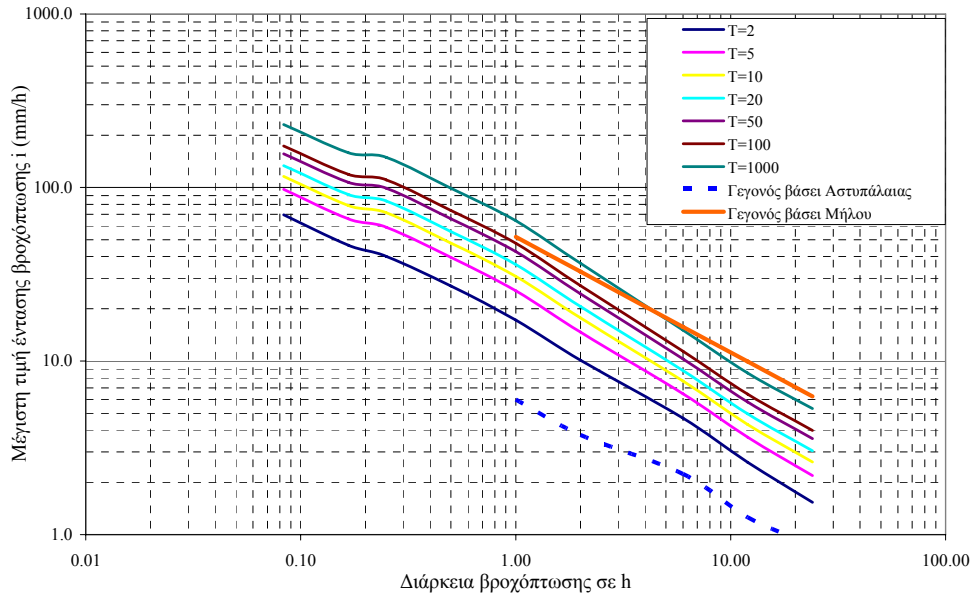
Για τον υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος εισροής στον ταμιευτήρα του φράγματος κατά το πλημμυρικό γεγονός της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003, χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) v.3.4. του Σώματος Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ (βλέπε εδάφιο 6.4.1).

#### Όμβρια καμπύλη

Στην ευρύτερη περιοχή του νησιού λειτουργεί σήμερα μόνο ένας βροχομετρικός σταθμός που έχει εγκατασταθεί στην περιοχή του Μυλοπότα στο χαμηλό υψόμετρο των 50 m από το Υπουργείο Γεωργίας. Τα διαθέσιμα δεδομένα από το βροχόμετρο δεν προσφέρονται για την εξαγωγή όμβριων καμπύλων. Στην περιοχή των Κυκλάδων υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις των μέγιστων ετήσιων υψών βροχής για διάρκειες 5', 10', 15', 30', 1 h, 2 h, 6 h, 12 h και 24 h στο μετεωρολογικό σταθμό της Μήλου, οι οποίες αντιστοιχούν σε 15 υδρολογικά έτη (1972-73 έως 1986-87). Με βάση τις μετρήσεις αυτές και την εξίσωση 6.2 τύπου Gumbel μέγιστων τύπου I, καταρτίστηκε η όμβρια καμπύλη της Εικόνας 13-5 που χρησιμοποιείται στους υδρολογικούς υπολογισμούς.

Διαθέσιμα βροχογραφικά δεδομένα (υψηλής χρονικής ευκρίνειας) για την ημέρα του πλημμυρικού γεγονότος καταγράφηκαν μόνο στο μετεωρολογικό σταθμό της νήσου Αστυπάλαια. Στην Εικόνα 13-5 απεικονίζεται, επίσης, το πλημμυρικό γεγονός της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003 με βάση τα δεδομένα από τη νήσο Αστυπάλαια («Γεγονός βάσει Αστυπάλαιας») και αντίστοιχα το γεγονός με βάση τα δεδομένα από τη νήσο Μήλο («Γεγονός βάσει Μήλου»). Παρατηρείται ότι τα δεδομένα από τη νήσο Αστυπάλαια είναι ακατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, διότι η γεωγραφική θέση της νήσου βρίσκεται απαγορευτικά μακριά από τη νήσο Ιο για να αντιπροσωπεύσει την ένταση του πλημμυρικού γεγονότος στην Ιο.



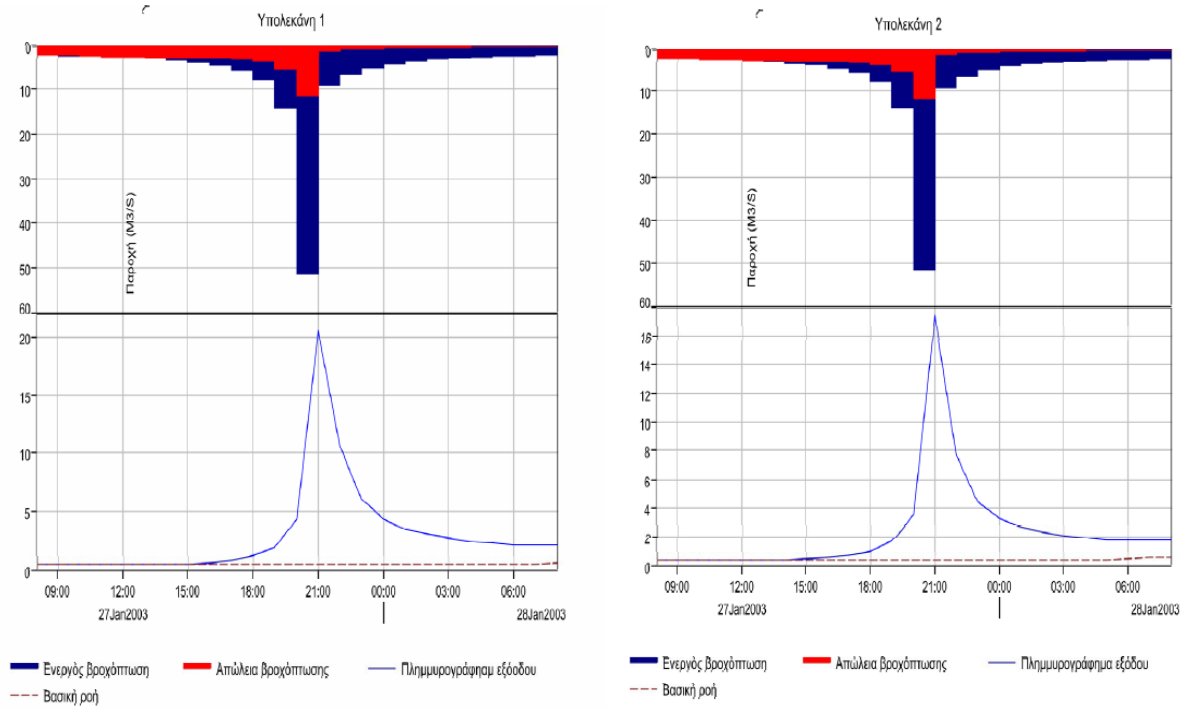


Εικόνα 13-5. Γραφική απεικόνιση της όμβριας καμπύλης για διάφορες τιμές της περιόδου επαναφοράς  $T$

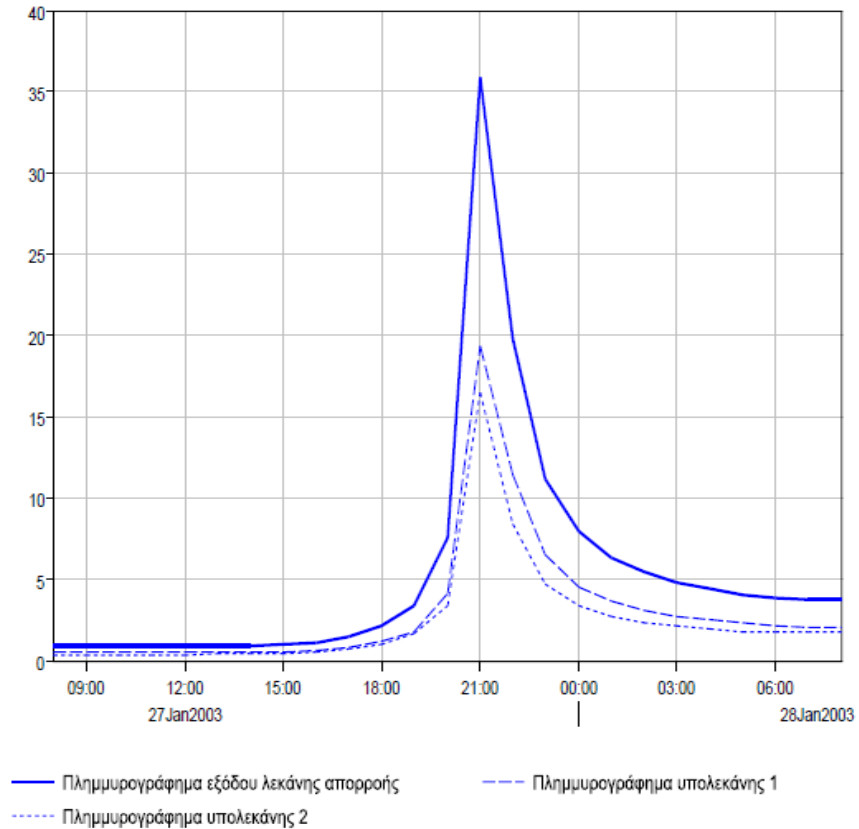
Από την Εικόνα 13-5 προκύπτει ότι το πλημμυρικό γεγονός εκτιμάται με περίοδο επαναφοράς  $T=100$  yr. Επίσης, θεωρείται 24ώρη διάρκεια για τη βροχή σχεδιασμού και γίνεται η υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής της βροχής στη λεκάνη απορροής έκτασης ίσης με  $A = 4.32 \text{ km}^2$  ανάντη του ταμιευτήρα. Συνεπώς για τους υδρολογικούς υπολογισμούς χρησιμοποιούνται συνθετικό υετόγραμμα σχεδιασμού και όχι ιστορική κατανομή του ύψους βροχόπτωσης.

Για το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή η λεκάνη υποδιαιρέθηκε σε δυο υπολεκάνες, σε καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος μετασχηματισμού του κινηματικού κύματος και εφαρμόζεται η μέθοδος εκτίμησης του περισσεύματος βροχόπτωσης, Soil Conservation Service Loss Method. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται γεωμετρικά στοιχεία των υπολεκανών και γίνονται, επίσης, παραδοχές σε ό,τι αφορά το σχήμα διατομής κάθε ρέματος, τον αριθμό καμπύλης  $CN$  για τον χαρακτηρισμό της διηθητικότητας του εδάφους και της χρήσης γης, την τραχύτητα του εδάφους και την εκτίμηση της βασικής ροής των ρεμάτων. Οι τεχνικές λεπτομέρειες για την εφαρμογή του προγράμματος HEC-HMS περιγράφονται αναλυτικά στο αντίστοιχο εγχειρίδιο χρήστη [HEC-HMS 2009]. Τα αποτελέσματα του μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής HEC-HMS (εξαγόμενα υετογράμματα και υδρογραφήματα) για καθεμία από τις υπολεκάνες απεικονίζονται στην Εικόνα 13-6.

Στην Εικόνα 13-7 απεικονίζεται το υδρογράφημα άμεσης απορροής (ΥΑΑ) στην έξοδο της ολικής λεκάνης απορροής (ή υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα του φράγματος Μυλοπότα), που προέκυψε από το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής HEC-HMS.



Εικόνα 13-6. Αποτελέσματα βροχόπτωσης – απορροής για κάθε υπολεκάνη με την χρήση του HEC-HMS



Εικόνα 13-7. Υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα φράγματος Μυλοπότα

Υδρομετρικοί σταθμοί εγκατεστημένοι στα υπό εξέταση υδατορεύματα, δεν υπάρχουν για συγκρίσεις μεταξύ παρατηρημένων τιμών και προσομοιωμένων τιμών παροχής. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η αιχμή του εξαγόμενου πλημμυρογραφήματος προσεγγίζει την τιμή  $Q_{max} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  που αποτελεί την εκτίμηση της αιχμής για το πραγματικό πλημμυρικό γεγονός από εμπειρογνώμονες της ΔΕΗ και του πρώην Υπουργείου Γεωργίας [Στεφαιδούρος 2003] καθώς επίσης η χρονική βάση του ΥΑΑ προσεγγίζει τη διάρκεια του γεγονότος.

Η διαδικασία μοντελοποίησης βροχόπτωσης – απορροής υλοποιείται με απλοποιητικές παραδοχές. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων για τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning και του αριθμού καμπύλης CN, και διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Εξετάστηκαν οι τιμές συντελεστή Manning  $n = 0.05, 0.07$  και  $0.1$  αντί της τιμής  $0.04$  που τελικά χρησιμοποιήθηκε για τη διόδευση απορροής στα προσομοιωμένα ρέματα κάθε υπολεκάνης. Διαπιστώθηκε, ότι η μέγιστη διαφορά που προκύπτει στις τιμές της παροχής στο ΥΑΑ είναι της τάξης του  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  και κατά συνέπεια η επίδραση των συντελεστών Manning στο εξαγόμενο ΥΑΑ κρίθηκαν πρακτικά ασήμαντες.
- Με την υπόθεση του υδρολογικού τύπου εδάφους B και μέτριας διεισδυτικότητας κατάσταση αρχικής υγρασίας εδάφους για αγροτική περιοχή, εξετάστηκαν οι τιμές του αριθμού καμπύλης CN ίσες με  $61, 71$  και  $77$  αντί της τιμής  $81$  που τελικά χρησιμοποιήθηκε σε κάθε υπολεκάνη και αντιστοιχεί σε αγροτική γη χωρίς περιβαλλοντική διαχείριση (ή χορτολιβαδική έκταση σε κακή κατάσταση) [Pilgrim and Corderly 1993]. Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε ότι ο αριθμός καμπύλης CN έχει καθοριστική σημασία για τις τιμές παροχής του εξαγόμενου ΥΑΑ, καθώς η διαφορά στις τιμές της αιχμής παροχής μπορεί να μειωθεί έως  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , εάν χρησιμοποιηθεί η τιμή  $CN = 61$  αντί της τιμής  $81$ .

### 13.2.2 Υδραυλικοί υπολογισμοί με το υπολογιστικό πρόγραμμα DAMBRK

Η μαθηματική προσομοίωση της υπερπήδησης του φράγματος Μυλοπότα υλοποιείται με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος διόδευσης πλημμυρικού κύματος DAMBRK (Dam-break flood forecasting model) v.88. Επίσης, η επακόλουθη διόδευση του πλημμυρικού κύματος στην περιοχή μελέτης κατάντη του φράγματος προσομοιώνεται με τη χρήση του προγράμματος DAMBRK. Το πρόγραμμα περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 6.4.3. Στα αριθμητικά αποτελέσματα του προγράμματος περιλαμβάνονται σημειακές μέγιστες τιμές του βάθους νερού, της πλημμυρικής αιχμής και μέσες τιμές ταχύτητας ροής σε επιλεγμένες διατομές της περιοχής κατάκλυσης (βλέπε Τόμο II, υποκεφάλαιο Π13.2).

#### Μοντελοποίηση του φαινομένου υπερπήδησης φράγματος

Το φαινόμενο υπερπήδησης του φράγματος Μυλοπότα προσομοιώνεται στο μοντέλο υπολογισμού χάσματος του προγράμματος DAMBRK που αφορά την περιγραφή της χρονικής και γεωμετρικής εξέλιξης του χάσματος. Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο υπολογισμού χάσματος εκτιμήθηκαν με βάση τις εμπειρικές εξισώσεις του Froehlich [Froehlich 1995b] (βλέπε εδάφιο 6.4.3). Δεδομένου ότι ο υπολογισμός του υδρογραφήματος εκροής εξαρτάται άμεσα από την χρονική και γεωμετρική εξέλιξη του χάσματος, ο εμπειρικός υπολογισμός του μοντέλου χάσματος γενικά, οδηγεί σε μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, υπερπήδησης του φράγματος δεν συνοδεύεται από ταυτόχρονη ανάπτυξη χάσματος στο σώμα του φράγματος κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, ενώ μοντελοποιήθηκε η ανάπτυξη χάσματος στο πρόγραμμα, ουσιαστικά δεν «τρέχει» κατά την ανάλυση και κατά συνέπεια δεν επηρεάζει το υδρογράφημα εκροής. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας μια υπερβο-

λικά υψηλή τιμή στάθμης ελεύθερης επιφάνειας στον ταμιευτήρα ως κατώφλι για την έναρξη της χρονικής εξέλιξης του χάσματος. Συνεπώς, η σημαντική αβεβαιότητα που συνοδεύει τον υπολογισμό του μοντέλου χάσματος δεν επηρεάζει την ακρίβεια υπολογισμού του υδρογραφήματος εκροής από το φράγμα. Τέλος, κατά την έναρξη της προσομοίωσης η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα θεωρείται ότι βρίσκεται στη στέψη του υπερχειλιστή, αφού σύμφωνα με μαρτυρίες η λειτουργία του υπερχειλιστή ήταν σχετικά άμεση [Μουτάφης 2007]. Για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εκροής από το φράγμα χρησιμοποιούνται επίσης, τα ακόλουθα στοιχεία: (α) η καμπύλη στάθμης – όγκου ταμιευτήρα (βλέπε υποκεφάλαιο Π13.1), (β) το υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα (βλέπε Εικόνα 13.7), και (γ) η καμπύλη στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή (βλέπε Π13.2).

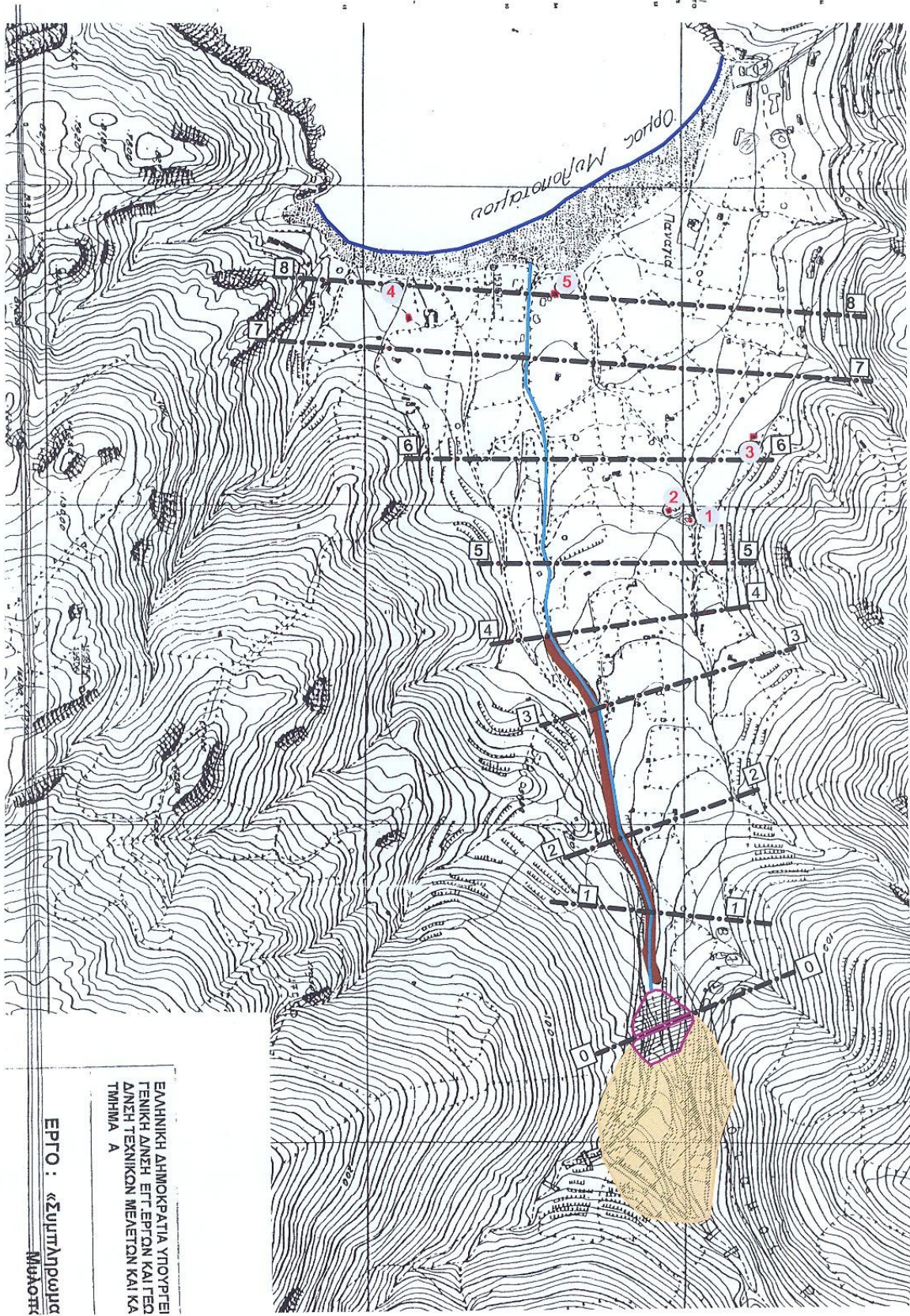
### **Μοντελοποίηση της διόδευσης πλημμυρικού κύματος στην περιοχή κατάκλυσης κατάντη φράγματος**

Για την προσομοίωση της κατάκλυσης της περιοχής κατάντη του φράγματος, λήφθηκε υπόψη στη μοντελοποίηση η οδοποιία προσπέλασης στο τεχνικό τμήμα του φράγματος, η οποία εκτείνεται μέχρι το μέσο της απόστασης έως την ακτογραμμή, δηλαδή έως τη διατομή 4 στην Εικόνα 13-8. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 13.1.3, ο δρόμος είχε υποστεί σημαντικές υλικές ζημιές κατά τη διάρκεια της πλημμύρας και γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο προσομοιώνεται ως ρέμα διόδευσης του πλημμυρικού κύματος. Συνολικά η απόσταση από το φράγμα έως την ακτογραμμή είναι ίση περίπου με 1.5 km.

Από το τέλος του δρόμου προσπέλασης έως την ακτογραμμή, οι θέσεις καταγραφής ζημιάς και η τοπογραφία της περιοχής κατάκλυσης υποδεικνύουν την ύπαρξη δύο φυσικών μισογαγγιών, που φαίνεται ότι λειτουργήσαν ως δίοδοι διόδευσης πλημμυρικού κύματος στην περιοχή κατάκλυσης. Στη διαδικασία μοντελοποίησης, όμως, η διχοτόμηση της ροής σε δύο κλάδους κύριας διεύθυνσης είναι αδύνατη. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, επιλέγεται ως λύση στην προσομοίωση η μεταφορά της κύριας διεύθυνσης της διόδευσης από τη νοητή συνέχεια του δρόμου προσπέλασης σε συμμετρική θέση ως προς τη γεωμετρία κάθε επιλεγμένης διατομής στην περιοχή κατάκλυσης. Με αυτόν τον τρόπο οι δυο ενεργές περιοχές ροής των δύο φυσικών μισογαγγιών, προσομοιώνονται δεξιά και αριστερά του άξονα κάθε επιλεγμένης διατομής, δηλαδή ενώνονται σε μια. Το πλάτος των διατομών αυτών μετά το τέλος του δρόμου προσπέλασης σχεδόν διπλασιάζεται, αφού η περιοχή κατάκλυσης όσο προχωρά κανείς προς τα κατάντη, διευρύνεται. Συνολικά, το ρέμα διόδευσης του πλημμυρικού κύματος όπως μοντελοποιήθηκε, απεικονίζεται στην Εικόνα 13-8.

Επιλέγονται οκτώ διατομές, περίπου κάθετες στο άξονα του καναλιού, με κριτήρια (α) να αποτυπώνουν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο τη γεωμετρία της περιοχής κατάκλυσης, και (β) να βρίσκονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις θέσεις καταγραφής άμεσης πλημμυρικής ζημιάς στην περιοχή κατάκλυσης. Στη διαδικασία μοντελοποίησης, η γεωμετρία των διατομών απλουστεύεται, έτσι ώστε να ομαλοποιηθούν οι πολύ απότομες κλίσεις πυθμένα ή να εξαλειφθούν οι αρνητικές κλίσεις πυθμένα, οι οποίες δημιουργούν πρόβλημα σύγκλισης στο αριθμητικό σχήμα επίλυσης. Στην Εικόνα 13-8 απεικονίζονται, επίσης, οι επιλεγμένες διατομές και οι θέσεις καταγραφής ζημιάς στην περιοχή κατάκλυσης. Η γεωμετρία εδάφους των επιλεγμένων διατομών σε κλίμακα 1:2 000 παρατίθεται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο Π13.5. Επίσης, με δεδομένο ότι το πλάτος των διατομών εκτείνεται σε εκατοντάδες μέτρα όσο προχωρά κανείς προς τα κατάντη, χρησιμοποιείται στην προσομοίωση η παραδοχή της ενεργής περιοχής ροής (active flow area). Με άλλα λόγια θεωρείται ότι ένα μέρος της διατομής δε συμμετέχει στη μεταφορά ροής προς τα κατάντη, αποτελεί δηλαδή ανενεργή περιοχή ροής ή περιοχή αποθήκευσης ροής (storage flow). Ο προσδιορισμός της ανενεργούς περιοχής ροής σε κάθε διατομή γίνεται εμπειρικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διώρυγα εξόδου του εκκενωτή πυθμένα είναι κατασκευασμένη κατά μήκος της δεξιάς πλευράς του δρόμου προσπέλασης κατά τη φορά της ροής.





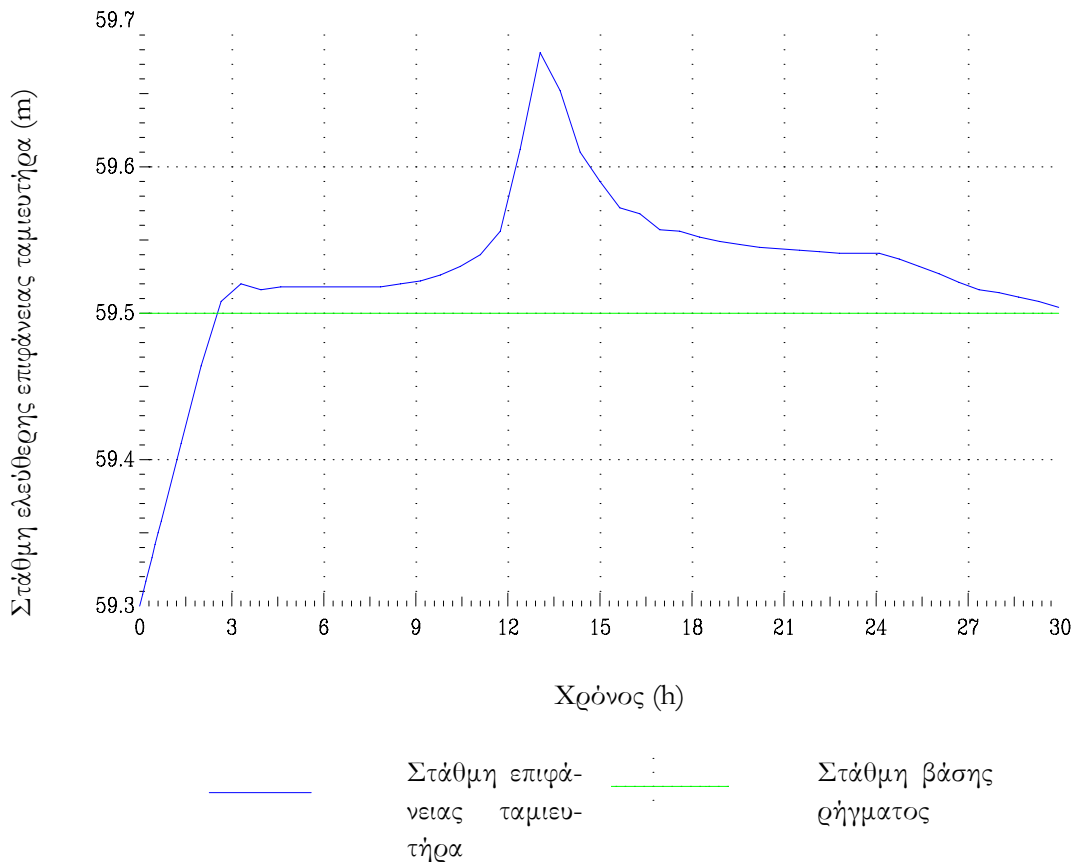
Εικόνα 13-8. Μοντελοποίηση της περιοχής κατάντη του φράγματος Μυλοπότα



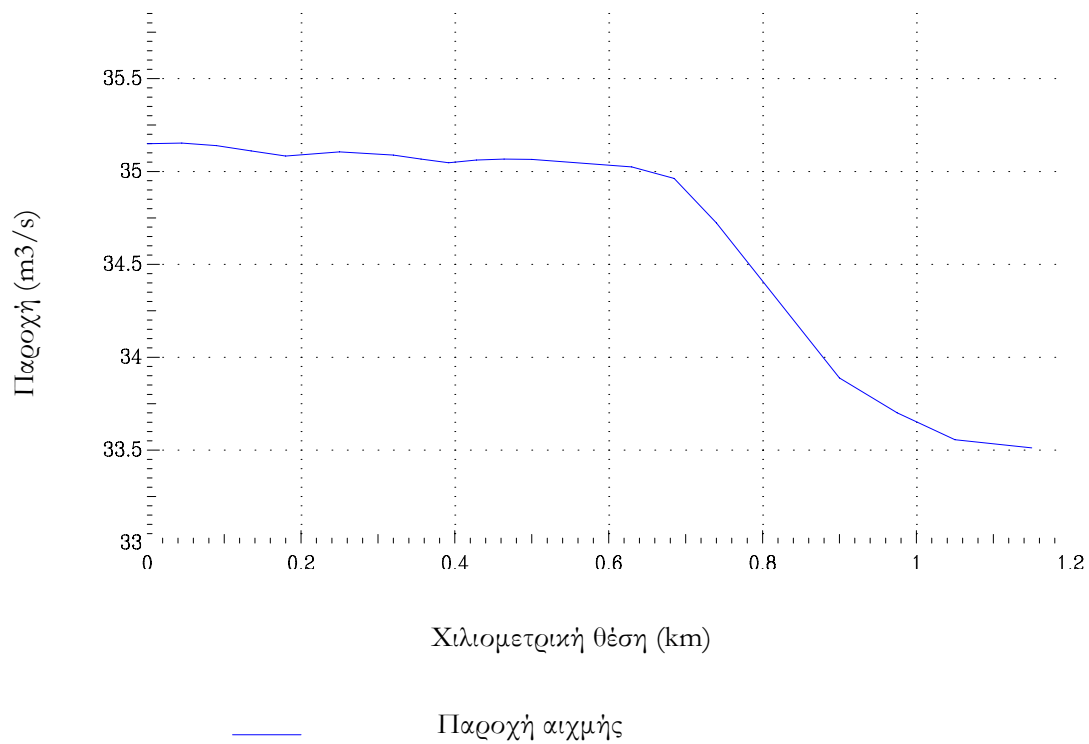
Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning στις διατομές προσδιορίστηκαν εμπειρικά λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία της περιοχής κατάκλυσης και τη δημοσιευμένη έκθεση του κέντρου γεωλογικής έρευνας των ΗΠΑ (US Geological Survey), η οποία παρουσιάζει εκτιμώμενες τιμές του συντελεστή Manning για πολλά διαφορετικά είδη ρεμάτων βάσει μετρήσεων πεδίου [Barnes 1967]. Η τιμή του συντελεστή Manning παραμένει ίδια σε όλο το μήκος της ενεργούς περιοχής ροής για κάθε διατομή, θεωρώντας ότι αποτελεί τη σύνθετη τιμή του συντελεστή για την εκάστοτε διατομή. Τέλος, στις οριακές συνθήκες λήφθηκε υπόψη ο μεικτός τύπος ροής, ο οποίος επιτρέπει να ληφθούν υπόψη υδραυλικά άλματα στη διόδευση, μόνο στην περίπτωση που ο αριθμός Froude ξεπεράσει την τιμή 2 και ως αρχικές συνθήκες θεωρήθηκε ότι η βασική ροή στο ρέμα είναι ίση με  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 13.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

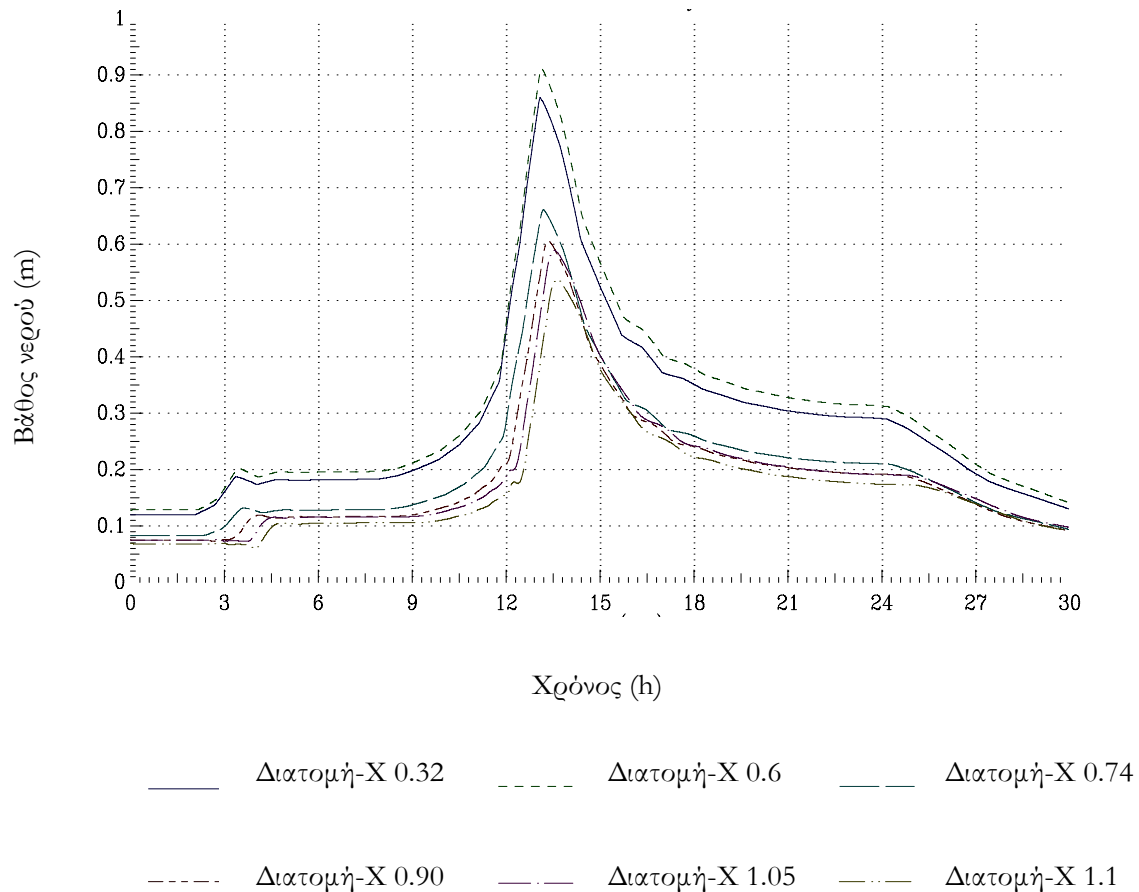
Μερικά από τα γραφικά αποτελέσματα του προγράμματος DAMBRK παρουσιάζονται στην Εικόνα 13-9, στην Εικόνα 13-10 και στην Εικόνα 13-11. Τα υπόλοιπα παρατίθενται στον Τόμο II, υποκεφάλαιο 13.3. Στην Εικόνα 13-9 απεικονίζεται το γράφημα στάθμης ελεύθερης επιφάνειας ταμιευτήρα σε συνάρτηση με το χρόνο, και στην Εικόνα 13-10 απεικονίζεται η διόδευση της πλημμυρικής αιχμής στην περιοχή κατάντη του φράγματος. Τέλος, στην Εικόνα 13-11 διακρίνονται τα υδρογραφήματα των τιμών βάθους νερού για επιλεγμένες διατομές γεωμετρίας στην περιοχή κατάκλυσης.



Εικόνα 13-9. Γράφημα στάθμης ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα Μυλοπότα σε συνάρτηση με το χρόνο

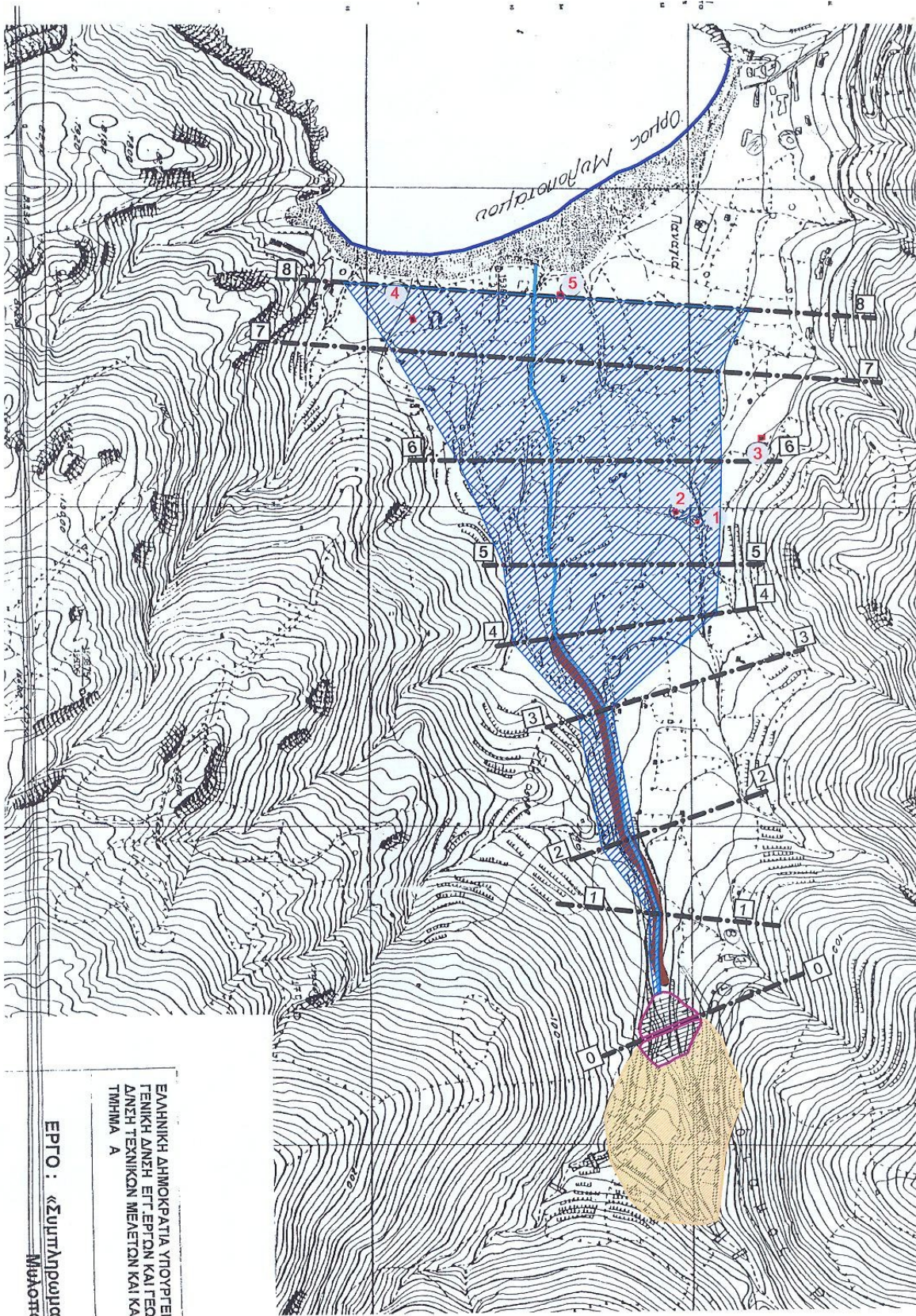


Εικόνα 13-10. Διόδευση της πλημμυρικής αιχμής στην περιοχή κατόντη του φράγματος



Εικόνα 13-11. Υδρογράφημα βάθους νερού για επιλεγμένες διατομές στην περιοχή κατάλυσης





Εικόνα 13-12. Χάρτης κατάκλυσης πλημμύρας στην περιοχή κατόντη του φράγματος Μυλοπότα



Στην Εικόνα 13-12 παρουσιάζεται η περιβάλλουσα κατάκλυσης της πλημμύρας που προέκυψε από την προσομοίωση της υπερπήδησης του φράγματος Μυλοπότα και της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος κατά την. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της μέγιστης τιμής βάθους νερού και της μέγιστης μέσης τιμής της ταχύτητας ροής σε κάθε διατομή παρατίθενται σε συγκεντρωτικό πίνακα του προγράμματος (Flood Crest Summary Table) στον Τόμο ΙΙ, υποκεφάλαιο 13.2.

Παρατηρείται ότι αναπτύσσονται συνθήκες σχεδόν μόνιμης ροής για τη πλημμυρική αιχμή κατά τη διόδευση του πλημμυρικού κύματος προς τα κατάντη λόγω της σχετικά μικρής απόστασης του φράγματος από την παραλία του Μυλοπότα. Επίσης, παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές του βάθους νερού κυμαίνονται από 0.5 m έως 1 m, ενώ οι μέσες τιμές της ταχύτητας ροής κυμαίνονται από 1 m έως 3 m/s. Παρόλο που στο συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός ο όγκος εισροής στον ταμιευτήρα είναι περίπου ίσος με το διπλάσιο του όγκου του ταμιευτήρα, η διόδευση σε διατομές ενεργούς περιοχής ροής πλάτους περίπου ίσου με 30 m στην περιοχή κατάκλυσης έχει ως αναμενόμενο αποτέλεσμα σχετικά μικρές προσομοιωμένες τιμές πλημμυρικών μεγεθών.

### Αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Η διαδικασία υπολογισμού του υδρογραφήματος εκροής και της διόδευσης του κύματος υλοποιήθηκε με απλοποιητικές παραδοχές. Γ' αυτόν ακριβώς το λόγο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης των πλημμυρικών μεγεθών στο συντελεστή εκροής της στέψης του φράγματος και στο συντελεστή τραχύτητας Manning.

Η ευαισθησία του προσομοιωμένου βάθους νερού στο συντελεστή τραχύτητας Manning είναι γενικά γνωστή. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση με τη χρήση του προγράμματος DAMBRK και για τις τιμές  $n_{min} = 0.05$  και  $n_{max} = 0.07$  υλοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας και προκύπτει μια αύξηση στη τιμή του συντελεστή Manning κατά 40 % προκαλεί αύξηση στη μέγιστη τιμή του βάθους νερού κατά 15 – 20 % και αντίστοιχα μείωση στη μέση τιμή της ταχύτητας ροής κατά 30%.

Σε ό,τι αφορά την επίδραση του συντελεστή εκροής της στέψης του φράγματος, διαπιστώθηκε από την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, ότι αύξηση στη μέγιστη τιμή του συντελεστή σύμφωνα με τις προτεινόμενες οδηγίες του προγράμματος οδηγεί σε μείωση της τιμής της πλημμυρικής αιχμής της μόλις κατά 5%. Επομένως, πρακτικά δεν υπάρχει ευαισθησία των τιμών της πλημμυρικής αιχμής του υδρογραφήματος εκροής και κατά επέκταση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο συντελεστή αυτό.

## 13.3 Δεδομένα άμεσης ζημιάς

Η τεχνική έκθεση των άμεσων εργασιών αποκατάστασης της ζημιάς που προκλήθηκε από το πλημμυρικό γεγονός της 27<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2003 στην Ιο, αναφέρει ότι «παρόλο που το φράγμα υπερπηδήθηκε για αρκετές ώρες, το κατάντη πρηνές του φράγματος δεν κατέρρευσε από τη διάβρωση των νερών της πλημμυρικής παροχής. Αυτό οφείλεται στο ότι τα βραχώδη υλικά στην περιοχή του αναβαθμού του κατάντη πρηνούς έχουν σημαντικά μεγαλύτερο πλάτος, της τάξεως των 30 m, από το προβλεπόμενο πλάτος σχεδιασμού. Επομένως, το μέγεθος των ζημιών στο φράγμα και στην περιοχή κατάκλυσης αναλογικά με την περίπτωση ήταν πολύ περιορισμένο» [Στεφανδούρος 2003].

Ο Δήμος Ιητών, αμέσως μετά το ατυχές συμβάν της υπερπήδησης του φράγματος Μυλοπότα, συνέταξε επίσημη έκθεση καταγραφής της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που προκλήθηκε στο φράγμα και στην περιοχή κατάκλυσης. Σύμφωνα με την έκθεση αυτή, τα ορμητικά νερά της πλημμύρας προκάλεσαν την καταστροφή

των μονάδων αφαλάτωσης, διυλιστηρίου και των δυο αντλητικών συγκροτημάτων του ταμιευτήρα, που βρίσκονταν εγκατεστημένοι στο κατάντη πρανές του φράγματος. Στην περιοχή κατάκλυσης, ο δρόμος προσπέλασης σε όλο το μήκος του υποχώρησε κατά 1.5 m φθάνοντας περίπου τον πυθμένα της αντιπλημμυρικής διώρυγας (διώρυγα εξόδου εικνεωτή πυθμένα) και ο ασφαλτοτάπητας του ξηλώθηκε. Επίσης, η υπερπήδηση του φράγματος προκάλεσε τη διάβρωση σημαντικού όγκου ογκολίθων και χώματος που παρασύρθηκαν κατάντη και μεταφέρθηκαν κατά μήκος του δρόμου προσπέλασης. Στο κάμπο του Μυλοπότα πλημμύρισαν σπίτια χωρίς όμως να υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία καταγραφής του βάθους νερού στο εσωτερικό των σπιτιών.

Για το συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός, τα μόνα διαθέσιμα στοιχεία καταγραφής άμεσης ζημιάς στην περιοχή κατάκλυσης συλλέχθηκαν από τις αιτήσεις των πληγέντων κατοίκων προς την αρμόδια δημόσια υπηρεσία του πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ (ΥΑΣ) για υποβολή κρατικής αποζημίωσης. Οι αιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν στοιχεία: (α) της γεωγραφικής θέσης καταγραφής της ζημιάς, (β) της περιγραφής της άμεσης ζημιάς, και (γ) της εκτίμησης του κόστους αποκατάστασης της ζημιάς από τον ιδιοκτήτη. Ωστόσο, επιτόπια αυτοψία της ζημιάς από την αρμόδια δημόσια υπηρεσία για την επιμέτρηση και αποτίμηση της ζημιάς αυτής δεν πραγματοποιήθηκε μετά το συγκεκριμένο συμβάν πλημμύρας, με αποτέλεσμα τα δεδομένα της παρατηρούμενης ζημιάς ανά κτήριο να περιοριστούν στην ποιοτική περιγραφή.

Τα κτήρια που κατακλύστηκαν στην περιοχή κατάντη του φράγματος είναι όλα ισόγειες κατοικίες, μόλις πέντε στον αριθμό, και ο τύπος άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που περιγράφεται σε όλες τις αιτήσεις, είναι η κάτarrευση του προστατευτικού τοιχίου (περίφραξη) στις εξωτερικές αυλές των σπιτιών. Οι θέσεις καταγραφής ζημιάς σημειώνονται στην Εικόνα 13-8 και τα υπόλοιπα διαθέσιμα στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 13-1.

Πίνακας 13-1. Κατάλογος καταγραφής θέσεων υλικών ζημιών από πλημμύρα στη νήσο Ιο

Θέση ζημιάς	Διατομή γεωμετρίας	Υλικό κατασκευής	Μήκος τοιχίου (m)	Ύψος τοιχίου (m)
1	Δ5	Ξεροληθιά	50	1.5
2		Ξεροληθιά	15	1.8
3	Δ6	Ξεροληθιά	50	1.5
4	Δ8	Σκυρόδεμα	40	1.5
5		Ξεροληθιά	20	1.2

Το υλικό κατασκευής του τοιχίου είναι κυρίως η ξεροληθιά (ή ξερολιθοδομή). Ξερολιθοδομή (ξεροληθιά) είναι η λιθοδομή που αποτελείται από ακατέργαστους φυσικούς λίθους χωρίς τη χρήση συνδετικού κονιάματος (εν ξηρώ). Λόγω της προφανούς αδυναμίας τους να αναλάβουν σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα κυρίως για περιφράξεις [Καραντώνη 2004].

## 13.4 Ανάλυση της σχέσης πλημμυρικών μεγεθών και ζημιάς

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία της καταγεγραμμένης ζημιάς, δεν είναι εφικτή η στατιστική ανάλυση της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και ζημιάς. Επομένως, όπως έχει ήδη αναφερ-

θεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η ανάπτυξη του μοντέλου ζημιάς στην περιοχή μελέτης περιορίζεται αρχικά στη διερεύνηση του μηχανισμού πρόκλησης του καταγεγραμμένου τύπου ζημιάς, δηλαδή της κατάρρευσης τοιχίου, και στη συνέχεια ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τις οριακές τιμές των πλημμυρικών μεγεθών που προκύπτουν από τη διερεύνηση του μηχανισμού πρόκλησης του τύπου ζημιάς.

### Μηχανισμός πρόκλησης κατάρρευσης τοιχίου από ξηρολιθοδομή

Για την απλοποίηση των υπολογισμών θεωρείται ότι το υλικό κατασκευής του εξεταζόμενου τοιχίου είναι μόνο η ξηρολιθοδομή, ένα υλικό χωρίς συνοχή που αδυνατεί να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις και κατά συνέπεια εξετάζεται ο μηχανισμός αστοχίας μόνο από ανατροπή για την πρόκληση της κατάρρευσης του τοιχίου. Στο εδάφιο 5.3.2. ο μηχανισμός αστοχίας από ανατροπή ενός δομικού στοιχείου, όπως είναι ένα προστατευτικό τοίχιο, περιγράφεται αναλυτικά. Στο συγκεκριμένο μοντέλο φόρτισης – αντίστασης, θεωρείται ότι το έδαφος έδρασης του τοιχίου και το ίδιο το τοίχιο είναι αδιαπέρατα και κατά συνέπεια η δύναμη της άνωσης αγνοείται και λαμβάνεται υπόψη η φόρτιση μόνο από υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις.

Εφόσον οι διαστάσεις κάθε πληγέντος τοιχίου στην περίπτωση μελέτης δεν είναι πλήρως γνωστές, εξετάστηκαν τέσσερις παραλλαγές των διαστάσεων ύψους και πλάτους ενός τοιχίου (Α, Β, Γ και Δ). Με βάση την εξίσωση (5.18) και ένα εύρος προσομοιωμένων τιμών της ταχύτητας ροής προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τις τιμές του βάρους νερού και της ταχύτητας ροής, που οριακά μπορούν να ανατρέψουν ένα τοίχιο από ξηρολιθοδομή.

Πίνακας 13-2. Παραλλαγή Α του προστατευτικού τοιχίου περιφραξής για  $H=1.20$  m και  $b=0.30$  m

$v$ (m/s)	$d$ (m)
0.80	0.85
1.00	0.83
1.25	0.80
1.50	0.76
2.00	0.68

Πίνακας 13-3. Παραλλαγή Β του προστατευτικού τοιχίου περιφραξής για  $H=1.50$  m και  $b=0.30$  m

$v$ (m/s)	$d$ (m)
0.80	0.91
1.00	0.90
1.25	0.87
1.50	0.83
2.00	0.74

Πίνακας 13-4. Παραλλαγή Γ του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για H=1.20 m και b=0.40 m

$v$ (m/s)	$d$ (m)
0.80	1.03
1.00	1.01
1.25	0.99
1.50	0.95
2.00	0.86

Πίνακας 13-5. Παραλλαγή Δ του προστατευτικού τοιχίου περιφράξης για H=1.50 m και b=0.40 m

$v$ (m/s)	$d$ (m)
0.80	1.12
1.00	1.10
1.25	1.07
1.50	1.03
2.00	0.94

### Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα αποτελέσματα του μηχανισμού αστοχίας

Οι διατομές Δ5, Δ6 και Δ8, είναι οι επιλεγμένες διατομές γεωμετρίας στην περιοχή κατάκλυσης που βρίσκονται πλησιέστερα σε θέσεις καταγραφής ζημιάς, δηλαδή σε καταρρεύσεις τοιχίου από ξηρολιθοδομή. Η σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών του βάρους νερού και της ταχύτητας ροής στις διατομές Δ5, Δ6 και Δ8 με τις οριακές τιμές των μεγεθών αυτών που απαιτούνται για την ανατροπή τοιχίου, αποσκοπεί στο να ελέγξει εάν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης πλημμύρας είναι ικανά να προικαλέσουν τον παρατηρημένο τύπο ζημιάς.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για τους σκοπούς της ανάλυσης έγιναν μια σειρά από σημαντικές παραδοχές. Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές βάρους νερού που αντιστοιχούν σε κάθε επιλεγμένη διατομή γεωμετρίας. Συνεπώς, οι σημειακές τιμές βάρους νερού προσεγγίζουν, αλλά δεν έχουν υπολογιστεί ακριβώς στις θέσεις καταγραφής της ζημιάς. Επιπλέον, η μονοδιάστατη προσομοίωση της πλημμύρας έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της μέγιστης μέσης τιμής της ταχύτητας ροής, η οποία αντιστοιχεί σε όλο το πλάτος της διατομής γεωμετρίας. Όσο το πλάτος της διατομής αυξάνει σε δεκάδες μέτρα, τόσο η παραδοχή αυτή οδηγεί σε όλο και πιο αδρομερή αποτελέσματα της ταχύτητας ροής. Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα των μεγεθών αυτών από τη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας ενός τοιχίου, δεν λαμβάνεται υπόψη η διαπερατότητα του εδάφους έδρασης του τοιχίου, απλοποιείται ο υπολογισμός της δράσης των υδροδυναμικών πιέσεων, και εκτιμάται εμπειρικά το ξηρό ειδικό βάρος της ξηρολιθοδομής.

Πίνακας 13-6. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα αποτελέσματα του μηχανισμού αστοχίας από ανατροπή

Θέση ζημιάς	Παραλλαγή τοιχίου	Προσομοιωμένες τιμές		Οριακές τιμές	
		$d$ (m)	$v$ (m/s)	$d$ (m)	$v$ (m/s)
1	B	0.66	1.47	0.83	1.50
	Δ			1.03	1.50
2	B	0.66	1.47	0.83	1.50
	Δ			1.03	1.50
3	B	0.61	1.59	0.82	1.60
	Δ			1.02	1.60
4	B	0.54	1.50	0.83	1.50
	Δ			1.03	1.50
5	Α	0.54	1.50	0.76	1.50
	Γ			0.95	1.50

Παρατηρείται από τον Πίνακα 13-6, ότι οι προσομοιωμένες τιμές των μεγεθών προσεγγίζουν τις αντίστοιχες οριακές τιμές που απαιτούνται για ανατροπή του τοιχίου από ξηρολιθοδομή. Ωστόσο, παρά τις παραδοχές, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν είναι ικανά να προκαλέσουν ανατροπή σε ένα προστατευτικό τοίχιο περιφραξής από ξηρολιθοδομή. Επομένως, η ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς σε μικροκλίμακα, όπως είναι η εξέταση μηχανισμού αστοχίας ενός δομικού στοιχείου, δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, όταν, για την ανάλυση χρησιμοποιούνται αποτελέσματα μονοδιάστατης προσομοίωσης του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Είναι απαραίτητη η ανάπτυξη πλημμυρικού μοντέλου τουλάχιστον διδιάστατης προσομοίωσης με υψηλή διακριτοποίηση, έτσι ώστε να μπορούν να μοντελοποιηθούν ικανοποιητικά και οι τοπικές συνθήκες ροής και κατ' επέκταση να αναλυθεί και να βαθμονομηθεί ένα μοντέλο ζημιάς σε μικροκλίμακα.

### 13.5 Ανακεφαλαιωτικά σχόλια

Το κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση της σχέσης των δεδομένων πλημμύρας και άμεσης ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον που προκλήθηκαν από πλημμυρικό γεγονός λόγω της υπερπήδησης του φράγματος Μυλοπότα στη νήσο Ιο στις 27 Ιανουαρίου 2003. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί ο μηχανισμός πρόκλησης άμεσης ζημιάς σε στοιχεία δομημένου περιβάλλοντος με βάση τα προσομοιωμένα μεγέθη πλημμύρας του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής.

Για το σκοπό αυτό το πλημμυρικό γεγονός προσομοιώθηκε θεωρώντας μονοδιάστατη, μη μόνιμη διόδευση πλημμυρικού κύματος στην περιοχή κατάντη του φράγματος Μυλοπότα με τη χρήση του προγράμματος DAMBRK. Για το συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός, τα μόνα διαθέσιμα στοιχεία άμεσης ζημιάς στην περιοχή κατάκλυσης είναι η θέση και η ποιοτική περιγραφή της άμεσης ζημιάς που είχε ως αποτέλεσμα την κατάρρευση προστατευτικών τοιχίων περιφραξής στις εξωτερικές αυλές των πληγέντων κατοικιών. Για την προσομοίωση του μηχανισμού πρόκλησης ζημιάς θεωρήθηκε ο μηχανισμός αστοχίας στοιχείου από ανατροπή υπό τη φόρτιση υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων. Ο μηχανισμός αστοχίας στοιχείου από ολίσθηση αγνοήθηκε αφού τα πληγέντα τοιχία είναι κατασκευασμένα από ξηρολιθοδομή.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε ότι οι προσομοιωμένες τιμές των πλημμυρικών μεγεθών δεν είναι ικανές να προκαλέσουν ανατροπή στο υπό εξέταση τοίχιο περιφραξής. Επομένως, η ανάπτυξη ενός μοντέλου ζημιάς σε μικροκλίμακα, όπως είναι ένας μηχανισμός αστοχίας ενός δομικού στοιχείου, δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, όταν για την ανάλυση χρησιμοποιούνται αποτελέσματα μονοδιάστατης προσομοίωσης του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής αγνοώντας τις τοπικές συνθήκες της ροής.

# Κεφάλαιο 14

## Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 14.1 Γενικά συμπεράσματα

Η συμβολή της διατριβής στην επιστημονική έρευνα στοιχειοθετείται από τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από τις μεθοδολογίες, επεξεργασίες και αναλύσεις σε όλη τη διατριβή και επιγραμματικά παρατίθενται παρακάτω.

#### Συμπεράσματα από το θεωρητικό μέρος της διατριβής

- Διακρίθηκαν οι ακόλουθες κατηγορίες πλημμύρας σε συνάφεια με την άμεση πλημμυρική ζημιά σε δομημένο περιβάλλον: (α) η πλημμύρα με κατάκλυση, (β) η πλημμύρα με υψηλή ταχύτητα ροής και (γ) η πλημμύρα με δράση κυμάτων.
- Διακρίθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι ανάλυσης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς που συνεισφέρουν στην τυποποίηση της μεθοδολογίας εκτίμησης της ζημιάς: (α) μέτρηση, (β) τύπος κλίμακας, (γ) κατηγορία πλημμύρας, (δ) στοιχείο δομημένου περιβάλλοντος, (ε) κλίμακα χωρικής ανάλυσης και (στ) μονάδα μέτρησης.
- Διαπιστώθηκε ότι ως δείκτης ευαλότητας ενός συστήματος έναντι πλημμύρας μπορεί να θεωρηθεί η διάκριση του δομημένου περιβάλλοντος υπό απειλή σε χαρακτηριστικούς τύπους δομημένης περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται ρητά η πλημμυρική τρωτότητα ενός συστήματος.
- Βάσει της μεθοδολογίας της ANCOLD (2003), προτάθηκαν τα ακόλουθα στάδια ανάλυσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης: (α) εκτίμηση, (β) αποτίμηση, (γ) αξιολόγηση και (δ) διαχείριση, στα οποία προσδιορίστηκε με σαφήνεια η συμβολή της εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς [Pistrika and Tsakiris 2007].
- Διαπιστώθηκε η σημασία αναγνώρισης της αιτίας πρόκλησης ενός πλημμυρικού γεγονότος στη διαδικασία αξιολόγησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης [Tsakiris et al. 2009].

- Αναδείχθηκαν κρίσιμα τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με την πλημμυρική ζημιά και θα προκύψουν κατά την εφαρμογή της νέας κοινοτικής Οδηγίας για τις πλημμύρες τόσο από τα κράτη μέλη όσο και από την Ελλάδα [Tsakiris et al. 2009].
- Διαπιστώθηκε από τη βιβλιογραφική επισκόπηση η έλλειψη τυποποίησης της διαδικασίας ανάλυσης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον και η αποσπασματική εφαρμογή προσεγγίσεων εκτίμησης της ζημιάς με επικρατέστερη τη μέθοδο της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς.

#### **Συμπεράσματα από τις περιπτώσεις μελέτης της διατριβής**

- Διαπιστώθηκε από τη στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς, ότι οι διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή των εκτιμώμενων τιμών ποσοστού ζημιάς στην ίδια εξεταζόμενη περιοχή σχετίζονται άμεσα με τις διαφοροποιήσεις στους χαρακτηριστικούς τύπους δομημένης περιοχής ανά χρήση. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες τιμές ποσοστού ζημιάς εκτιμήθηκαν κυρίως σε υπόγειες αποθήκες στη περίπτωση μελέτης στην Αττική.
- Διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη προσαρμογή συνάρτησης κατανομής σε σύνολα τιμών βάθους νερού και ποσοστού ζημιάς είναι τύπου δυναμοσυνάρτησης. Ο βαθμός συσχέτισης των δύο μεταβλητών εξαρτάται από την χωρική κλίμακα ανάλυσης.
- Διαπιστώθηκε ότι οι εμπειρικές σχετικές καμπύλες βάθους νερού – ζημιάς ανά χρήση δομημένης περιοχής για την Αττική θεωρούνται κατάλληλες για την εκτίμηση άμεσης ζημιάς σε επίπεδο μεσοκλίμακας. Οι καμπύλες αυτές οριστικοποιήθηκαν με τη μορφή κλιμακωτής συνάρτησης, είναι τοπικές καμπύλες και δεν έχουν γενική ισχύ [Pistrika 2009].
- Διαπιστώθηκε η σημασία της ανάπτυξης τοπικών καμπυλών βάθους νερού – ζημιάς στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εκτίμησης της αναμενόμενης ετήσιας ζημιάς από τη σύγκριση της καμπύλης για κατοικίες στην Αττική με αντίστοιχες καμπύλες από τη διεθνή βιβλιογραφία.
- Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή μοντέλου ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ με τη μέθοδο της καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς είναι κατάλληλη για ανάλυση ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας [Pistrika 2009].
- Η ανάπτυξη υποστηρικτικού εργαλείου εκτίμησης ζημιάς σε περιβάλλον ΓΣΠ οδηγεί σε αυτοματοποίηση του υπολογισμού της αναμενόμενης ζημιάς και κατά συνέπεια διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη της καμπύλης πιθανότητας μη υπέρβασης πλημμύρας – ζημιάς, που αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα μέτρα πλημμυρικής διακινδύνευσης.
- Διαπιστώθηκε από τη στατιστική περιγραφή της βάσης δεδομένων άμεσης ζημιάς, ότι οι διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή των εκτιμώμενων τιμών ποσοστού ζημιάς μεταξύ εξεταζόμενων περιοχών σχετίζονται άμεσα με τις διαφοροποιήσεις στις πλημμυρικές συνθήκες στις περιοχές αυτές. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες τιμές ποσοστού ζημιάς εκτιμήθηκαν κυρίως σε περιοχές για τις οποίες υπολογίστηκαν οι υψηλότερες τιμές ταχύτητας ροής στην περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη [Pistrika and Jonkman 2009].
- Διαπιστώθηκε, ότι ο τύπος δομικής ζημιάς αντιστοιχεί σε κατοικίες με εκτιμώμενες τιμές ποσοστού



ζημιάς μεγαλύτερες από το 50% της αρχικής εμπορικής τους αξίας στην περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη [Pistrika and Jonkman 2009].

- Με την εφαρμογή της μεθόδου «bootstrapping» διαπιστώθηκε, ότι η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του ποσοστού ζημιάς μειώνεται όσο ο αριθμός των πλημμυροπληκτων κτηρίων αυξάνει, με την προϋπόθεση ότι το δείγμα προέρχεται από κατακλυσμένη περιοχή χωρίς μεγάλες διαφοροποιήσεις στη μέγιστη στάθμη πλημμύρας [Pistrika and Jonkman 2009].
- Η στατιστική ανάλυση δεν είχε αποτέλεσμα μονοσήμαντη σχέση μεταξύ μεγεθών πλημμύρας (βάθος νερού, γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής, ρυθμός ανύψωσης στάθμης) και ποσοστού ζημιάς στην περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη. Στο ίδιο αποτέλεσμα είχε καταλήξει προγενέστερο ερευνητικό έργο που βασιζόταν σε παρατηρήσεις άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε κτήρια [Merz et al. 2004].
- Η επιμέρους χωρική μονάδα ανάλυσης (διαμέρισμα, ομάδα οικοδομικών τετραγώνων, οικοδομικό τετράγωνο) αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το βαθμό συσχέτισης μεταξύ στατιστικών προγνώσεων και παρατηρημένων τιμών ποσοστού ζημιάς στην περίπτωση ανάλυσης ζημιάς σε μεσοκλίμακα. Η διερεύνηση της ανάλυσης στο πιο λεπτομερές χωρικό επίπεδο του οικοδομικού τετραγώνου οδήγησε σε όλες τις περιπτώσεις πλημμυροπληκτων περιοχών σε αποδυνάμωση της συσχέτισης μεταξύ πλημμυρικών μεγεθών και ποσοστού ζημιάς [Pistrika and Jonkman 2009].
- Η εφαρμογή του κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen στη περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη (γειτονιά «Lower 9<sup>th</sup> Ward») δεν είχε ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην πρόβλεψη ζωνών ζημιάς [Pistrika and Jonkman 2009].
- Προτάθηκε εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς σε σχέση με το κριτήριο ζημιάς κατά Clausen, το οποίο διακρίνει τρεις ζώνες ζημιάς με βάση μόνο την ανεξάρτητη μεταβλητή του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής. Με την εφαρμογή αυτού του κριτηρίου, διαχωρίστηκαν αριθμητικά η μέση τιμή, η ελαχίστη και η μέγιστη τιμή ποσοστού ζημιάς για κάθε ζώνη ζημιάς. Αυτό το κριτήριο θεωρείται εφαρμόσιμο σε περιοχές κατοικίας που έχουν πληγεί από πλημμύρα λόγω αστοχίας αναχώματος [Pistrika and Jonkman 2009].
- Το εναλλακτικό κριτήριο ζημιάς σε σχέση με το κριτήριο κατά Clausen θα πρέπει να εφαρμόζεται με επιφυλακτικότητα σε ανάλυση ζημιάς σε χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας (π.χ. σε μεμονωμένα κτήρια) [Pistrika and Jonkman 2009].
- Διαπιστώθηκε ότι το ταίριασμα του βαθμού πολυπλοκότητας των μοντέλων πλημμύρας και ζημιάς είναι καθοριστικό για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ζημιάς [Πιστρίκα και Τσακίρης 2008]. Για παράδειγμα, η εφαρμογή της μεθόδου διερεύνησης του μηχανισμού αστοχίας πληγέντων στοιχείων κτηρίου βάσει πλημμυρικών μεγεθών είναι ακατάλληλη να υλοποιηθεί με τιμές πλημμυρικών μεγεθών ανηγμένων σε χωρικό επίπεδο μεσοκλίμακας.

#### **Γενικά συμπεράσματα**

- Διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία υπολογισμού του ποσοστού ζημιάς εξαρτάται από την χωρική κλίμακα ανάλυσης ζημιάς και τον τύπο αρχικής αξίας της πληγείσας ιδιοκτησίας.

- Διαπιστώθηκε ότι ο υπολογισμός ποσοστού ζημιάς βάσει της αντικειμενικής αξίας δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αποτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς σε σύγκριση με αυτόν βάσει της εμπορικής αξίας.
- Διακριθήκαν, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, δύο τρόποι αποτίμησης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον: (α) ως ποσοστό απώλειας της αρχικής αξίας της ιδιοκτησίας και (β) ως κόστος των εργασιών επισκευής / αντικατάστασης των πληγέντων στοιχείων.
- Διαπιστώθηκε ο καθοριστικός ρόλος της χωρικής κλίμακας ανάλυσης ζημιάς στο βαθμό συσχέτισης μεταξύ των πλημμυρικών μεγεθών και της άμεσης, αποτιμώμενης πλημμυρικής ζημιάς.
- Η εφαρμογή της μεθόδου σχετικής καμπύλης βάθους νερού – ζημιάς σε μεμονωμένα κτήρια (χωρικό επίπεδο μικροκλίμακας) δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για την αποτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε αυτά [Pistrika and Jonkman 2009].

## 14.2 Σημεία για μελλοντική έρευνα

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής επέτρεψε τη διερεύνηση πολλών διαφορετικών σημείων αλλά ταυτόχρονα άφησε και πολλές ερευνητικές κατευθύνσεις ανοιχτές, οι οποίες δεν ήταν δυνατό να αναπτυχθούν στο χρονικό πλαίσιο εκπόνησης της διατριβής. Μέσα από την ενασχόληση με διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις, υπολογιστικά προγράμματα, και πρωτογενή δεδομένα που συνέβαλαν στην έρευνα της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς, εντοπίζονται ορισμένες φάσεις της ερευνητικής διαδικασίας, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν θεωρητικά και τεχνικά.

Ένα από τα πιο βασικά προβλήματα στην έρευνα για την ανάπτυξη πρωτότυπων ή βελτιωμένων μεθοδολογιών μελέτης της πλημμυρικής ζημιάς στον ελληνικό και διεθνή χώρο, είναι η μικρή διαθεσιμότητα δεδομένων. Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι η έλλειψη δεδομένων, μετρήσεων και παρατηρήσεων ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον αυξάνει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της εκτίμησης της πλημμυρικής ζημιάς και κατά συνέπεια της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Ιδιαίτερα, στη σημερινή εποχή που διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων και σε μια ποικιλία μορφών, η συστηματική καταγραφή παρατηρήσεων και η ανάπτυξη ψηφιακών βάσεων σε υπολογιστικά συστήματα αποτελεί την αναγκαία υποδομή για την ανάπτυξη σύγχρονων μεθοδολογιών. Κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για την ανάπτυξη ψηφιακής βάσης δεδομένων με παραθυρικό περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη, αποτελεί το περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ).

Στην παρούσα διατριβή διαπιστώθηκε, ότι η επεξεργασία και γεωγραφική απεικόνιση μεγάλου αριθμού δεδομένων σε ΓΣΠ συμβάλλει στη διαπίστωση εμπειρικών χαρακτηριστικών, τα οποία ενσωματώνονται στις θεωρητικές προσεγγίσεις. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εξειδικευμένων εφαρμογών σε υπολογιστή για την επεξεργασία και διαχείριση των ψηφιακών δεδομένων και τον αυτοματισμό των υπολογισμών. Επομένως, κοινό χαρακτηριστικό των σημείων που επισημαίνονται και προτείνονται για μελλοντική έρευνα είναι ότι απαιτούν ως υποδομή την υλοποίηση ψηφιακής βάσης δεδομένων για την εισαγωγή της διαθέσιμης πληροφορίας.

Η μελλοντική έρευνα στην ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον ως ένα βαθμό προσδιορίζεται και από τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση. Τα σημεία που προτείνονται για μελλοντική έρευνα σχετική με την άμεση πλημμυρική ζημιά, παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω:

- Προτείνεται η συλλογή πρόσθετης πληροφορίας σχετικά με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των πλημμυρόπληκτων κατοικιών (χρήση κτηρίου, τύπος κατασκευής και θεμελίωσης, υλικά κατασκευής). Μια ανάλυση των δεδομένων ζημιάς με βάση τις ποιοτικές παραμέτρους κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον.
- Η προτεινόμενη σύνδεση ποιοτικών παραμέτρων κατασκευής κτηρίου με τη διαδικασία αποτίμησης άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον, συνεισφέρει στη διεύρυνση της ανάλυσης της πλημμυρικής τρωτότητας ενός συστήματος.
- Δεδομένης της αδύναμης σχέσης μεταξύ ποσοστού ζημιάς και πλημμυρικών μεγεθών, προτείνεται η συστηματική καταγραφή της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον ώστε να διερευνηθεί περαιτέρω η καταλληλότητα εφαρμογής μιας εμπειρικής σχετικής καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς για την εκτίμηση της ζημιάς.
- Είναι επίσης χρήσιμο να διερευνηθεί περαιτέρω η καταλληλότητα του χωρικού επιπέδου ανάλυσης ζημιάς σε σχέση με τις διαφοροποιήσεις στα δεδομένα πλημμύρας και ζημιάς που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της σχετικής καμπύλης βάρους νερού – ζημιάς.
- Η ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς αναφέρεται κατά κύριο λόγο στην οικονομική εκτίμηση της ζημιάς. Ωστόσο, θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί στο μέλλον η ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης σχέσης μεταξύ πλημμυρικών μεγεθών και μηχανισμών πρόκλησης βλάβης σε κτήρια λόγω πλημμύρας.
- Με την υπόθεση της διαθεσιμότητας των απαιτούμενων χωρικών δεδομένων, προτείνεται η διδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας για την εφαρμογή του «εναλλακτικού κριτηρίου ζημιάς κατά Clausen» στις λοιπές περιπτώσεις μελέτης της διατριβής. Παρουσιάζει ενδιαφέρον να ελεγχθεί η γενική ισχύς αυτού του κριτηρίου ζημιάς, εάν, για παράδειγμα, στην περίπτωση μελέτης της Αττικής οι εκτιμώμενες τιμές ποσοστού ζημιάς ανήκουν σε ζώνη «ζημιάς με κατάκλυση».
- Προτείνεται να εφαρμοστούν εμπορικά υπολογιστικά προγράμματα εκτίμησης οικονομικής ζημιάς, όπως είναι το μοντέλο HAZUS της FEMA, στην περίπτωση μελέτης στη Νέα Ορλεάνη, με στόχο να εκτιμηθεί ξανά η άμεση οικονομική ζημιά στο δομημένο περιβάλλον κατοικίας μετά τον τυφώνα Κατρίνα. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου πρόγνωσης οικονομικής ζημιάς και των εκτιμώμενων τιμών ποσοστού ζημιάς θα μπορούσε να συνεισφέρει στη βελτίωση του μοντέλου αυτού.
- Προτείνεται να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον και απώλειας ανθρώπινης ζωής. Ένας μεγάλος αριθμός θυμάτων κοντά στα ρήγματα της περιοχής «Lower 9<sup>th</sup> Ward» είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται με τον μεγάλο αριθμό καταρρεύσεων κατοικιών που συνέβησαν στην περιοχή αυτή και την επακόλουθη απώλεια καταφυγίου [Jonkman et al. 2009].
- Προτείνεται να συμπεριληφθούν στην ανάλυση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς δείκτες ευαλότητας με την κοινωνική διάσταση του συστήματος. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη την πείρα και την ετοιμότητα ενός εν δυνάμει υπό απειλή πληθυσμού, συμπεριλαμβάνεται στην πρόγνωση της ζημιάς και ο βαθμός αντιλήψης του πλημμυρικού κινδύνου. Γενικά, η ενσωμάτωση της κοινωνικής διάστασης στην εκτίμηση της άμεσης πλημμυρικής ζημιάς συνεισφέρει στον προσδιορισμό ενός αποδεκτού επιπέδου της πλημμυρικής διακινδύνευσης από την τοπική κοινωνία.
- Δεδομένης της έλλειψης διαθέσιμων μετρήσεων παροχής και καταγραφής τιμών πλημμυρικών μεγεθών στο πεδίο, τίθεται ζήτημα αξιοπιστίας των υδρολογικών δεδομένων και επιβεβαίωσης των

αποτελεσμάτων προσομοίωσης πλημμύρας, ειδικά στην περίπτωση ενός σεναρίου μικρής πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας.

## Απόδοση τεχνικής\* ορολογίας στην Ελληνική γλώσσα

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
<b>A</b>			
Άμεση ζημιά	Direct damage	Ζημιά που σχετίζεται με τη φυσική επαφή με το νερό (π.χ. στα κτήρια, υποδομή, γεωργική γη, οχήματα κτλ)	Damage related to physical contact of water (e.g. buildings, infrastructure, agricultural land, vehicles)
Ανάλυση διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk analysis	Η χρήση διαθέσιμης πληροφορίας για την εκτίμηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης σε ένα ορισμένο σύστημα. Γενικά περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: προσδιορισμός συστήματος, αναγνώριση φυσικού κινδύνου και μηχανισμών αστοχίας, εκτίμηση, αποτίμηση, αξιολόγηση, και διαχείριση διακινδύνευσης.	

---

\*στην περίπτωση που ο τεχνικός όρος είναι ξενόφερτος ή χρησιμοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, παρατίθεται για βέλτιστη αποσαφήνιση και κατανόηση ο αντίστοιχος ορισμός στην Αγγλική γλώσσα

---

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
Αναμενόμενη ζημιά	Expected damage		Damage figures estimated before an event in the context of risk management
Ανθεκτικότητα	Resilience		The capacity of a system, community or society potentially exposed to hazards to adapt by resisting or changing in order to reach and maintain an acceptable level of functioning and structure. This is determined by the degree to which the social system is capable of organizing itself to increase its capacity of learning from past disasters for better future protection and to improve risk reduction measures (UN/ISDR 2004)
Αντιμετώπιση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης	Emergency response		
Αξιολόγηση της διακινδύνευσης από πλημμύρα	Flood risk assessment	Η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύγκριση μεταξύ των εκτιμήσεων πλημμυρικής διακινδύνευσης και των αποδεκτών / ανεκτών ορίων διακινδύνευσης, έτσι ώστε να μπορεί να προτείνει κανείς κατάλληλη στρατηγική λήψης μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας	The process involves the comparison between the estimated flood risks with the acceptable / tolerable ones so as to reach to a decision recommendation about the flood risk reduction measures strategy.
Αποκατάσταση	Recovery		
Απόλυτη καμπύλη βάθους νερού - ζημιάς	Absolute depth-damage curve	Μια προσδιορισμένη σχέση μεταξύ βάθους νερού και της απόλυτης τιμής της μέγιστης ζημιάς	A specified relationship between flood depth and the absolute value of maximum economic damage
Αποτιμώμενη ζημιά	Tangible damage	Ζημιά που μπορεί να κοστολογηθεί ή να ποσοτικοποιηθεί με οικονομικούς όρους	Damage that can be priced or, else, quantified in monetary values
Αποτίμηση πλημμυρικής ζημιάς	Economic estimation or Valuation of flood damage	Εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς με οικονομικούς όρους	

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
Αποτίμηση διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk evaluation	Η διαδικασία λήψης απόφασης σχετικής με τον καθορισμό των αποδεκτών / ανεκτών ορίων διακινδύνευσης για την υπό απειλή πλημμύρας κοινωνία, δεδομένου των αποτελεσμάτων της εκτίμησης της διακινδύνευσης. Η διαδικασία αυτή αντανακλά την ικανότητα αντίληψης της πλημμυρικής διακινδύνευσης από την πλευρά της τοπικής κοινωνίας.	Decision process regarding the flood risk acceptability, given the results of flood risk estimation. It reflects the comprehension of the local society's perception of flood risk by the decision makers.
Απώλεια	Loss	Μείωση της αρχικής αξίας ενός πληγέντος στοιχείου	
<b>B</b>			
Βήμα	Span	Διάστημα	
Βάθος νερού	Flood depth or Water depth	Στάθμη νερού πάνω από την επιφάνεια εδάφους με επίπεδο αναφοράς το φυσικό έδαφος	Water height or elevation above ground level
Βλάβη ή Δομική ζημιά	Structural damage	Ζημιά σε δομικά στοιχεία ενός κτηρίου που μπορεί να επηρεάζει την ευστάθεια ενός κτηρίου	
<b>Δ</b>			
Διάγραμμα διασποράς	Scatter plot		A scatter plot is a type of mathematical diagram using Cartesian coordinates to display values for two variables for a set of data. The data is displayed as a collection of points, each having the value of one variable determining the position on the horizontal axis and the value of the other variable determining the position on the vertical axis. This kind of plot is also called a scatter chart, scatter diagram and scatter graph.

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
Διακινδύνευση πλημμύρας	Flood risk	Το μέτρο των αναμενόμενων ζημιών (κοινωνικών και οικονομικών) σε ένα χωροχρονικά ορισμένο σύστημα λόγω της πιθανότητας εκδήλωσης μιας πλημμύρας ορισμένης έντασης	Probability of flooding multiplied by flood damages
Διακρισιμότητα	Resolution		
Διαχείριση διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk management	Διαδικασία που περιλαμβάνει την αποτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, τη λήψη μέτρων για έλεγχο και τη μείωση της διακινδύνευσης στο σύστημα.	Process encompassing flood risk assessment and flood risk mitigation and control
Δυνητική ζημιά	Potential damage		Maximum possible damage in total
Δυναμική αντιμετώπισης	Coping capacity		The means by which people or organisations use available resources and abilities to face adverse consequences that could lead to a disaster. In general, this involves managing resources, both in normal times as well as during crises or adverse conditions. The strengthening of coping capacities usually builds resilience to withstand the effects of natural and human-induced hazards
<b>E</b>			
Εκτεθειμένος πληθυσμός	Exposed population	Πληθυσμός υπό απειλή μείον ο αριθμός ανθρώπων που διέφυγαν μέσω διαδικασιών εκκένωσης/διάσωσης ή βρήκαν καταφύγιο	Affected population minus the number of people that escaped through processes of evacuation/rescue or finding shelter
Εκτίμηση διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk estimation	Αναγνώριση και ποσοτικοποίηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης που σχετίζεται με ένα χωροχρονικά ορισμένο σύστημα	Identification and quantification of flood risk associated with a given system
Έμμεση ζημιά	Indirect damage	Παράπλευρη ζημιά χωρίς να σχετίζεται με τη φυσική επαφή με το νερό (π.χ. απώλειες στην παραγωγή έξω από την πλημμυρισμένη	Damage without physical contact of water (e.g. production losses outside of flooded area, market disturbances, loss of time)



Όρος	Term	Ορισμός	Definition
		περιοχή, δυσλειτουργίες της αγοράς, χάσιμο χρόνου)	
Επίπτωση	Consequence or Impact	Συνέπεια, θετική ή αρνητική	
Ετοιμότητα	Preparedness		
Ευαλότητα	Susceptibility		A measure of how sensitively an element at risk behaves when it is confronted with some kind of hazard
<b>Z</b>			
Ζημιά	Damage	Φθορά σε δομικά ή μη δομικά στοιχεία ενός κτηρίου, η οποία προκαλεί μείωση της αξίας του κτηρίου	The amount of property value, which is lost because of a flood event
<b>H</b>			
Μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων (των φυσικών κινδύνων)	Mitigation measures	Μέτρα που τροποποιούν τις επιπτώσεις των αναπόφευκτων ζημιών (σύστημα προειδοποίησης, σχεδιασμός χωροταξικών ρυθμίσεων, καμπάνιες πληροφόρησης και εκπαίδευσης, προγράμματα ασφάλισης)	Measures that modify the consequences of unavoidable damages (e.g. early warning systems, spatial land-use planning, information and training campaigns, flood insurance programs)
<b>Θ</b>			
Θνησιμότητα	Mortality	Κλάσμα ίσο με τις απώλειες ανθρώπινης ζωής από πλημμύρα δια τον εκτεθειμένο πληθυσμό	Ratio of flood fatalities over the exposed population
<b>K</b>			
Κατασκευαστικά μέτρα	Structural measures	(π.χ. φράγματα, ταμιευτήρες, αναχώματα κτλ)	
Καμπύλη βάθους	Depth-damage	Μια προσδιορισμένη σχέση μεταξύ βάθους	A specified relationship between flood depth

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
νερού - ζημιάς	curve or Stage-damage curve	νερού πλημμύρας και του μέγιστης ζημιάς	and maximum damage
Κίνδυνος πλημμύρας	Flood hazard	Πιθανότητα εμφάνισης ενός πλημμυρικού γεγονότος	Probability of flooding
<b>M</b>			
Μετριασμός πλημμύρας	Flood mitigation	Μείωση του μεγέθους (έντασης) πλημμύρας	
Μη αποτιμώμενη ζημιά	Intangible damage	Ζημιά που δεν μπορεί να κοστολογηθεί (π.χ. απώλεια ανθρώπινης ζωής, τραυματισμός, ηθική ζημιά, ζημιά σε πολιτιστικής αξίας περιοχές, περιβαλλοντικές απώλειες)	Damage that can not be priced or, else, quantified in monetary values (e.g. fatalities, injuries, moral damage, cultural losses, environmental losses)
<b>O</b>			
Όριο ασφαλείας	Safety standard	Πιθανότητα υπέρβασης προσδιορισμένης στάθμης νερού	Exceedance probability of specified water level
Όριο εμπιστοσύνης	Confidence limit		The end points of a confidence interval are referred to as confidence limits. In statistics, a confidence interval is a particular kind of interval estimate of a population parameter. Confidence intervals are used to indicate the reliability of an estimate. How likely the interval is to contain the parameter is determined by the confidence level or confidence coefficient. Increasing the desired confidence level will widen the confidence interval.
Όριο πρόβλεψης	Prediction bound		The bound that measures the uncertainty in estimating the function (fit) or in predicting a new response value (the fit plus random noise).

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
<b>Π</b>			
Παλινδρόμηση	Regression		
Παρατηρημένη τιμή	Observation or observed value		
Παρεμβολή ή Επέκταση	Extrapolation		
Πρόβλεψη		Η εκ των προτέρων εκτίμηση, η οποία επιχειρείται βάσει της παρατήρησης των δεδομένων και πείρας	
Πρόγνωση		Η εκ των προτέρων εκτίμηση βάσει συγκεκριμένων δεδομένων και υπολογισμών. Είναι το τελικό στάδιο της πρόβλεψης	
Πληθυσμός υπό απειλή	Affected population or population at risk	Όλοι οι άνθρωποι που είναι παρόντες στην περιοχή υπό απειλή πριν την εκδήλωση του φυσικού φαινομένου ή την λήψη σχετικής προειδοποίησης	All people that are present in the exposed area before any signs or warnings are perceived
<b>P</b>			
Ρυθμός ανύψωσης πλημμυρικής στάθμης	Rise rate		The height over which the water rises in one hour
Ραγδαία πλημμύρα	Flash flood	Τύπος πλημμύρας που συγκεντρώνει μεταξύ άλλων τα βασικά χαρακτηριστικά α) της απότομης κλίσης εδάφους β) χαμηλής βλάστησης και γ) μεγάλης έντασης βροχόπτωσης	
Κατασκευαστικά μέτρα μετριασμού των	Structural mitigation measures	Μέτρα που τροποποιούν τα χαρακτηριστικά μιας πλημμύρας ή την τρωτότητα του ανθρώπινου και υλικού δυναμικού στην	Measures that modify the characteristics of a flood or the vulnerability of people and properties to flood damage (e.g. dikes, flood

Όρος	Term	Ορισμός	Definition
επιπτώσεων		πλημμυρική ζημιά (π.χ. αναχώματα, φράγματα)	protection dams)
<b>Σ</b>			
Συνάρτηση θνησιμότητας	Mortality function	Σχέση μεταξύ της έντασης του φυσικού φαινομένου και της θνησιμότητας του εκτεθειμένου πληθυσμού	A specified relationship between the intensity of the physical phenomena and the mortality in the exposed population
Συνάρτηση στάθμης - παροχής	Stage-discharge function	Μια προσδιορισμένη σχέση μεταξύ στάθμης νερού και παροχής με την υπόθεση της μονοσήμαντης σχέσης	A specified relationship between depth and discharge with the assumption of one-to-one relationship
Σχετική καμπύλη βάθους νερού - ζημιάς	Relative depth-damage curve	Μια προσδιορισμένη σχέση μεταξύ ύψους νερού πλημμύρας και ποσοστού της μέγιστης ζημιάς σε σχέση με την αξία του πληγέντος κτηρίου	A specified relationship between flood depth and the percent damage
<b>T</b>			
Τρωτότητα	Vulnerability	Σύνολο συνθηκών και διαδικασιών που προέρχονται από φυσικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες, οι οποίες αυξάνουν την ευαλότητα μιας κοινότητας στην επίδραση των φυσικών κινδύνων. Είναι συνάρτηση της έκθεσης των στοιχείων υπό απειλή σε φυσικό κίνδυνο και της ευαλότητας της κοινότητας υπό απειλή.	Set of conditions and processes resulting from physical, social, environmental and economic factors, which increase the susceptibility of a community to the impact of hazards. It is a function of exposure and of susceptibility of elements at risk.
<b>Υ</b>			
Υπερπήδηση	Overtopping		Water that flows over a levee or flood control structure due to an elevated water level which is higher than the crest level

## Απόδοση ειδικής τεχνικής ορολογίας των ΗΠΑ στην Ελληνική γλώσσα

Όρος	Term	Definition
<b>A</b>		
Ανάχωμα	Levee	
<b>B</b>		
Βάθος νερού	Flood depth or Water depth	Water height or elevation above ground level with reference to NAVD88
<b>Γ</b>		
Συνοικία	Neighborhood	
<b>Δ</b>		
Διαμέρισμα	Tract	
<b>E</b>		
Εθνικό σύστημα ασφάλισης έναντι πλημμύρας	National flood insurance program	
Εκτιμητής «ουσιαστικής» ζημιάς κατοικίας	Residential Substantial Damage Estimator	
<b>H</b>		
Ημιυπόγειοι χώροι	Crawl space	It is a type of basement in which one can not stand up, usually the height may be as little as a foot.

<b>Όρος</b>	<b>Term</b>	<b>Definition</b>
<b>Κ</b>		
Κοινή ομάδα εκτέλεσης αξιολόγησης συνεπειών	IPET – Interagency Performance Evaluation Taskforce	
<b>Ο</b>		
Οικοδομικό τετράγωνο	Block	
Ομάδα οικοδομικών τετραγώνων	Block groups	
Ομάδα αξιολόγησης συνεπειών	Mitigation Assessment Team	
Ομοσπονδιακή υπηρεσία εκτάκτων αναγκών	Federal Emergency Management Agency	
<b>Π</b>		
Προστατευτικός τοίχος για αντιπλημμυρικούς σκοπούς	Floodwall	
<b>Σ</b>		
Συστάδα	Cluster	
Σώμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ	United States Army Corps of Engineers	
<b>Υ</b>		
Υπηρεσία Ασφάλειας έναντι Πλημμύρας	Flood Insurance Administration	
Υποπεριοχή	Polder	An area that is below sea level and is enclosed by an uninterrupted chain of water retaining structures, levees and/or high grounds
<b>Ψ</b>		
Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	Digital Terrain Model	Model in which the considered area is divided in squares to which the elevation, with reference to NAVD88, is assigned.

# Ακρώνυμα

Στην Ελληνική γλώσσα	
ΕΓΣΑ	Εθνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
ΣΣ	Στεγαστική συνδρομή
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
Στην Αγγλική γλώσσα	
FEMA	Federal Emergency Management Administration
FIA	Flood Insurance Administration
FLAIR	Flood Loss Assessment Information Report
FIA	Flood Insurance Administration
GIS	Geographical Information System
IPET	Interagency Performance Emergency Team
MAT	Mitigation Assessment Team
MRGO	Mississippi River Gulf Outlet
NAVD88	North American Vertical Datum of 1988
NCDC	National Climatic Data Center
NFIP	National Flood Insurance Program
NHRC	Natural Hazards Research Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric

	Administration
RSDE	Residential Substantial Damage Estimator
SCS	Soil Conservation Service
UNU-EHS	United Nations University – Institute for Environment and Human Security
UNDP-BCPR	United Nations Development Programme- Bureau of Crisis Prevention and Recovery
UN / ISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
USACE	US Army Corps of Engineers



# Βιβλιογραφία

## Ξενογλώσση βιβλιογραφία

- Ahern M., Kovats S., Wilkinson P., Few R., Matthies F., 2005. *Global health impacts of floods: epidemiologic evidence*. *Epidemiologic Reviews* 27 (1), pp. 36–46.
- Alexander D., 2000. *Confronting catastrophe*. Terra, Hertfordshire.
- ANCOLD, 2000. *Guidelines on assessment of the consequences of dam failure*. Australian National Committee on Large Dams. October 2000.
- ANCOLD, 2003. *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams. October 2003.
- Appelbaum S.J., 1985. *Determination of urban flood damage*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 111(3), pp. 269-283.
- Arnell N.W., 1986. *Average annual damage by flood frequency zone*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(1), pp. 104 - 113.
- Arnell N.W., 1989. *Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(1), pp. 94 - 107.
- ASCE, 2000. *Flood resistant design and construction*. ASCE Standard 24-98. Reston, VA: American Society of Civil Engineers
- ASCE, 2007. *The New Orleans Hurricane Protection System: What Went Wrong and Why*. A report by the American Society of Civil Engineers Hurricane Katrina External Review Panel. American Society of Civil Engineers.
- Asselman N. E. M. and Jonkman S. N., 2003. *Consequences of floods: the development of a method to estimate the loss of life*. The Netherlands: IHE Delft.
- Barnes H., 1967. *Roughness Characteristics of Natural Channels*. U.S. Geological Survey. Water Supply, paper 1849.
- Barredo J., 2007. *Major flood disasters in Europe: 1950–2005*, *Natural Hazards*, 42(1), pp.125-148.
-

- Bateman I.J., Willis K.G., 1999. *Valuing Environmental Preferences – Theory and Praxis of the Contingent Valuation Method in the US, EU, and Developing Countries*. Oxford University Press, Oxford.
- Beard L.R., 1997. *Estimating Flood Frequency and Average Annual Damage*. Journal of Water Resources Planning and Management, 123(2), pp. 84-88.
- Becker A., 2008. *Wood frame building response to rapid onset flooding*. MSc Thesis. The University of British Columbia. Canada. September 2008.
- Bedford T., Cooke R., 2002. *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge University Press.
- Begum S., Van Gelder P.H.A.J.M., 2004. *Flooding in Europe: Risks and Challenges*. Special Edition: In Natural Hazards (2005) 36, pp. 1–4, Springer 2005.
- Black A.R., Evans S.A., 1999. *Flood Damage in the UK: New Insights for the Insurance Industry*. University of Dundee for AON Group and CGU Insurance. Dundee, UK. June.
- Brent, R. J., 1996. Applied Cost-Benefit Analysis. Cheltenham.
- Black R.D., 1975. *Flood proofing rural residences – A Project Agnes report*. US Department of Commerce, Economic Development Administration, EDA 77-088.
- Blong R., 2003. *A new damage index*. Natural Hazards, 30(1), pp. 1-23.
- Bohle H.G., 2001. *Vulnerability and Criticality: Perspectives from Social Geography*. In: IHDP Update 2/2001. Newsletter of the international human dimensions programme on global environmental change, pp.1-7.
- BOSS DAMRK, 2000. User's Manual. *DMABRK Hydrodynamic Flood Routing*. BOSS International.
- Bourque L. B., Siegel J. M., Kano M., Wood M. M., 2006. *Weathering the storm: the impact of hurricanes on physical and mental health*. The Annals of the American Academy of Science AAPPS Vol. 604, pp. 129-151.
- Brinkmann E., Ragas W., 2006. *An estimate of the cost of hurricane Katrina flood damage to single-family residential structures in Orleans parish*. Mortgage Bankers Association 6 Feb 2006.
- Brinkmann J., 2006. *Measuring vulnerability to hazards of natural origin – Towards disaster resilient society*. UNU Press, Tokyo.
- Buchele B., Kreibich H., Kron A., Thieken A., Ihringer J., Oberle P., Merz B. and Nestmann F., 2006. *Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, pp. 485-503.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Clausen L.K., 1989. *Potential Dam Failure: Estimation of Consequences, and Implications for Planning*. Unpublished Master of Philosophy Thesis at the School of Geography and Planning, Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners. Redhill.
- Davie T., 2003. *Fundamentals of Hydrology*. Routledge-Taylor & Francis Group, pp. 169.

- De Bruijn K.M., 2006. *Improvement of casualty functions based on data of the flooding of New Orleans in 2005*. Report prepared of WL/Delft Hydraulics. December 2006.
- Debo T.N., 1982. *Urban flood damage estimation curves*. Journal of Hydraulics Division. Proceedings of the ASCE, 108(HY10), pp. 1059-1069.
- Delft Hydraulics, 2003. *SOBEK 1D2D*. Delft. <http://www.sobek.nl>.
- DHS, 2006. *Current housing unit damage estimates hurricanes Katrina, Rita and Wilma*. February 12, 2006. Department of Homeland Security.
- Dutta D., Srinantha H., Katumi M., 2003. *A mathematical model for flood loss estimation*. Journal of Hydrology 277(2003) 24-49.
- Egorova R., van Noortwijk J. M., Holterman R., 2008. *Uncertainty in flood damage estimation*. International Journal of River Basin Management, JRBM Vol. 6 (2): pp. 1-10.
- European Council, 2007. *EU Directive of the European Parliament and of the European Council on the estimation and management of flood risks (2007/60/EU)*.
- FEMA, 1993. *Flood insurance study guidelines and specifications for study contractors*. Report 37. Washington D.C. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2001. *Guidance on Estimating substantial Damage using Residential Substantial Damage Estimator Software Program RSDE 2.0*. National Flood Insurance Program. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2006a. *Mitigation Assessment Team. Hurricane Katrina in the Gulf Coast. FEMA 549*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2006b. *Multi-hazard loss estimation methodology – flood model*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Freeman P., Martin L., Mechler R., Warner K., 2004. *A methodology for incorporating natural catastrophes into macroeconomic projections*. Disaster Prevention and Management: An International Journal 13 (4), pp. 337–342.
- FLAS, 2007. *Software Development for Flood Impacts Estimation*. Final Technical Report (Unpublished). National Technical University of Athens. Beneficiary: Prefecture of Eastern Attica. December 2009
- Friedland C. J., 2009. *Residential Building Damage from Hurricane Storm Surge: Proposed Methodologies to Describe, Assess and Model Building Damage*. PhD Thesis, Louisiana State University.
- Froehlich D.C., 1995. *Embankment Dam Breach Parameters Revisited*. Journal of Water Resources Planning and Management, 121(1), pp. 90-97.
- GARM, 1994. *Geographic Areas Reference Manual*. Economics and Statistics Administration. U.S. Department of Commerce. November 1994.
- Garrod G., Willis K.G., 1999. *Economic Valuation of the Environment*. Edward Elgar, Cheltenham, UK und Northampton, MA, USA.

- Gewalt M., Klaus J., Peerbolte E.B., Pflügner W., Schmidtke R.F. and Verhage L., 1996. *EUROflood – Technical Annex 8. Economic Assessment of Flood Hazards. Regional Scale Analysis-Decision Support System (RSA-DSS)*. München.
- Goldman D., 1997. *Estimating Expected Annual Damage for Levee Retrofits*. Journal of Water Resources Planning and Management, 123(2), pp. 89 - 94.
- Graham W.J., 1999. *A procedure for estimating loss of life caused by dam failure*. Dam safety office 296 report DSO-99-6
- Green C. H., Penning-Rowsell E. C., 1989. *Flooding and the quantification of "intangibles"*. Journal of Institute of Water and Environmental Management, 3 (1), 28.
- Green C.H., van der Veen A., Wierstra E. and Penning-Rowsell E.C., 1994. *Vulnerability refined: analysing full flood impacts*. In: Penning-Rowsell E., Fordham M. (Eds.) *Floods across Europe – Flood hazard assessment, modelling and management*. Middlesex University Press, London.
- Grigg N.S., Helweg O.J., 1975. *State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas*. Water Resources Bulletin. American Water Resources Association. Vol 11 (2), pp. 379-390.
- Grünthal E., 1998. *European MacroSeismic Scale*. Publisher: Ministere de la Culture, de L'Énseignement Supérieur et de la Recherche.
- Hallegatte S., 2008. *An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina*. Risk Anal 28(3):pp. 779–799.
- Hanley N., Spash C.L., 1993. *Cost-Benefit Analysis and the Environment*. Edward Elgar, Brookfield.
- HEC-GeoRAS, 2005. *GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGIS*. User's Manual. Version 4. US Army Corps of Engineers. September 2005.
- HEC-HMS, 2009a. *Quick Start Guide*. Version 3.4. Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System. August 2009.
- HEC-HMS, 2009b. *User's Manual*. Version 3.4. Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System. August 2009.
- HEC-RAS, 2004. *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*. Hydraulic Reference Manual. Version 3.1.3. US Army Corps of Engineers. March 2004.
- HSE, 2001. *Reducing risks protecting people*. HSE publication. Health & Safety Executive.
- IPET, 2007a. *Performance Evaluation of the New Orleans and South East Louisiana Hurricane Protection System. Volume VII – The Consequences*. Final Report. 26 March 2007. Interagency Performance Evaluation Taskforce. US Army Corps of Engineers.
- IPET, 2007b. *Performance evaluation of the New Orleans and southeast Louisiana hurricane protection system. Volume V - The performance - Levees and floodwalls*. Final Report. 26 March 2007. Interagency Performance Evaluation Task Force. US Army Corps of Engineers.
- IPO, 1996. *Guidelines for the defence of regional flood defences*. The Hague, 1996.

- ISDR, 2004. *Living with Risk*. A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. www.unisdr.org. International Strategy for Disaster Reduction
- Johnson F.R., Banzhaf M.R. and Desvousges W.H., 2000. *Willingness to pay for improved respiratory and cardiovascular health: a multiple-format, stated-preference approach*. Human Health 9(4), pp. 295-317.
- Johnson W.K., 1985. *Significance of location in computing flood damage*. Journal of Water Resources Planning and Management, 111(1), pp. 65-81.
- Jonkman S. N., Maaskant B., Boyd E., Levitan M. L., 2009. *Loss of life caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina: Analysis of the relationship between flood characteristics and mortality*. Risk analysis, Vol. 29, No. 5, pp. 676-698.
- Jonkman S.N., 2007. *Loss of life estimation in flood risk assessment*. PhD thesis, Delft University.
- Jonkman S.N., Bočkarjova M., Kok M., Bernardini P., 2008. *Integrated hydrodynamic and economic modeling of flood damage in Netherlands*. Ecological Economics 66, pp. 77-90.
- Jonkman S.N., Kelman I., 2005. *An analysis of causes and circumstances of flood disaster deaths*. Disasters 29 (1), pp. 75–97.
- Jonkman S.N., Penning-Rowsell E., 2008. *Human instability in flood flows*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) Vol. 44 No. 4 August 1008, pp. 1-11.
- Kaplan S., Garrick B.J., 1981. *On the quantitative definition of risk*. Risk Analysis Vol. 1 pp. 11-27.
- Kates R.W., 1965. *Industrial Flood Losses: Damage Estimation in the Lehigh Valley*. Research Paper No. 98, Department of Geography, University of Chicago, USA.
- Kelman Il., 2002. *Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England*. PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge, U.K.
- Kelman Il., Spencer R., 2003. *A flood failure flowchart for buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer 156. September 2003. Issue ME3, pp. 207-214.
- Kelman, Il., Spencer R., 2004. *An overview of flood actions on buildings*. Engineering Geology 73, pp. 297-309.
- Kendal H.W., Hubbard R.B., Minor G.C., Bryan W.M., 1997. *The Risks of Nuclear Power Reactors: a Review of the NRC Reactor Safety Study WASH-1400*. Cambridge, 1977. Union of Concerned Scientists
- Klampanos I., Pistrika Aim., 2008. FLAS - *Computational System for flood damage estimation*. User's Manual (unpublished). Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning. School of Rural and Surveying Engineering. National Technical University of Athens.
- Knabb R., Rhome J. and Brown D., 2006. *Tropical Cyclone Report: Hurricane Katrina 23-30 August 2005*. National Hurricane Center, 20 December 2005, updated. Aug 2006.
- Kok M., Aalberts M., Maaskant B., de Wit L., 2007. *Polder Flood Simulations for Greater New Orleans. Hurricane Katrina August 2005*. TU Delft. The Netherlands.
- Kreibich H., Thielen A., 2007. *Coping with floods in the city of Dresden, Germany*. Natural Hazards. DOI

10.1007/s11069-007-9200-8. Published on line: December 2007.

Kreibich H., Thielen A.H., Petrow T., Muller M., Merz B., 2005. *Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures —lessons learned from the Elbe flood in August 2002*. Natural Hazards and Earth System Sciences 5 (1), pp. 117–126.

LACPR, 2006. *Enclosure C: Louisiana economy and 2005 hurricane damage*. Preliminary technical report to congress. June 2006. Louisiana Coastal Protection Recovery Authority.

Liu J.T., Hammitt J.K., Wang J.D., Liu J.L., 2000. *Mother's willingness to pay for her own and her child's health: a contingent valuation study in Taiwan*. Human Health 9(4), pp 319-326.

Maaskant B., 2007. *Research on the relationship between flood characteristics and fatalities. Based on the flooding in New Orleans caused by Hurricane Katrina*. MSc thesis, 2007. TU Delft. The Netherlands.

MATLAB, 2008. *Curve - fitting Tool*. Statistics Toolbox, The Math Works Inc.

MATLAB, 2008. *Distribution - fitting Tool*. Statistics Toolbox, The Math Works Inc.

Mechler R., 2004. *Natural Disaster Risk Management and Financing Disaster Losses in Developing Countries*. VVW GmbH, Karlsruhe.

Merz B., Kreibich H., Thielen A. and Schmidtke R., 2004. *Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4(1), pp. 153-163.

Messner F., Meyer V., 2006. *Flood damage, vulnerability and risk perception - challenges for flood damage research*. Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. pp. 149-167.

Messner F., Penning-Rowsell E., Green C., Meyer V., Tunstal S., van der Veen A., 2007. *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.

Meyer V. and Messner F., 2005. *National flood damage evaluation methods: a review of applied methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany*. UFZ discussion papers 13/2005.

Mijala T., Huokuna M., Honkakunnas T., 2001. *Development of rescue actions based on dam-break flood analysis*. Helsinki: Finnish Environment Institute.

MOC, 1996. *Flood Damage Statistics in Japan*. Technical Report, River Engineering Bureau, Ministry of Construction, Japan, in Japanese.

Mosteller F., Tukey J., 1977. *Data Analysis and Regression*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Motayed A.K. and Krishnamurthy M., 1979. *Impact of hydrological uncertainties on flood insurance*. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, 105(HY11), pp. 1454 - 1455.

National Research Council, 2000. *Risk Analysis and Uncertainty in flood damage reduction studies*. Washington D.C.

NFIP, 2009. *National Flood Insurance Program publications*. Public access:  
<http://www.fema.gov/business/nfip/libfacts.shtm>.

- Oliveri E., Santoro M., 2000. *Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo*. Dip. Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90100 Palermo, Italy. *Urban Water* 2 (2000), pp. 223-234.
- Palisade Corporation, 2004. *Guide to using BestFit Statistical Tool: Distribution Fitting for Windows*.
- Pardue J. H., Moe W.M., McInnes D., Thibodeaux L.J., Valsaraj K.T. Maciasz E., van Heerden I., Korevec N., Yuan Q. Z., 2006. *Chemical and microbiological parameters in New Orleans floodwater following hurricane Katrina*. *Environmental Science & Technology* Vol. 39 No. 22, pp. 8591-8599.
- Parker D.J., Green, C.H., Thompson P.M., 1987. *Urban flood protection benefits: a project appraisal guide "The Red Manual"*. Aldershot, UK: Gower Technical Press.
- Paté-Cornell M.E., 1996. *Uncertainties in risk analysis: six levels of treatment*. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 54 No. 2-3 pp. 95-111.
- Pelling M., 2003. *The Vulnerability of Cities*. Natural Disasters and Social Resilience. Earthscan publications, London.
- Penning-Rowsell E.C., Chatterton J.B., 1977. *The benefits of flood alleviation: a manual of assessment techniques "The Blue manual"*. Aldershot, UK: Gower Technical Press.
- Penning-Rowsell E.C., Chatterton J.B., Day H.J., Ford D.T., Greenaway M.A., Smith D.I., Wood T.R., Witts R.C., 1987. *Comparative aspects of computerized floodplain data management*. *Journal of Water Resources Planning and Management* 113 (6), pp. 725-744.
- Penning-Rowsell E.C. et al., 2003. *The Benefits of flood and coastal defence: techniques and data for 2003*. Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- Penning-Rowsell E.C., Fordham M., 1992. *Flood hazard assessment, modelling and management: Results from the EUROflood project*. Floods across Europe. London, Middlesex Univ. Press
- Penning-Rowsell E.C., Green C., 2000. *New Insights into the Appraisal of Flood-Alleviation Benefits: (1) Flood Damage and Flood Loss Information*. *J. Chart. Inst. Water E.*, 14, pp.347-353.
- Pidgeon N.F., 1992. *The psychology of risk*. In: Blockley, D. (ed.) *Engineering safety*, McGraw Hill
- Pilgrim D.H., Cordery I., 1993. *Flood Runoff, Handbook of Hydrology*. School of Civil Engineering, University of New South Wales, Australia.
- Pistrika Aim., 2009. *Flood Damage Estimations based on Flood Simulation Scenarios and a GIS platform*. In Proceedings of EWRA 7<sup>th</sup> International Conference 'Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Instability', Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009, pp. 419-427
- Pistrika Aim., 2010. *Flood Damage Estimations based on Flood Simulation Scenarios and a GIS platform*. *European Water*, accepted (after selection from EWRA 7<sup>th</sup> International Conference, in Limassol 2009)
- Pistrika Aim., Jonkman S.N., 2009. *Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after Hurricane Katrina*. *Natural Hazards*. DOI 10.1007/s11069-009-9476-y. Published on line: 06 November 2009
- Pistrika Aim., Makropoulos C., Maksimovic C., 2006. *A Decision Support Framework for Wetland Rehabilitation*

- tion & Management – A Case Study of Bardaca Wetland*. In Proceedings of 23rd Conference of Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, August 2006. Belgrade, Serbia, paper no. 39 (on CDROM)
- Pistrika Aim., Tsakiris G., 2007. *Flood Risk Estimation: A Methodological Framework*. In Proceedings of EWRA 6th International Conference 'Water Resources Management: New Approaches and Technologies', Chania, Greece, 14-16 June 2007, pp.13-22.
- Presley S.M. et al., 2006. *Assessment of pathogens and toxicant in New Orleans, LA, following hurricane Katrina*. Environmental Science & technology Vol. 40 No. 2 pp. 468-474
- Reible D.D., Haas C.N., Pardue J.H., Walsh W.J., 2006. *Toxic and Contaminant Concerns Generated by Hurricane Katrina*. The Bridge, Vol 36 No.1 pp. 5-13.
- Roberson J. A., Cassidy J. J., Chaudry M.H., *Hydraulic Engineering*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1988.
- Roos W., 2003. *Damage to buildings*. Delft Cluster report DC1-233-9.
- Rose A.Z., 2004. *Economic principles, issues, and research priorities in hazard loss estimation*. In: Okuyama, Y., Chang, S.E. (Eds.), *Modelling Spatial and Economic Impacts of Disasters*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Sangrey D.A., Murphy P.J., Nieber J.K., 1975. *Evaluating the Impact of Structurally Interrupted Flood Plain Flows*. Technical Report No. 98, Project No. A-059-NY, Annual Allotment No. 14-31-0001-5032, submitted to The Office of Water Research and Technology, U.S., Department of the Interior, Washington, D.C., USA.
- Schwarz J., Maiwald H., 2008. *Damage and Loss Prediction Model based on the vulnerability of building types*. In Proceedings of 4th International Symposium on Flood Defence "Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability". Toronto, Ontario, Canada, Institute for Catastrophic Loss Reduction.
- Seed R. B. et al., 2005. *Investigation of the performance of the New Orleans flood protection systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005*. Final Report. Independent Levee Investigation Team, July 31 2006.
- Sendi P., Gafni A., Birch S., 2002. *Opportunity costs and uncertainty in the economic evaluation of health care interventions*. Human Health 11(1):23-31.
- Shaw M.E., 1983. *Hydrology in Practice*.
- Sherman L.K., 1942. *The unit hydrograph method*. Chapter X1E of Hydrology, ed. O.E.Meinzer, pp. 514-525.
- Skinner R.L., 2006. *Review of Hurricane Katrina Activities*. Washington, D.C.: Department of Homeland Security.
- Slovic P., 1987. *Perception of Risk*. Science Vol. 236 pp.280–285
- Smith D.I., 1981. *Actual and potential flood damage: a case study for urban Lismore, NSW, Australia*. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra. Applied Geogra-



- phy (1981), pp. 31-39.
- Smith D.I., 1994. *Flood damage estimation – A review of urban stage-damage curves and loss functions*. Water SA, 20(3), pp. 231-238.
- Smith K., 1996. *Environmental Hazards. Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge, London, UK.
- Soil Conservation Service, 1978. *Floodwater Damage Estimates Residential and Commercial Property*. Technical Note, Series No. 603. October 1978. U.S. Department of Agriculture.
- Stedinger J.R., 1997. *Expected Probability and Annual Damage Estimators*. Journal of Water Resources Planning and Management, 123(2), 125 - 135.
- Steenge A.E., Bočkarjova M., 2007. *Thinking about rigidities and imbalances in post-catastrophe economies; an input-output based proposition*. Economic Systems Research 19 (2), 205–223.
- Stuart A., Ord K., Arnold S., 1999. *Kendall's advanced theory of statistics*. Vol. 2A: Classical inference & the linear model, 6th ed. Lavoisier Librairie, p.882.
- Stuyt L.C.P.M., Reinders J., Hoek E.E., van der Hermans A.G.M., de Muinck Keizer M., Kamperveen J.P., Hoogvliet M.C., Gerritsen A.L., Hounjet M.W.A., Bontebal M.P., Hoefsloot F.V.J., Icke J., 2003. *Environmental Impact of Flooding*. Delft Cluster Report DC1-233-8.
- Sullivent E.E., West C.A., Noe R.S., Thomas K.E., Wallace L.J.D., Leeb, R.T., 2006. *Nonfatal injuries following hurricane Katrina – New Orleans*. Louisiana, 2005, Journal of Safety Research Vol. 37, pp. 213-217.
- Sutcliffe J.V. (1978). *Methods of Flood Estimation: A Guide to the Flood Studies Report*". Institute of Hydrology. Report No. 49, pp. 50.
- Tang J., Vongvisessomjai S., Sahasakmontri K., 1992. *Estimation of flood damage cost for Bangkok*. Water Resources Management 6, pp. 47–56.
- Thieken A.H. et al., 2008. *Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses*. In Proceedings of 4th International Symposium on Flood Defence "Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability", 3 May 2008, Toronto, Canada.
- The Times-Picayune*, 2009. Published by David Hammer. 03 November 2009
- Thieken A.H., Müller M., Kreibich H. and Merz B. 2005. *Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany*. Water Resour. Res., 41(12), W12430.
- Tsakiris G., 2006. *Practical Application of Risks and Hazard Concepts in Proactive Planning*. Report in the framework of NOE Interreg IIC (DISMA subproject). DISMA Coordination Meeting, 14-15 Dec. 2006, Athens.
- Tsakiris G., Nalbantis I., Pistrika Aim., 2009. *Critical Technical Issues on the EU Flood Directive*. European Water 25/26, pp. 39-51.
- Tsakiris G., Pistrika Aim., Ioannidis Ch., Soile S., Georgopoulos, A., 2008. *Development of an Information System for flood management of archaeological sites*. In Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Sci-

- ence and Technology in Archaeology and Conservation "Documentation and Risk Management of Cultural Sites". 08-14 December 2008. Rome, Italy.
- Tsakiris G., Pistrika Aim., Klampanos I., Laoupi A., Ioannidis Ch., Soile S., Georgopoulos A., 2007. *DISMA- Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites - Technical Report - Volume I (unpublished)*. INTERREG IIIC - Sud Initiative and the Regional Operation Framework of NOE Programme – Patrimoine et prevention des risques naturels. Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning, Athens, Greece.
- UNSW, 1981. *Evaluation Methodology of Flood Damage in Australia*. Technical Project Report, University of New South Wales, Australia.
- USACE, 1984. *Shore Protection Manual*. Vol. 2, 4th ed. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- USACE, 1988. *National Economic Development Procedures Manual*. US Army Corps of Engineers Fort Collins.
- USACE, 1996. *Risk-based analysis for flood damage reduction studies*. Engineering Manual, 1110-2-1619, chapter 2. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers
- USACE, 2000. *Generic depth-damage relationships*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- USACE, 2003. *Generic depth-damage relationships for residential structures with basements*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- Van Gelder, P.H.A.J.M. van, 2000. *Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures*. PhD thesis, Delft University of Technology
- Van Heerden I. et al., 2006. *The Failure of the New Orleans Levee System during Hurricane Katrina*. 18 December 2006. Team from the Louisiana State University.
- van Zuilekom K.M., van Maarseveen M.F.A.M., van der Doef M.R., 2005. *A decision support system for preventive evacuation of people*. Proceedings of the First International Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft, The Netherlands. Springer Verlag. 21–23 March 2005.
- Veen A. van der Steenge A.E., Bockarjova M., Logtmeijer C.J.J., 2003. *Structural economic effects of large scale inundation: a simulation of the Krimpen dike breakage*. EUR Report 20997 EN. Office for Official Publications of the European Communities. Bruxelles: European Commission.
- Veen A., van der Logtmeijer C.J.J., 2005. *Economic hotspots: visualizing vulnerability to flooding*. Natural Hazards 36 (1–2), pp. 65–80.
- Wanielista M., 1978. *Stormwater management, Quantity and Quality*. Ann Arbor Science Publishers.
- White G.F., 1964. *Choice of Adjustment to Floods*. Research Paper No. 93, Department of Geography, University of Chicago.
- Wind H.G. et al., 1999. *Analyses of flood damages from 1993 and 1995 Meuse floods*. Water Resources Research 35, pp. 3459-3465.
- Wurbs R.A., 1983. *Economic feasibility of flood control improvements*. Journal of Water Resources Planning and Management, 109 (1), pp. 29 - 47.

## Ελληνική βιβλιογραφία

- Γιακουμάκης Σ., 2000. *Διευθετήσεις Υδατορευμάτων*. Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καζαντώνη Φ., 2004. *Κατασκευές από τοιχοποιία*. Σχεδιασμός και Επισκευές. Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Αθήνα, 2004
- Kraus K., 2003. *Φωτογραμμετρία*, Τόμος 1: Βασικές έννοιες και Μέθοδοι. Αθήνα 2003.
- Κουτσογιάννης Δ., 1997. *Στατιστική Υδρολογία*. Τομέας Υδατικών Πόρων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΚΥΑ, 2002. *Τιμολόγιο για εργασίες επισκευής βλαβών σε πλημμυρόπληκτα κτήρια, για τον υπολογισμό της δαπάνης και των αντίστοιχων παροχών στους πλημμυρόπληκτους των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων Αθηνών και Περιφέρειας της 8ης Ιουλίου 2002*. Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. ΥΠΕΧΩΔΕ.
- ΚΥΑ, 2006. *Οριοθέτηση περιοχών και πιστωτικές διευκολύνσεις για την αποκατάσταση των ζημιών από πλημμύρες της 23ης και 24ης Νοεμβρίου 2005 σε περιοχές της Νομαρχίας της Ανατολικής Αττικής*. Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. ΥΠΕΧΩΔΕ.
- ΚΥΑ, 2008. *Οριοθέτηση περιοχών και πιστωτικές διευκολύνσεις για την αποκατάσταση των ζημιών σε κτήρια από την πλημμύρα της 24ης Μαΐου 2007 σε περιοχές του Δήμου Αχαρνών του Νομού Αττικής*. Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Κωτούλας Δ., 1989. *Τα χαμηλά φράγματα*. Εκδόσεις Γεωτεχνικού Επιμελητηρίου. Θεσσαλονίκη.
- Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α., 2002. *Τεχνική Υδρολογία*. Έκδοση β', 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μουτάφης Ν.Ι., 2008. *Αστοχίες και Ατυχή Συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων*. Πρακτικά 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, Νοέμβριος 2008, Λάρισα, Ελλάδα.
- Μπεσσανσών Α., Παπαλεξοπούλου Β., 2004. *Αντιπλημμυρική προστασία του λεκανοπεδίου ρέματος Ερασίνου*. Ημερίδα ΤΕΕ «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής». Νοέμβριος 2004.
- Ναλμπάντης Ι., 2007. *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Πιστορία Αιμ. και Τσακίρης Γ., 2008. *Υποθετική θραύση φράγματος: Εκτίμηση απωλειών ζωής για την αποτίμηση της διακινδύνευσης πλημμύρας*. 1ο Ελληνικό Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων (CIGB-ICOLD), 13-15 Νοεμβρίου 2008, Λάρισα, Ελλάδα
- Στεφασδούρος Μ., 2003. *Υπερπήδηση Φράγματος επιτοάμιας Λιμνοδεξαμενής Μυλοπόταμου Νήσου Του*. Τεχνική Έκθεση
- Τερζίδης Γ., 1997. *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*. Θεσσαλονίκη 1997. Εκδόσεις Ζήτη.
- Τσακίρης Γ., 1995. *Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*. 675 σελίδες, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.
- Υδροεξυγιαντική ΕΕ – Γραφείο Μαχαίρα (Κ/Ξ Αττικά), 2002. *Απόψεις του Τ.Σ. για την βροχοπτώση και την πλημμύρα της 8/7/2002*. Τεχνικός Σύμβουλος Ολυμπιακών Έργων 2004 για το ΥΠΕΧΩΔΕ.

Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών, 2005. *Επικαιροποιημένο Πρόγραμμα Σταθερότητας και Ανάπτυξης 2005-2008*.

