



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

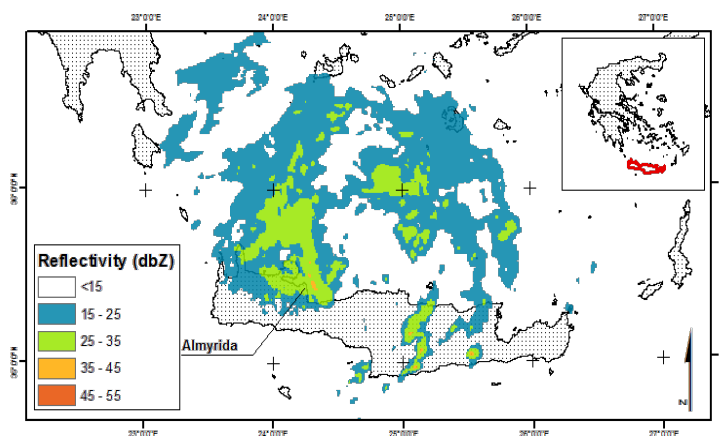
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Στοχαστική ανάλυση του πλημμυρικού γεγονότος της 17^{ης} Οκτωβρίου
2006 στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας.**



ΠΑΠΑΣΤΕΦΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΤΣΑΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Χανιά, Δεκέμβριος 2009

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων.....	iii
Λίστα Πινάκων	iv
Λίστα Διαγραμμάτων.....	v
Ευχαριστίες	vi
Περίληψη	vii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Ακραία καιρικά φαινόμενα	1
1.2. Τάσεις των πλημμυρών στην Ευρώπη	3
1.3. Σκοπός της εργασίας – Αντικείμενο της έρευνας	8
2. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	10
2.1. Ορισμός και βασικές έννοιες πλημμυρών.....	10
2.1.1. Ορισμός της πλημμύρας.....	11
2.1.2. Χαρακτηριστικά πλημμυρών	11
2.1.3. Κατηγοριοποίηση των πλημμυρών	12
2.1.4. Αίτια πλημμυρογένεσης.....	14
2.1.5. Επιπτώσεις των πλημμύρων.....	15
2.1.6. Τρόποι αντιμετώπισης των πλημμύρων	16
2.2. Αστραπιαίες Πλημμύρες (Flash floods).....	18
2.2.1. Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των αστραπιαίων πλημμύρων	18
2.2.2. Μέτρα για την αντιμετώπιση των αστραπιαίων πλημμυρών	20
3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ -ΜΟΝΤΕΛΟ MIKE SHE	22
3.1. Υδρολογικά μοντέλα	22
3.1.1. Ορισμός του υδρολογικού μοντέλου.....	22
3.1.2. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων	22

3.2. Μοντέλο MIKE SHE.....	25
3.2.1. Υδρολογική περιγραφή του μοντέλου	25
3.2.2. Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου	26
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΑΛΜΥΡΙΔΑΣ – ΠΛΗΜΜΥΡΑ 17ης ΟΚΤΩΜΒΡΙΟΥ 2006	39
4.1. Γεωγραφικά χαρακτηριστικά	39
4.2. Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.....	41
4.2.1. Υδρολογικά χαρακτηριστικά	41
4.2.2. Γεωλογικό υπόβαθρο	41
4.2.3. Κλίμα.....	42
4.2.4. Χρήσεις γης.....	42
4.3. Η πλημμύρα στις 17 Οκτωβρίου 2006	44
4.3.1. Γενικές πληροφορίες για την πλημμύρα	44
4.3.2. Προσδιορισμός της βροχόπτωσης	45
4.3.3. Μέθοδος Monte Carlo	50
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
5.1. Βαθμονόμηση μοντέλου.....	52
5.2. Αποτελέσματα μοντέλου	61
5.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων	64
5.4. Αποτελέσματα μεθόδου Monte Carlo	74
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	76
6.1. Συμπεράσματα.....	76
6.2. Προτάσεις.....	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη την περίοδο 1980 – 2007	2
Εικόνα 1.2: Εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη την περίοδο 1998 – 2008	4
Εικόνα 1.3: Φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη την περίοδο 1980 – 2007	5
Εικόνα 1.4: Οι ολικές ζημιές και λόγω αποζημιώσεων εξαιτίας των ακραίων καιρικών φαινομένων στην Ευρώπη την περίοδο 1980 -2007	6
Εικόνα 2.1: Εξέλιξη αστραπιαίας πλημμύρας αρχικά (αριστερά) και μετά από 15 λεπτά (δεξιά)	19
Εικόνα 3.1: Σχηματική περιγραφή των διεργασιών στο μοντέλο MIKE SHE	27
Εικόνα 3.2: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών	31
Εικόνα 3.3: Επιφανειακή ροή ανάμεσα στα όρια	32
Εικόνα 3.4: Ροή στην ακόρεστη ζώνη	34
Εικόνα 4.1: Τοποθεσία της λεκάνης της Αλμυρίδας	40
Εικόνα 4.2: Χρήσεις γης στην λεκάνη της Αλμυρίδας	43
Εικόνα 4.3: Τοποθεσία των βροχομετρικών σταθμών	45
Εικόνα 4.4: Εικόνα από το C – Band ραντάρ στις 11:45 πμ	47
Εικόνα 4.5: Εικόνα από το METEOSAT στην αρχή του φαινομένου	47
Εικόνα 4.6: Μέγιστη στάθμη νερού στη διατομή ελέγχου	48
Εικόνα 16: Μέγιστη στάθμη νερού.....	48
Εικόνα 5.1:: Περιοχή μελέτης στο μοντέλο MIKE SHE	52
Εικόνα 5.2: Τοπογραφία της λεκάνης της Αλμυρίδας.....	54
Εικόνα 5.3: Χρονοσειρά βροχής.....	54
Εικόνα 5.4: Χρήσεις γης για την λεκάνη της Αλμυρίδας	56
Εικόνα 5.5: Συντελεστής Manning για την λεκάνη της Αλμυρίδας	57
Εικόνα 5.6: Δίκτυο υδατορεμάτων για την λεκάνη της Αλμυρίδας	59
Εικόνα 5.7: Εισαγωγή δεδομένων για την διατομή ελέγχου	60
Εικόνα 5.8: Μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού στην διατομή ελέγχου.....	61
Εικόνα 5.9: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών του συντελεστή τραχύτητας Manning για την διατομή ελέγχου.	71

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συνοπτική περιγραφή του φαινομένου της πλημμύρας	12
Πίνακας 4.1: Γεωλογία της λεκάνης της Αλμυρίδας	41
Πίνακας 4.2: Χρήσεις γης της λεκάνης της Αλμυρίδας.....	42
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά παραγόμενης βροχής	49
Πίνακας 5.1: Παράμετροι προσομοίωσης	53
Πίνακας 5.2: Συντελεστής Manning	56
Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης της ακόρεστης ζώνης	57
Πίνακας 5.4: Πίνακας τιμών συντελεστών υδραυλικής διαπερατότητας	58
Πίνακας 5.5 Πίνακας τιμών συντελεστών υδραυλικής διαπερατότητας	64
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας	65
Πίνακας 5.7: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για διάφορες τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας	67
Πίνακας 5.8: Συντελεστής τραχύτητας Manning επιπέδων ροής για διάφορους τύπους επιφανειών	67
Πίνακας 5.9 Συντελεστές τραχύτητας Manning για τα τρία αρχεία Καννάβου	68
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη	68
Πίνακας 5.11: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα τρία αρχεία του συντελεστή τραχύτητας Manning	70
Πίνακας 5.12: Συντελεστές τραχύτητας Manning για το υδατόρεμα	71
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρεμα	71
Πίνακας 5.14: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρεμα	73

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Ωριαία βροχόπτωση από το σταθμό στη Σούδα στις 17 Οκτωβρίου 2006	46
Διάγραμμα 4.2: Τεχνητή χρονοσειρά βροχόπτωσης που δημιουργήθηκε για την πλημμύρα τις 17ης Οκτώβριου 2006	49
Διάγραμμα 4.3: Σύνολο παραγόμενων βροχοπτώσεων με την μέθοδο Monde Carlo	51
Διάγραμμα 5.1: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου	62
Διάγραμμα 5.2: Παροχή νερού στην διατομή ελέγχου	62
Διάγραμμα 5.3: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας	65
Διάγραμμα 5.4: Παροχή του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας	66
Διάγραμμα 5.5: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη	69
Διάγραμμα 5.6:: Παροχή νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη	69
Διάγραμμα 5.7:: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα	72
Διάγραμμα 5.8: Παροχή στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα	72
Διάγραμμα 5.9: Διακύμανση της στάθμης του νερού στη διατομή ελέγχου για το σύνολο των βροχοπτώσεων	74
Διάγραμμα 5.10: Διακύμανση της παροχής του νερού στη διατομή ελέγχου για το σύνολο των βροχοπτώσεων	75

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Πρώτα απ' όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Τσάνη, που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και μου παρείχε κάθε απαραίτητη υποδομή αλλά και πολύτιμη βοήθεια κατά τη διάρκεια υλοποίησης της παρούσας διατριβής.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον υποψήφιο Διδάκτωρ στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, Ιωάννη Δαλιακόπουλο, για την πολύτιμη αρωγή του σε όλα τα επίπεδα και καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής μέχρι την ολοκλήρωση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλο το ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την άριστη συνύπαρξη μας στο εργαστήριο. Ειδικότερα, ευχαριστώ, τους Κουτρούλη Αριστείδη, Γρυλλάκη Μανώλη και Τσιτσιλώνη Σωτήρη για τη συνεχή τους βοήθεια και συνεργασία κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Περίληψη

Οι πλημμύρες είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά φυσικά φαινόμενα που απασχολούν και προβληματίζουν τον άνθρωπο από χιλιετίες στο παρελθόν, και συνεχίζουν μέχρι σήμερα. Έχουν γίνει πολλές μελέτες και έρευνες για τον καθορισμό του φαινομένου, των παραμέτρων που το προκαλούν, των συνεπειών που έχει τόσο στους ανθρώπους όσο και στις ιδιοκτησίες τους και, τέλος, των τρόπων με τους οποίους μπορούν να αντιμετωπιστούν και να προληφθούν, αν είναι αυτό δυνατό. Παρά τη σημαντική πρόοδο σ' αυτόν τον τομέα το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί, και αυτό όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά σε παγκόσμια κλίμακα.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκε το πλημμυρικό γεγονός της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006 που συνέβη στην περιοχή της Αλμυρίδας. Αρχικά έγινε προσδιορισμός της βροχής που προκάλεσε το πλημμυρικό γεγονός με την βοήθεια εικόνων από το METEOSAT και του C – Band ραντάρ που βρίσκεται στη Σούδα καθώς και φωτογραφιών της περιοχής μελέτης κατά την διάρκεια και μετά το τέλος της πλημμύρας. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα των γειτονικών σταθμών της Σούδας και στις Καλύβες. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μέχρι τον τελικό προσδιορισμό της βροχής έγιναν με το καταναεμημένο φυσικής βάσης υδρολογικό/ υδραυλικό μοντέλο MIKE SHE/MIKE 11. Στο τέλος έγινε μία ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου και προσδιορίστηκε το εύρος των τιμών που αντιστοιχεί στις τιμές της μέγιστης στάθμης του νερού στην διατομή ελέγχου και της παροχής αιχμής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.Ακραία καιρικά φαινόμενα

Καύσωνες, πλημμύρες και εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων δεν θα είναι η εξαίρεση αλλά ο κανόνας τις επόμενες δεκαετίες. Επιδείνωση των προβλημάτων εξαιτίας των κλιματικών αλλαγών επισημαίνουν οι επιστήμονες που τονίζουν ότι εκτός από τα μέτρα για τον περιορισμό του φαινομένου, πρέπει οι κοινωνίες να προετοιμαστούν για την αντιμετώπιση των σοβαρών κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων. Το χειρότερο συμπέρασμα είναι ότι όσο οι συνθήκες θα αλλάζουν η ικανότητα των φυτών να απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα θα μειώνεται, με αποτέλεσμα την επιδείνωση της κατάστασης ακόμα και αν προχωρήσουμε σε δραστικό περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Τα παραπάνω αποτελούν βασικά συμπεράσματα των επιστημόνων που αναφέρθηκαν κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας του τριήμερου συνεδρίου που διοργανώνει το Εθνικό Κέντρο Δημόσιας Διοίκησης και Αυτοδιοίκησης (ΕΚΔΔΑ) σε συνεργασία με την Έδρα της UNESCO Φυσικών Καταστροφών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Αύξηση της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων καιρικών επεισοδίων και συνέχιση του φαινομένου της λειψυδρίας που πλήττει την Ανατολική Μεσόγειο επισήμανε ο ακαδημαϊκός καθηγητής της έδρας της UNESCO του Εθνικού Αστεροσκοπείου κ. Χ. Ζερεφός «Διανύουμε σοβαρή περίοδο λειψυδρίας που θα συνεχιστεί για τα επόμενα πενήντα χρόνια». (Καθημερινή, 2007)

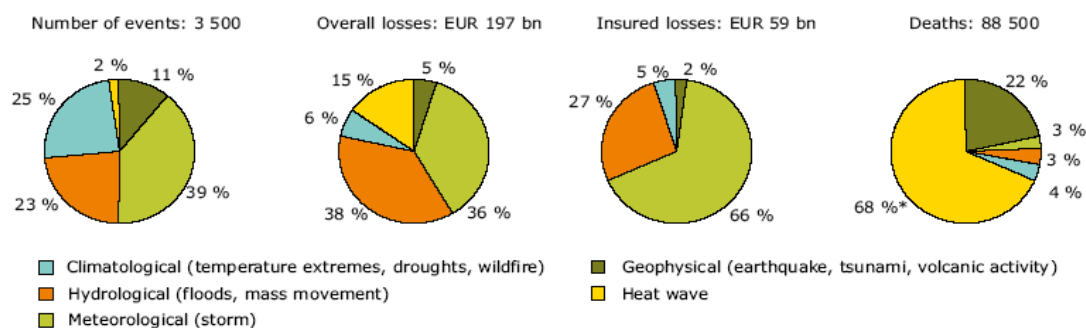
Ένα καιρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως ακραίο είτε από την ένταση του, είτε από την διάρκεια του ή και από την συχνότητα επανεμφάνισης του. Η σχέση ένταση - διάρκεια - συχνότητα χαρακτηρίζουν ένα εκδηλωθέν ακραίο καιρικό φαινόμενο το οποίο είναι δυνατό με την σειρά του να προκάλεσε μια εκτεταμένη φυσική καταστροφή. Γενικά μεγάλης κλίμακας ακραία καιρικά φαινόμενα δεν λαμβάνουν χώρα τόσο συχνά ώστε να θεωρούνται ως τα σημαντικότερα, ενώ τα ακραία καιρικά φαινόμενα μικρής κλίμακας είναι συχνότερα, προκαλώντας καταστροφές σε μικρές περιοχές του πλανήτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Οι συνέπειες ενός ακραίου καιρικού φαινομένου υπολογίζονται από την σχέση της έντασης του συγκεκριμένου φαινομένου με τη συχνότητα επανεμφάνισης του στην ίδια περιοχή.

Αντικειμενικά είναι πολύ δύσκολο να ορισθεί μία τιμή μεγέθους πάνω από την οποία ένα καιρικό φαινόμενο θα μπορεί να χαρακτηρίζεται ως ακραίο και αυτό γιατί στο χαρακτηρισμό ενός φαινομένου ως ακραίο συνηγορούν πολύ παράγοντες. Σε πολλές περιπτώσεις ο χαρακτηρισμός ενός καιρικού φαινομένου ως ακραίου είναι αποτέλεσμα των καταστροφών ή ακόμη και των θανάτων που προκάλεσε σε μία περιοχή. (<http://www.teicrete.gr/diatmim/notes/Akraia>)

Στην Ευρώπη, το 64 % όλων των καταστρεπτικών γεγονότων από το 1980 είναι άμεσα συνδεδεμένο με καιρικά και κλιματικά γεγονότα (θύελλες, πλημμύρες και κύματα καύσωνα). Το 25 % αποτελούν οι πυρκαγιές, οι κατολισθήσεις και οι χιονοστιβάδες οι οποίες και αυτές με την σειρά τους συνδέονται με τον καιρό και το κλίμα. Επίσης το 95 % των ολικών ζημιών και το 78 % όλων των θανάτων λόγω καταστρεπτικών γεγονότων οφείλονται σε καιρικά και κλιματικά φαινόμενα (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.1: Φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη την περίοδο 1980 – 2007 (Πηγή: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment)

1.2. Τάσεις των πλημμυρών στην Ευρώπη

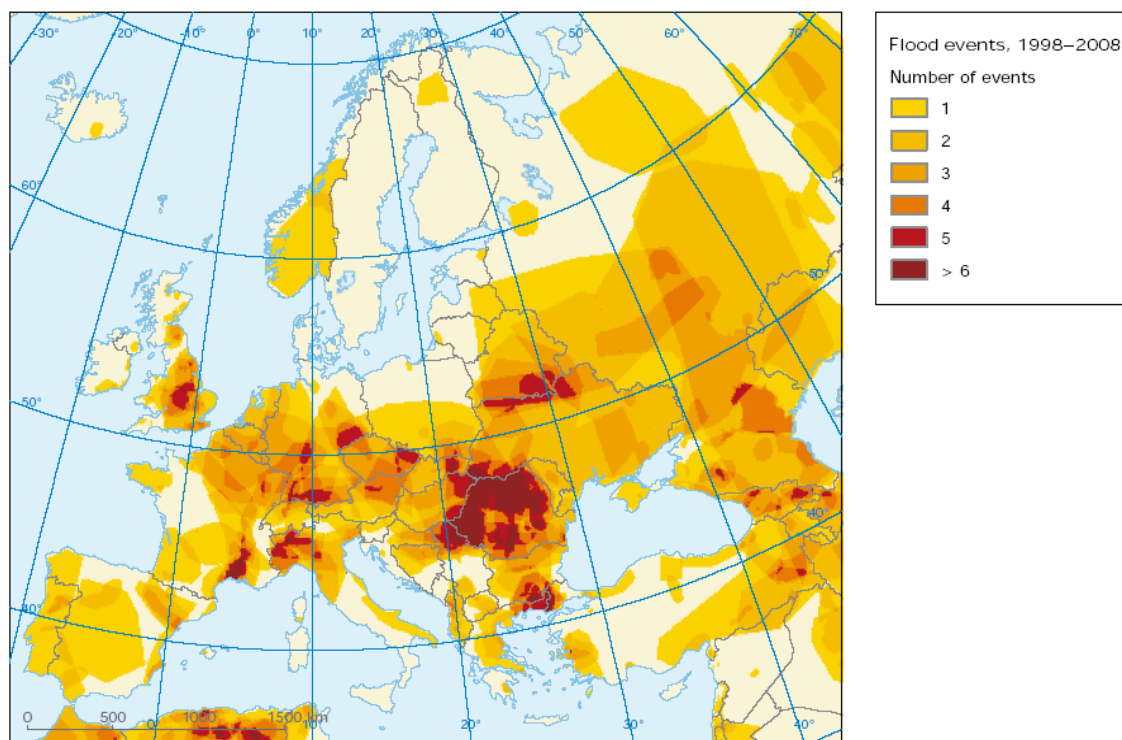
Οι πλημμύρες διαφέρουν ως προς τη συχνότητα, τον τόπο και την ένταση ως αποτέλεσμα των εποχικών και περιφερειακών διακυμάνσεων των βροχοπτώσεων και άλλων καιρικών συνθηκών, καθώς και πιο μακροπρόθεσμων μεταβολών του κλίματος. Η ανθρώπινη δραστηριότητα διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Η αποδάσωση στις ορεινές περιοχές επιταχύνει την απορροή, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την πιθανότητα πλημμυρών. Η αστική ανάπτυξη σε παλιές περιοχές υπερχείλισης ποταμών ενδέχεται να αυξήσει το εύρος των αρνητικών επιπτώσεων από τα φαινόμενα υπερχείλισης στην περιοχή καθαυτή, καθώς και να ενισχύσει την πιθανότητα πλημμυρών κατάντη αυτής, λόγω της «ευθυγραμμισμένης διευθέτησης» των ποταμών.

Από το 1990 έχουν καταγραφεί 259 πλημμύρες ποταμών στην Ευρώπη από τις οποίες οι 165 έχουν καταγραφεί από το 2000 και μετά. Η αύξηση αυτή κατά την διάρκεια των πρόσφατων δεκαετιών οφείλεται στη καλύτερη καταγραφή των πλημμυρικών γεγονότων καθώς και στις αλλαγές στις χρήσεις γης.

Ωστόσο, λόγω της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας εκτιμάται ότι θα επηρεαστεί ο υδρολογικός κύκλος και θα αυξηθεί η εμφάνιση και η συχνότητα των πλημμυρικών γεγονότων σε μεγάλα τμήματα της Ευρώπης. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι στον προσδιορισμό των αλλαγών στην συχνότητα και στο μέγεθος των πλημμυρών υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις η αύξηση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται λιγότερη ποσότητα χιονιού κατά την διάρκεια του χειμώνα. Αυτό με την σειρά του θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο κίνδυνο εμφάνισης πλημμυρών κατά την διάρκεια της άνοιξης. (Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

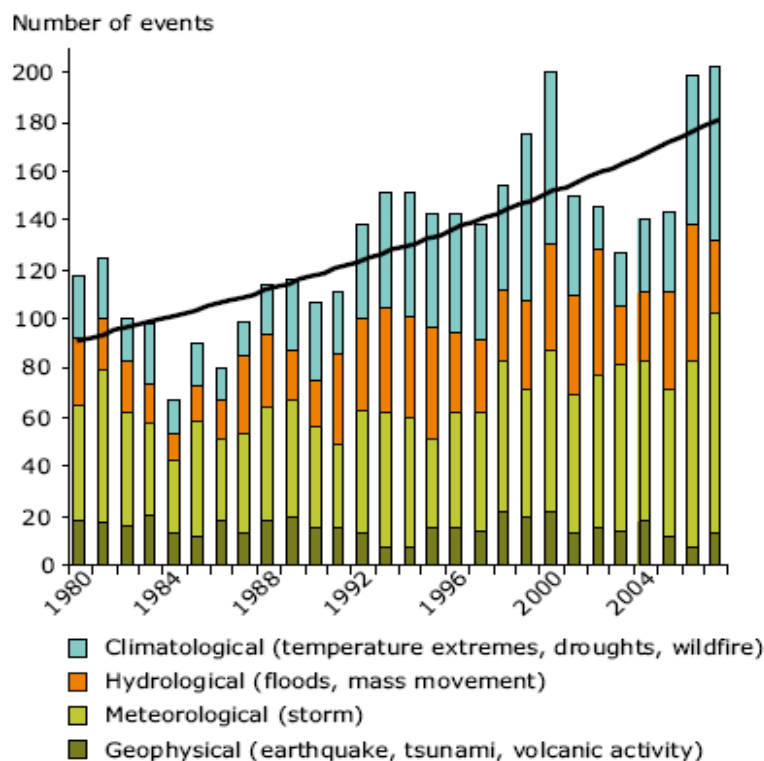


Εικόνα 1.2: Εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη την περίοδο 1998 – 2008 (Πηγή: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment)

Οι αλλαγές στην συχνότητα, την ένταση των πλημμυρών και των υψηλών θερμοκρασιών επηρεάζουν αρνητικά τον οικονομικό τομέα. Ο ετήσιος μέσος όρος των καιρικών καταστροφών στην Ευρώπη αυξήθηκε κατά 65 % την περίοδο 1998 – 2007 σε σύγκριση με τον ετήσιο μέσο όρο του 1980. Αντίθετα την συγκεκριμένη περίοδο ο αριθμός των μη – καιρικών φαινομένων (π.χ. σεισμοί) παρέμεινε σταθερός. Ένα ποσοστό αυτής της αύξησης οφείλεται στην κλιματική αλλαγή.

Οι ολικές ζημιές εξαιτίας των καιρικών φαινομένων έχουν αυξηθεί σημαντικά κατά την διάρκεια τω τελευταίων 25 χρόνων. Σύμφωνα με μία πρόσφατη έρευνα της United Nation Environment Programme's Finance Initiative (UNEP FI, 2006) οι ζημιές από τα ακραία καιρικά φαινόμενα διπλασιάζεται παγκόσμια κάθε 12 χρόνια.

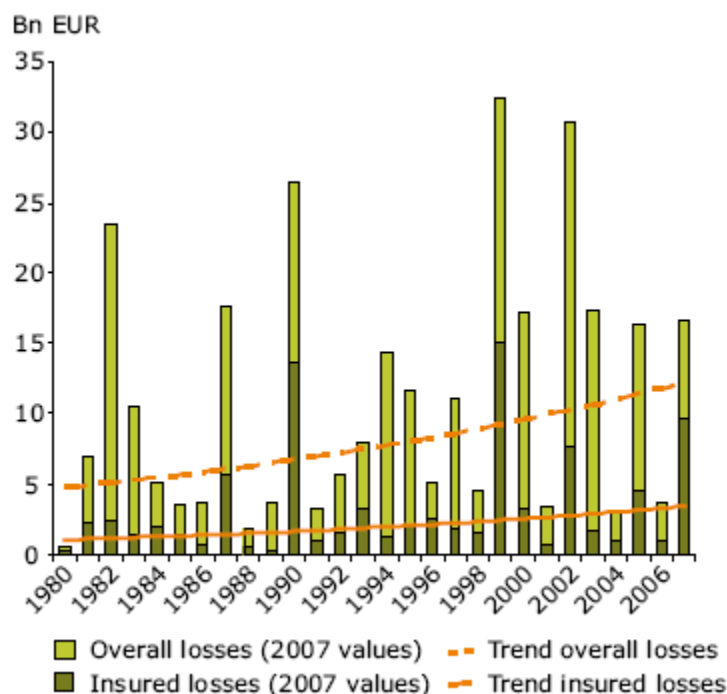
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



Εικόνα 1.3: Φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη την περίοδο 1980 – 2007 (Πηγή: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment)

Ιδιαίτερα τα ακραία καιρικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια συμπεριλαμβάνουν την καταστροφική πλημμύρα που συνέβη στην Κεντρική Ευρώπη τον Αύγουστο του 2002 και το κύμα καύσωνα το 2003. Η πλημμύρα του 2002 που πραγματοποιήθηκε στην Αυστρία, στην Τσέχικη Δημοκρατία, στην Γερμανία, στην Σλοβακία και στην Ουγγαρία προκάλεσε ολικές ζημιές της τάξεως των 16.8 δις. Euro. Επίσης οι ζημιές λόγω αποξημιώσεων ήταν της τάξης των 3.4 δις. Euro. Το κύμα καύσωνα το 2003 είχε ως αποτέλεσμα να προκληθούν πολύ θάνατοι πάνω από τα κανονικά επίπεδα στην Βόρειο – Δυτική Ευρώπη. Εκτός όμως από τους θανάτους το κύμα καύσωνα προκάλεσε σημαντικές ζημιές στον τομέα της ενέργειας και της γεωργίας. Για παράδειγμα στην Γαλλία οι ολικές ζημιές στην παραγωγή ενέργειας, στον τομέα των μεταφορών καθώς και στην παραγωγή κρασιού υπολογίστηκε ότι έφτασε το 0.1/0.2 % του GDP, που ισοδυναμεί με 15 – 30 δις. Euro.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



Εικόνα 1.4: Οι ολικές ζημιές και λόγω αποζημιώσεων εξαιτίας των ακραίων καιρικών φαινομένων στην Ευρώπη την περίοδο 1980 -2007 (Πηγή: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment)

Οι πλημμύρες είναι ο συνηθέστερος τύπος φυσικών καταστροφών στην Ευρώπη. Σύμφωνα με τη διεθνή βάση δεδομένων για τις καταστροφές EM – DAT, οι πλημμύρες αποτελούν το 43 % του συνόλου των καταστροφικών γεγονότων για την περίοδο 1998 – 2002. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η Ευρώπη υπέστη περίπου 100 καταστροφικές πλημμύρες που προκάλεσαν περίπου 700 θανάτους, τη μετατόπιση περίπου μισού εκατομμυρίου ατόμων και τουλάχιστον 25 δισ. EUR ασφαλισμένων οικονομικών απωλειών. Οι πλημμύρες κάλυψαν περίπου ένα εκατ. τετραγωνικά χιλιόμετρα (οι περιοχές στις οποίες σημειώθηκαν επαναλαμβανόμενες πλημμύρες τη συγκεκριμένη περίοδο υπολογίστηκαν πάνω από μία φορά). Περίπου 1,5 % του πληθυσμού της Ευρώπης επλήγη.

Από τον Ιανουάριο έως τον Δεκέμβριο 2002, σημειώθηκαν 15 μεγάλες πλημμύρες στην Ευρώπη, σε χώρες όπως η Αυστρία, η Τσεχική Δημοκρατία, η Γερμανία, η Ουγγαρία και η Ρωσική Ομοσπονδία. Οι πλημμύρες αυτές επέφεραν το

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

θάνατο σε περίπου 250 ανθρώπους και είχαν δυσμενείς συνέπειες για άλλο ένα εκατομμύριο.

1.3.Σκοπός της εργασίας – Αντικείμενο της έρευνας

Στις 17 Οκτωβρίου 2006 μία ξαφνική και πολύ έντονη βροχή έπληξε την περιοχή της Αλμυρίδας. Αποτέλεσμα αυτής της βροχής ήταν να πλημμυρήσει η περιοχή της Αλμυρίδας και να προκληθούν πολλές υλικές ζημιές. Το συνολικό κόστος των ζημιών ανέρχεται περίπου στο 1 εκ. Ευρώ. Εκτός όμως από τις υλικές ζημιές που προκλήθηκαν η πλημμύρα προκάλεσε και το θάνατο ενός μόνιμου κατοίκου του Γαβαλοχωρίου, περιοχής που βρίσκεται κοντά στον οικισμό της Αλμυρίδας.

Το βασικό θέμα που διαπραγματεύεται η εργασία είναι ο προσδιορισμός της βροχής που προκάλεσε την πλημμύρα στην περιοχή της Αλμυρίδας. Για τον προσδιορισμό της βροχής χρειάστηκε η επεξεργασία πολλών δεδομένων μαζί. Ένα από αυτά τα δεδομένα ήταν οι εικόνες από το METEOSAT και του C – Band ραντάρ που βρίσκεται στη Σούδα. Οι εικόνες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό της χρονικής στιγμής που εμφανίστηκε η μέγιστη τιμή της βροχής. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η ωριαία βροχόπτωση που κατέγραψε ο σταθμός στη Σούδα για την κατανόηση της κατανομής της βροχής καθώς και η ημερήσια μέτρηση του σταθμού στις Καλύβες για τον προσδιορισμό της συνολικής βροχής. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες της περιοχής μελέτης κατά την διάρκεια και μετά το τέλος του πλημμυρικού γεγονότος για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής της στάθμης του νερού. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μέχρι τον τελικό προσδιορισμό της βροχής έγιναν με το κατανεμημένο φυσικής βάσης υδρολογικό/ υδραυλικό μοντέλο MIKE SHE/MIKE 11. Τα κεφάλαια της εργασίας παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι κλιματικές αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα στην Ευρώπη καθώς επίσης και διάφορα ακραία καιρικά φαινόμενα. Τέλος περιγράφηκε ο σκοπός και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.
- Στο 2^ο κεφάλαιο αρχικά δίνεται ο ορισμός της πλημμύρας και οι κατηγορίες των πλημμυρών. Στην συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες δημιουργίας διαφόρων ειδών πλημμύρα και οι επιπτώσεις τους. Το κεφάλαιο τελειώνει με μία εκτενής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ανάλυση για τις αστραπιαίες πλημμύρες (flash floods) και στους τρόπους αντιμετώπισής τους.

- Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι κατηγορίες των υδρολογικών μοντέλων καθώς επίσης και μία λεπτομερής περιγραφή του υδρολογικού/ υδραυλικού μοντέλου MIKE SHE/ MIKE 11.
- Στο 4^ο κεφάλαιο δίνονται γενικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης και τα κύρια χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής όπως γεωλογία και χρήσεις γης. Τέλος παρουσιάζεται το πλημμυρικό γεγονός της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006.
- Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται η βαθμονόμηση του μοντέλου, επιλέγονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της λεκάνης και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν το ύψος της πλημμυρικής στάθμης καθώς και το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης τιμής της. Τέλος προσομοιώνονται ένας αριθμός βροχών για τον προσδιορισμό της εκείνης της βροχής που μας δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα.
- Στο 6^ο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της μελέτης και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα των πλημμυρικών γεγονότων.

2. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

2.1.Ορισμός και βασικές έννοιες πλημμυρών

Οι πλημμύρες θεωρούνται από τους πλέον συχνούς και ευρέως διαδεδομένους φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως. Ο κίνδυνος πλημμύρας είναι η πιθανότητα να λάβει χώρα ένα πλημμυρικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει απώλειες ζωής ή τραυματισμούς, ζημιές σε περιουσίες, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις ή περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Οι πλημμύρες και οι ζημιές που προξενούν αποτελούν ένα παγκόσμιο φαινόμενο και συμβαίνουν με διάφορες συχνότητες σε πολλές περιοχές της γης. Στην Ελλάδα παρόλο που το νερό είναι αγαθό σε ανεπάρκεια, για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών αυτού, μεγάλα προβλήματα δημιουργούνται επίσης από την αιφνίδια απορροή υδάτινων μαζών, υπό μορφή πλημμύρας, έπειτα από κάποια καταιγίδα. Παραδείγματα έντονων πλημμυρικών γεγονότων υπάρχουν πολλά και για διάφορες περιοχές του ελλαδικού χώρου. Οι πλημμύρες δεν είναι γνώρισμα των περιοχών που δέχονται υψηλές τιμές ετήσιων κατακρημνισμάτων. Έντονα πλημμυρικά φαινόμενα παρατηρούνται επίσης σε περιοχές που με βάση το παραπάνω κλιματικό χαρακτηριστικό κατατάσσονται στις ξηρές περιοχές. Σε πολλές περιπτώσεις, οι βροχοπτώσεις από τις οποίες δημιουργούνται οι πλημμύρες αυτές έχουν τέτοια ένταση και διάρκεια που δύσκολα δικαιολογούν το μέγεθος των καταστροφών που προξενούν. Παρά την τεχνολογική και επιστημονική ανάπτυξη, οι δυσμενείς επιπτώσεις των πλημμυρών είναι μεγαλύτερης έκτασης από εκείνες που προξενούνταν από ίσης έντασης βροχοπτώσεις στο παρελθόν.

Στις μέρες μας, η επέμβαση του ανθρώπου τόσο στα χειμαρρώδη ρεύματα όσο και στο ευρύτερο περιβάλλον τους είναι μεγάλη με αποτέλεσμα τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα να αποδίδονται στο γεγονός αυτό. Ακόμη και σχετικά βροχοπτώσεις μικρού ύψους, όταν εκδηλώνονται σε περιοχές με έντονα διαταραγμένες λεκάνες απορροής και κοίτες, μπορεί να αποβούν καταστροφικές. Οι ζημιές που προκαλούνται από τις πλημμύρες είναι θεαματικές και εκτιμώνται άμεσα, για το λόγο αυτό τους δίνεται σημαντική δημοσιότητα. Συνήθη μέτρα μετά την εκδήλωση πλημμύρας σε κάποια

περιοχή αποτελούν η απομάκρυνση των φερτών υλικών από τις κοίτες και αποζημιώσεις των πληγέντων. Τα μέτρα αυτά ανακουφίζουν τους πληγέντες δεν λύνουν όμως το πρόβλημα.

2.1.1. Ορισμός της πλημμύρας

Πλημμύρα ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία περιοχές, που συνήθως είναι στεγνές, καλύπτονται από ποσότητες νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι πλημμυρικοί όγκοι νερού προέρχονται από την τοπική βροχόπτωση, την υπερχειλίση ποταμού, την εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές ή από τη θραύση φράγματος (Μαμάσης, 2007).

Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα (αφού συνήθως προέρχονται από μετεωρολογικές καταστάσεις), όμως συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης (φυσικού ή ανθρωπογενούς), δεν μπορεί να διοχετεύσει τον όγκο του νερού που παράγεται από την βροχόπτωση. Τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν πλημμύρες δεν μπορούν να ελεγχθούν, αλλά οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής είναι δυνατόν να τροποποιηθούν με την ανθρώπινη επέμβαση (Μαμάσης, 2007).

2.1.2. Χαρακτηριστικά πλημμυρών

Η πλημμύρα ορίζεται εύκολα ποσοτικά με βάση κάποιο όριο παροχής ή στάθμης, η υπέρβαση του οποίου συνιστά “πλημμύρα” αν αναφερόμαστε σε υδατόρρευμα. Μια τέτοια παροχή μπορεί να είναι αυτή που προκαλεί υπερχειλίση της «βαθιάς κοίτης» του υδατορρέυματος ή η παροχή που προκαλεί ανεπιθύμητη κατάκλιση κάποιας περιοχής κοντά στο υδατόρρευμα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία σύντομη περιγραφή του φαινομένου της πλημμύρας (Βαφειάδης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κύριο χαρακτηριστικό	Υπερβολική ποσότητα νερού
Γενικός χαρακτήρας	Βίαιο φαινόμενο σχετικά μικρής διάρκειας
Έκταση επιρροής	Μπορεί να είναι εξαιρετικά τοπικό, σπάνια αφορά μεγαλύτερες περιοχές
Κύρια παράμετρος που το χαρακτηρίζει	Κύρια παράμετρος η παροχή ή ο όγκος του νερού
Αντιμετώπιση	Μπορεί να αντιμετωπισθεί με κατάλληλα τεχνικά έργα και διοικητικά μέτρα στα όρια των περιοχών μελέτης, πριν την εμφάνιση του
Επιστημονική ανάλυση και μελέτη	Απαιτεί στατιστική ανάλυση των δεδομένων, υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα προσομοιώσεως. Σε ειδικές περιπτώσεις γίνεται μελέτη και σε φυσικά ομοιώματα υπό κλίμακα.

Πίνακας 2.1: Συνοπτική περιγραφή του φαινομένου της πλημμύρας (Πηγή: Βαφειάδης)

2.1.3. Κατηγοριοποίηση των πλημμυρών

Υπάρχουν πολλές κατηγοριοποιήσεις και διευκρινιστικά σχήματα για τις πλημμύρες στην βιβλιογραφία. Η πρώτη κύρια διαφορά μεταξύ των διαφόρων τύπων πλημμυρών βασίζεται στο πλάτος της πλημμύρας και στην διάρκεια του γεγονότος της βροχής. Αυτά τα δύο στοιχεία προσδιορίζουν την χωρική και την χρονική κλίμακα ενός γεγονότος βροχής. Έτσι, με βάση αυτά τα δύο στοιχεία προκύπτουν δύο κύριες κατηγορίες: οι εκτενείς μεγάλης διάρκειας πλημμύρες (extensive long lasting floods) και οι τοπικές ξαφνικές πλημμύρες (local sudden floods). Παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλες κατηγορίες πλημμυρών (Bronstert, 2003).

Οι πλημμύρες είναι συνήθως ταξινομημένες σε τρεις κύριες κατηγορίες: πλημμύρα ποταμών (river flood), αστραπιαία πλημμύρα (flash flood) και κύμα θύελλας (storm surge) (Perry, 2000; Berz et al., 2001; Kron, 2002; Jonkman, 2005). Εντούτοις άλλοι λιγότερο κοινοί τύποι πλημμυρών είναι:

- Πλημμύρες λόγω ice-jams (ice – jam floods). Τα ice jams προκύπτουν από τη συσσώρευση των τεμαχίων πάγου με αποτέλεσμα να περιορίζουν τη ροή του ύδατος και να ενεργούν ως προσωρινά φράγματα.
- Πλημμύρες λόγω αστοχίας φραγμάτων (dam-and levee-failure floods)

- Πλημμύρες λάσπης, μπαζών (debris, landslide, and mudflow floods)

2.1.3.1. Πλημμύρες ποταμών (River floods)

Οι πλημμύρες ποταμών (River floods) είναι το αποτέλεσμα της έντονης ή/και επίμονης βροχής για αρκετές ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες για μεγάλες περιοχές. Οι πλημμύρες ποταμών είναι συνήθως αποτέλεσμα ενός συνδυασμού διάφορων παραγόντων σε μια δεδομένη περιοχή δηλ. καιρός και εδαφολογικές συνθήκες, χρήσεις γης, κ.λπ. Στην Ευρώπη, αυτός ο τύπος πλημμύρας μπορεί να σχετίζεται και με την εποχή.

Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι πλημμύρες ποταμών προκαλούνται συνήθως από τις τοπικά υψηλές ποσότητες βροχής. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του τύπου πλημμύρας είναι ότι το έδαφος γίνεται κορεσμένο, με αποτέλεσμα να υπερβαίνεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και να παράγεται αυξημένη επιφανειακή απορροή.

Οι πλημμύρες ποταμών το χειμώνα και την άνοιξη προκαλούνται από τις μεγάλης κλίμακας βροχοπτώσεις και μπορούν να συνοδευτούν με την τήξη του χιονιού και του πάγου. Σε αυτήν την περίπτωση, στον κορεσμό του εδάφους μπορεί να συμβάλει και το παγωμένο έδαφος που εμποδίζει την διήθηση του νερού στο έδαφος με αποτέλεσμα την δημιουργία αυξημένης επιφανειακής απορροής. (Jose I. Barredo, 2007)

2.1.3.2. Αστραπιαίες πλημμύρες (Flash floods)

Οι αστραπιαίες πλημμύρες (Flash floods) είναι κυρίως τοπικά γεγονότα και διασκορπισμένα στο χρόνο και σε έκταση (Kron, 2002). Είναι αποτέλεσμα έντονης βροχόπτωσης σε μία μικρή έκταση για μικρό χρονικό διάστημα, συνήθως μικρότερο από 6 ώρες. Το κύριο χαρακτηριστικό των αστραπιαίων πλημμύρων είναι το ξαφνικό ξεκίνημά τους. Ανάμεσα στους παράγοντες που συντελούν σε αυτό το τύπο πλημμύρας είναι η έντονη βροχόπτωση, η διάρκεια της βροχόπτωσης, η εδαφικές συνθήκες, η

τοπογραφία και η κλίση του εδάφους στην λεκάνη απορροής (Perry, 2000). Οι αστραπιαίες πλημμύρες συνήθως συμβαίνουν σε βουνά ή σε λοφώδεις περιοχές. Παρόλα αυτά μπορούν να συμβούν και σε πολύ πεδινές περιοχές, όπου οι μικρές κλίσεις του εδάφους δεν επιτρέπουν την άμεση απορροή του νερού αλλά την συγκέντρωσή του σε επίπεδες περιοχές όπως είναι οι υπόγειες διαβάσεις πεζών και τα υπόγεια σπιτιών (Kron, 2002).

2.1.3.3. Πλημμύρα "κύματος θύελλας" (Storm surge floods)

Οι πλημμύρες "κύματος θύελλας" (Storm surge floods) είναι σπάνια γεγονότα που προκαλούν όμως μεγάλες απώλειες ζωής και περιουσιών. Αυτός ο τύπος πλημμύρας προκαλείται από ύδατα που ωθούνται σε ξηρές περιοχές από παράκτιους ανέμους και θύελλες (Perry, 2000). Μπορεί να συμβεί στις ακτές των θαλασσών και σε μεγάλες λίμνες. Παρόλα αυτά τα ανεπτυγμένα παράκτια αμυντικά έργα έχουν αποτρέψει σημαντικές απώλειες στην Ευρώπη. (Jose I. Barredo, 2007)

2.1.4. Αίτια πλημμυρογένεσης

Τα αίτια που προκαλούν τις πλημμύρες μπορεί να είναι φυσικά ή να οφείλονται σε ανθρωπογενούς παράγοντες.

α) Φυσικά αίτια πλημμυρογένεσης

Ο τρόπος και η διαδικασία συγκέντρωσης και κίνησης του νερού σε μία υδρολογική λεκάνη ή μια ευρύτερη περιοχή, καθορίζεται από τους τέσσερις φυσικούς παράγοντες πλημμυρογένεσης. Αυτοί είναι:

- 1) η τοπογραφία
- 2) η γεωλογική συγκρότηση
- 3) το κλίμα
- 4) η βλάστηση.

Η τοπογραφία και η γεωλογική συγκρότηση μιας περιοχής καθορίζουν την υδρολογική συμπεριφορά και κατά συνέπεια την απορροή και την παραγωγή των φερτών υλικών. Το κλίμα είναι ο παράγοντας που καθορίζει τη συχνότητα, τη διάρκεια αλλά και την ένταση των βροχοπτώσεων. Τέλος η βλάστηση, ασκεί σημαντική επίδραση τόσο στη διάβρωση όσο και στην απορροή.

β) Ανθρωπογενείς παράγοντες πλημμυρογένεσης

Εκτός από τους αναφερθέντες φυσικούς παράγοντες πλημμυρογένεσης υπάρχουν επίσης ανθρωπογενείς παράγοντες, οι οποίοι θεωρούνται υπεύθυνοι για την πρόκληση σοβαρών πλημμυρών σε διάφορες περιοχές. Αυτοί είναι:

- 1) Η καταστροφή των δασών, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του εδάφους και την αύξηση των απορροών.
- 2) Η εξαφάνιση του υδρογραφικού δικτύου μέσα σε μικρά και μεγάλα αστικά κέντρα οδηγεί σε μεγάλες καταστροφές και απώλειες ανθρώπινων ζώων.
- 3) Διακοπές στην ελεύθερη ροή του νερού εξαιτίας κατασκευής στενών γεφυρών, όπως και η ρίψη υλικών στις κοίτες των ρευμάτων (Βαφειάδης).

2.1.5. Επιπτώσεις των πλημμύρων

Παρά το γεγονός ότι η πλημμυρική επικινδυνότητα έχει γενικά αντιμετωπιστεί και μειωθεί στις πεδινές εκτάσεις, εντούτοις αυτή έχει αυξηθεί ιδιαίτερα εντός των ορίων των οικιστικών περιοχών ή πολύ κοντά σε αυτά. Οι επιπτώσεις των πλημμύρων διαχωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες.

Οι άμεσες πιθανές συνέπειες προκαλούνται από το ίδιο το πλημμυρικό γεγονός και βάση της σοβαρότητάς τους κατατάσσονται ιεραρχικά ως ακολούθως:

- Θάνατοι, τραυματισμοί και εγκλωβισμοί πολιτών, στους πλημμυρισμένους εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- Καταστροφές στα σπίτια, κτίρια, μέσα μεταφοράς, γέφυρες, οδικό δίκτυο και συστήματα επικοινωνίας, οι οποίες προκαλούνται από την αυξημένη ταχύτητα των υδάτων και των ιζημάτων που αυτά μεταφέρουν.
- Διάβρωση και απόθεση των ιζημάτων στις αγροτικές και αστικές περιοχές αντίστοιχα, με συνέπεια την απώλεια σημαντικού τμήματος του εδαφικού μανδύα και της υπερκείμενης βλάστησης.

Όσον αφορά στις έμμεσες συνέπειες των πλημμύρων οι οποίες εμφανίζονται αμέσως μετά την εξασθένηση του πλημμυρικού γεγονότος, αυτές διακρίνονται σε:

- Μολύνσεις των ποταμών και ρεμάτων, οι οποίες κατά κύριο λόγο είναι μικρής διάρκειας και προκαλούνται από την παράσυρση νεκρών ζώων, την είσοδο απορριμμάτων στην ροή των υδάτων, κ.α.
- Πείνα και λοιμοί.
- Μόνιμη ή παροδική απομάκρυνση των κατοίκων από τις περιοχές που επλήγησαν από την πλημμύρα.
- Δημιουργία πυρκαγιών λόγω βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.
- Καταστροφή υγροτόπων και μείωση βιοποικιλότητας.

2.1.6. Τρόποι αντιμετώπισης των πλημμύρων

Από άποψη τεχνικών έργων, η φιλοσοφία των λύσεων που είχε επικρατήσει πριν μερικές δεκαετίες και εφαρμόζεται, βασίζεται στο σχεδιασμό τεχνικών έργων που είτε συγκρατούν τον πλημμυρικό όγκο των υδάτων μακριά από την πόλη (αντιπλημμυρικά φράγματα ανάντη) είτε απομακρύνουν τα πλημμυρικά νερά όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και πάλι έξω από την πόλη (εκτροπές και διευθετήσεις χειμάρρων). Οι λύσεις αυτές εκτός του ότι είναι αντισυμβατικές, δε βρίσκονται προς την πλευρά της ασφαλείας, αφενός λόγω του μεγάλου όγκου των στερεομεταφορών, που προσχώνουν σταδιακά τα φράγματα και αφετέρου λόγω της μελλοντικής επέκτασης των πόλεων που ενσωματώνουν τους χείμαρρους και θα ανατρέπουν έτσι την επιλογή της εκτροπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Οι λύσεις που προτείνονται βασίζονται στη δυνατότητα μετρίασης των πλημμυρικών αιχμών στις φυσικές λεκάνες απορροής, με τις κατάλληλες ορεινές διευθετήσεις και την εκτόνωση των πλημμυρικών αιχμών σε ειδικά διαρρυθμισμένες ζώνες μέσα στην πόλη ή στην περιφέρεια των πόλεων (λεκάνες εκτόνωσης πλημμυρικών αιχμών). Οι λεκάνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν χώροι πρασίνου ή αναψυχής και να είναι οικολογικά πάρκα στη θέση των χειμάρρων. Οποσδήποτε προσφέρουν πρόσθετη ασφάλεια σε περιπτώσεις εξαιρετικών πλημμύρων, εντάσσονται στον ιστό και τις λειτουργίες της πόλης και μπορεί να προγραμματισθούν κατάλληλα για να καλύψουν τις ανάγκες στην περίπτωση επέκτασης του πολεοδομικού σχεδίου (Κουτσογιαννάκη, Κουτρούλης, 2004):

2.2.Αστραπιαίες Πλημμύρες (Flash floods)

2.2.1. Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά των αστραπιαίων πλημμύρων

Η αστραπιαία πλημμύρα είναι μία ξαφνική τοπική πλημμύρα μεγάλου όγκου και μικρής διάρκειας, είναι το αποτέλεσμα μερικών ωρών (συνήθως λιγότερο από 6 ώρες) έντονης ή υπερβολικής βροχόπτωσης, μίας καταστροφής φράγματος ή αντιπλημμυρικού αναχώματος ή απελευθέρωση συσσωρευμένου νερού λόγω ice log jam.

Η αστραπιαία πλημμύρα μπορεί να προκληθεί από έντονη βροχόπτωση, κυρίως όταν πραγματοποιείται σε κορεσμένο έδαφος λόγω μίας βροχόπτωσης που έχει προηγηθεί ή επειδή το έδαφος είναι παγωμένο. Σε αυτές τις συνθήκες το περίσσειμα βροχής απορρέει από την επιφάνεια και συσσωρεύεται στα ρεύματα και τους ποταμούς με έναν πολύ επιταχυνόμενο ρυθμό. Οι δυνατές βροχές, που συνοδεύονται πολύ συχνά από σύννεφα, καλύπτουν μικρές περιοχές και είναι μικρής διάρκειας (από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες), αλλά πολύ έντονες όπως 100 mm σε διάστημα μίας ώρας ή και περισσότερο. Οι βίαιες βροχοπτώσεις που προκαλούν αστραπιαίες πλημμύρες μπορούν να συνοδευθούν από ισχυρούς ανέμους και έντονο χαλάζι. Μπορούν επίσης να εμφανιστούν τοπικά σε μία μεγάλη έκταση που καλύπτεται από βροχόπτωση.

Μια άλλη αιτία αστραπιαίας πλημμύρας, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές, μπορεί να είναι το τήξη του χιονιού σε συνδυασμό με βροχόπτωση. Μετά από έντονη χιονόπτωση τον χειμώνα, η ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας και η βροχόπτωση στην περίοδο χειμώνα / άνοιξη μπορεί να επιταχύνει την συμβολή της βροχόπτωσης στην δημιουργία πλημμύρας.

Η αστραπιαία πλημμύρα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μίας αστοχίας ενός φράγματος, ενός αντιπλημμυρικού αναχώματος ή άλλης υδραυλικής υποδομής. Μερικές φορές μπάζα ή πάγος μπορούν να συγκεντρωθούν σε φυσικά ή ανθρωπογενή εμπόδια όπως είναι μία γέφυρα και να εμποδίσουν την ροή του νερού (συντά αυτό το φαινόμενο αναφέρεται και ως ice jams ή log jams). Το νερό που κατακρατείται από τον πάγο (ice

jam) ή από τα μπάζα (debris dam) μπορεί να προκαλέσει πλημμύρα ανάντη. Διαδοχικά μπορεί να προκληθεί αστραπιαία πλημμύρα κατάντη αν τα εμπόδια ξαφνικά απομακρυνθούν. Σε πολύ απότομο έδαφος ή όπου τα γεωλογικά στρώματα έχουν ασταθή δομή, οι πλημμύρες μπορούν να καταλήξουν σε ροές με μπάζα και ροές με υπερβολική συγκέντρωση ιζημάτων.



Εικόνα 2.1: Εξέλιξη αστραπιαίας πλημμύρας αρχικά (αριστερά) και μετά από 15 λεπτά (δεξιά) (Πηγή: Guidance on flash flood management, 2007)

Παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στην εμφάνιση των αστραπιαίων πλημμύρων, εκτός από την ένταση και την διάρκεια της βροχής, είναι η τοπογραφία, οι εδαφολογικές συνθήκες και η επικάλυψη του εδάφους. Μειονεκτικές τοπογραφικές συνθήκες όπως είναι οι απότομες κλίσεις σε ορεινές περιοχές, οι στενές κοιλάδες ή λαγκάδια επιταχύνουν την απορροή και αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης αστραπιαίας πλημμύρας. Το κορεσμένο έδαφος ή τα ρηχά στεγανά γεωλογικά στρώματα αυξάνουν την επιφανειακή απορροή.

Επίσης, η κάλυψη του εδάφους μπορεί να έχει παρόμοια αποτελέσματα. Η αστικοποίηση και οι κατασκευές από στεγανά υλικά θεωρείται ότι επηρεάζουν την απορροή. Συγκεκριμένα αυξάνουν την απορροή 2 έως 6 φορές σε σύγκριση με τα εδάφη που έχουν φυσική κάλυψη (αγροί, λιβάδια, δάση).

Κατά την διάρκεια μίας αστραπιαίας πλημμύρας υπάρχει μία ξαφνική αύξηση της στάθμης του νερού στα ποτάμια και στα ρέματα και η ταχύτητα ροής μπορεί να είναι

πολύ μεγάλη. Η δύναμη του νερού μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να απομακρύνει ογκόλιθους, να ξεριζώσει δέντρα και να καταστρέψει γέφυρες και κτήρια που θα βρεθούν στο πέρασμά του. Για παράδειγμα ένα ισχυρό ρεύμα νερού μόνο 60 cm σε βάθος μπορεί να προκαλέσει το θάνατο σε επιβάτες αυτοκινήτων.

Κλείνοντας μπορούμε να πούμε ότι το φαινόμενο της αστραπιαίας πλημμύρας είναι ένα από τα πιο δύσκολα φυσικά φαινόμενα για να προβλεφθούν όσον αφορά το χρόνο και τον τόπο εμφάνισης τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποτελεί πρόκληση για τις αρμόδιες αρχές και για τις κοινότητες να ανταποκριθούν κατάλληλα. (Guidance on flash flood management, 2007)

2.2.2. Μέτρα για την αντιμετώπιση των αστραπιαίων πλημμυρών

Η πλημμυρογένεση στις αστικές και περαστικές περιοχές της Ελλάδας, η οποία και επιτείνεται συνεχώς, είναι φανερό ότι προκαλείται από έντονες βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με την αστικοποίηση. Καθώς οι παροχές των όμβριων υδάτων των περιοχών αυτών αθροίζονται, φθάνουν σε μεγάλες τιμές κατά τη διάρκεια της πλημμύρας και η αντιπλημμυρική προστασία επιτυγχάνεται με μεγάλη δυσκολία.

Στο γεγονός αυτό παίζει σημαντικό ρόλο και ότι σημαντικά αποχετευτικά έργα κατασκευάστηκαν πριν από αρκετές δεκαετίες με τα δεδομένα εκείνης της περιόδου. Τα δεδομένα που μεταβλήθηκαν είναι: ο συντελεστής απορροής, η στερεοπαροχή από τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και η φυτοκαλυπτόμενη έκταση. Επίσης δεν είναι γνωστή για το σχεδιασμό των έργων η τιμή έντασης της βροχής που έχει θεωρηθεί σαν βροχή μελέτης. Τα στοιχεία που συχνά οδηγούν στην κατάλληλη επιλογή του τρόπου αντιπλημμυρικής προστασίας είναι η τοπογραφία, η υδρολογία και η μορφολογία της λεκάνης απορροής.

Οι λύσεις για προστασία από τις αστραπιαίες πλημμύρες είναι αντίστοιχες με τις γενικώς αποδεκτές λύσεις για αντιπλημμυρική προστασία, με έμφαση στις λύσεις αποτροπής της δημιουργίας παροχών αιχμής, με τοπικά έργα στη λεκάνη απορροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ανάντη. Όσον αφορά τη σκοπιμότητα των διαφόρων αντιπλημμυρικών έργων μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες επισημάνσεις:

- Η άμεση προστασία των απειλούμενων περιοχών με αναχώματα είναι μία καλή λύση ανάγκης.
- Η αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας και παροχετευτικότητας της πλημμυρικής διατομής με μετατόπιση των αναχωμάτων, δεν είναι συνήθως δυνατή εξαιτίας ανεπάρκειας χώρου και αντικρουόμενων συμφερόντων.
- Η παροδική αποθήκευση της πλημμυρικής παροχής σε ταμειυτήρες, εκ πρώτης όψεως φαίνεται πολύ ελκυστική. Στην πράξη όμως, θα πρέπει να πληρούνται τόσες πολλές συνθήκες ώστε σε λίγες μόνο περιπτώσεις ενδείκνυται.
- Οι λύσεις που βασίζονται στην αρχή της αύξησης της παροχετευτικότητας της υπάρχουσας διατομής του ρέματος με διαμόρφωση και επένδυσή της είναι συχνά εφικτές.

Οι σύγχρονες λύσεις που προτείνονται διεθνώς βασίζονται:

1. Στην αποτροπή δημιουργίας ή την απομείωση των πλημμυρικών αιχμών στις φυσικές λεκάνες απορροής με έργα υδρονομίας.
 2. Στην αποτροπή δημιουργίας φερτών υλικών, την μείωση της στερεοπαροχής και τη συγκράτηση των επιπλέοντων υλικών με πολλά μικρά έργα.
 3. Στην δυνατότητα εκτόνωσης των πλημμυρικών αιχμών σε ειδικά διαρρυθμισμένες ζώνες μέσα στην πόλη ή στην περιφέρεια των πόλεων.
- (Μ.Βαφειάδης)

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ - ΜΟΝΤΕΛΟ MIKE SHE

3.1. Υδρολογικά μοντέλα

3.1.1. Ορισμός του υδρολογικού μοντέλου

Ως υδρολογικό μοντέλο ορίζεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς και απόκρισης ενός φυσικού συστήματος από ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών. Χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο (Μαμάσης, 2007).

3.1.2. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται με βάση τη χωρική κλίμακα, τη χρονική κλίμακα, την στοχαστική ή όχι δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι κατηγορίες:

3.1.2.1. Χωρική κλίμακα

Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική (lumped). Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.

Ημι-κατανεμημένη (semi-distributed). Η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές, που αντιστοιχούν σε φυσικές υπολεκάνες ή σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες

αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Μετά το πέρας των υπολογισμών για κάθε ενότητα, η απόκριση (δηλαδή η απορροή) «μεταφέρεται» στην έξοδο της λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή σχημάτων διόδευσης.

Ημι-αδιαμέριστη (semi-lumped). Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.

Κατανεμημένη (distributed). Γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας (κελία), που προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού καννάβου δεδομένης διάστασης. Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κελία αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (Μαμάσης, 2007).

3.1.2.2. Χρονική κλίμακα

Μεμονωμένο υδρολογικό γεγονός: Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

Συνεχή: Περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (Μαμάσης, 2007).

3.1.2.3. Στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

Στοχαστικά: Μια τουλάχιστον μεταβλητή έχει στοχαστική δομή. Λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών.

Προσδιοριστικά: Δεν υπάρχει στοχαστική δομή των δεδομένων σε καμία μεταβλητή. Δίνουν σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα. Το μειονέκτημά τους είναι ότι δε μπορούν να δώσουν πιθανοτική διάσταση στα αποτελέσματα (Μαμάσης, 2007).

3.1.2.4. *Βαθμός προσέγγισης των φυσικών διεργασιών*

Τα μοντέλα **φυσικής βάσης (physically-based)** είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή τις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημι - εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες.

Τα **εννοιολογικά (conceptual)** μοντέλα διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

Τα **μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box)** όπου οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης (Μαμάσης, 2007).

3.2.Μοντέλο MIKE SHE

Το MIKE SHE είναι ένα ντετερμινιστικό, πλήρως κατενεμημένο φυσικής βάσης υδρολογικό και ποιότητας νερών μοντέλο. Μπορεί να προσομοιάσει την υδρολογία και τις διαδικασίες ποιότητας νερού για μία λεκάνη απορροής και για τους υδροφόρους ορίζοντες που βρίσκονται κάτω από αυτήν. Κατασκευάστηκε από τρεις Ευρωπαϊκούς οργανισμούς (Danish Hydraulic Institute, British Institute of Hydrology και την Γαλλική εταιρεία συμβάντων, SOGREAH) και χρηματοδοτήθηκε από την Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Commission of the European Communities). Αρχικά ονομάστηκε μοντέλο SHE (Système Hydrologique Européen) (DHI, 2008).

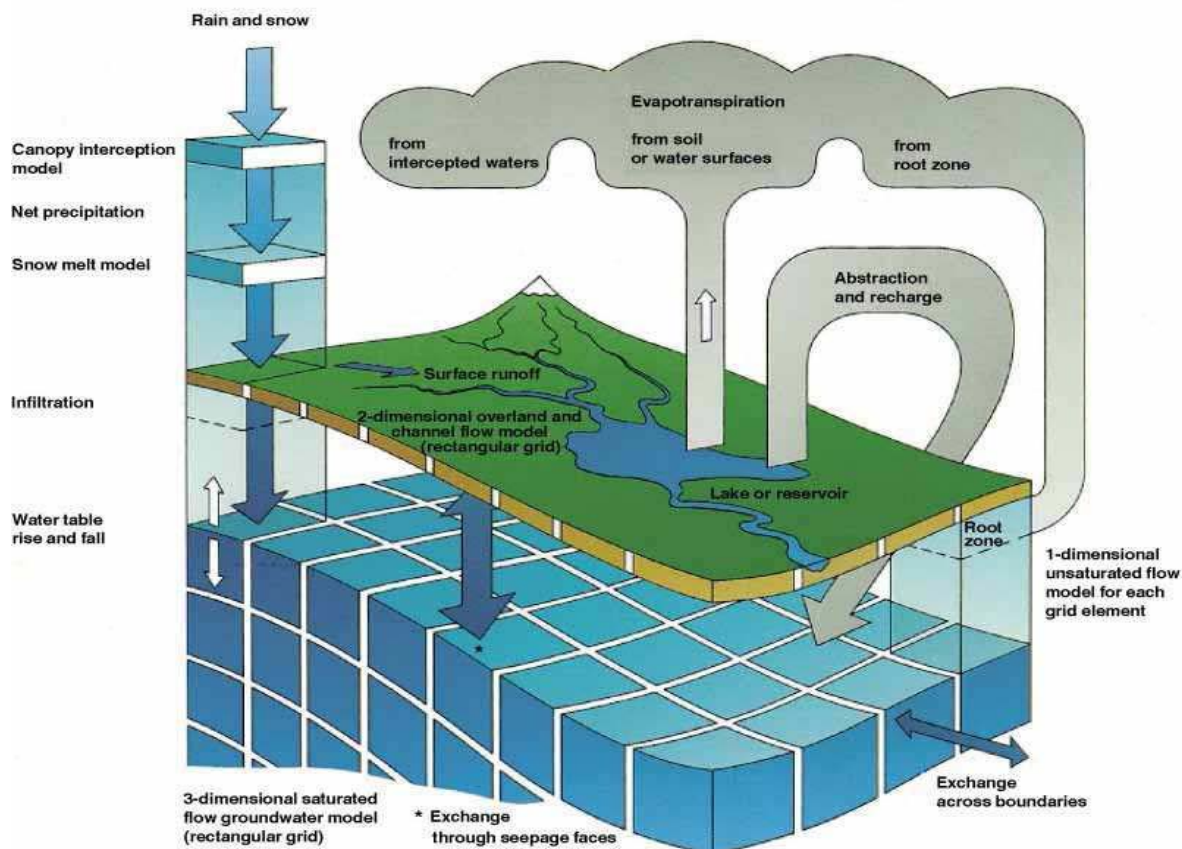
3.2.1. Υδρολογική περιγραφή του μοντέλου

Το MIKE SHE προσομοιάζει όλες τις διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου που συμβαίνουν στην επιφάνεια του εδάφους όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο χρήσης (DHI, 2004). Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, πέφτοντας από την ατμόσφαιρα με την μορφή χιονιού ή βροχόπτωσης, παρεμποδίζονται μερικώς από την βλάστηση και τις κτηριακές εγκαταστάσεις. Το νερό που πέφτει στην επιφάνεια του εδάφους κατακρατείται από την βλάστηση και στην συνέχεια εξατμίζεται ή διηθείται στο έδαφος. Επίσης μία σημαντική ποσότητα της βροχόπτωσης, που φτάνει στο έδαφος, εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα. Ανάλογα με την θερμοκρασία του αέρα, το χιόνι συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του εδάφους για θερμοκρασία μικρότερη από 0°C, ενώ η βροχόπτωση διηθείται την ακόρεστη ζώνη. Όταν το ανώτερο στρώμα της ακόρεστης ζώνης κορεστεί, δημιουργούνται λίμνες στην επιφάνεια του εδάφους και αρχίζει η επιφανειακή ροή όταν όλες οι κοιλότητες του εδάφους γεμίσουν. Το νερό στην ακόρεστη ζώνη μπορεί να αποθηκευτεί, να εξατμιστεί, να απορροφηθεί από τις ρίζες των φυτών και μέσω της αναπνοής των φύλλων να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα ή να διεισδύσει στην κορεσμένη ζώνη. Το επιφανειακό νερό ρέει στο έδαφος ανάλογα με την τοπογραφία, εξατμίζεται και διηθείται στην πορεία του και τελικά φτάνει στα ρέματα, στα ποτάμια και σε άλλους υδάτινους αποδέκτες. Το υπόγειο νερό συμβάλλει στα ρέματα και στα ποτάμια ως

βασική ροή, ενώ το νερό στα ποτάμια και στα ρέματα διηθείται πίσω στην κορεσμένη ζώνη ως εισροή (DHI, 2004).

3.2.2. Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο MIKE SHE. Το μοντέλο MIKE SHE έχει τμηματική δομή που αποτελείται από πολλά μέρη: το τμήμα της κίνησης του νερού για την υδρολογία (WM), το τμήμα της Συμμεταφοράς/Διασποράς των διαλυμάτων (AD) για την ποιότητα των νερών, το τμήμα της Διάβρωσης του Εδάφους (SE) για την μεταφορά των ιζημάτων, επίσης το Διπλό Πορώδες (DP), οι Γεωχημικές Διεργασίες (GC), η ανάπτυξη των καρπών και οι διεργασίες του Αζώτου στις ρίζες (CN) και η άρδευση (IR). Το τμήμα του MIKE SHE που περιγράφει την κίνηση του νερού έχει πολλά συστατικά που το καθένα περιγράφει συγκεκριμένες φυσικές διεργασίες. Αυτές οι διεργασίες περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή ροή και την ροή στο κανάλι (OC), την ροή στην ακόρεστη (UZ) και κορεσμένη ζώνη (SZ), την τήξη του χιονιού και την αλληλεπίδραση μεταξύ του υδροφόρου ορίζοντα και του ποταμού.



Εικόνα 3.1: Σχηματική περιγραφή των διεργασιών στο μοντέλο MIKE SHE (DHI, 2004)

Οι υδρολογικές διαδικασίες περιγράφονται κυρίως από τους φυσικούς νόμους (νόμος διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας). Η μονοδιάστατη και δισδιάστατη μορφή της κινηματική εξίσωσης του Saint Venant περιγράφει την ροή στο ποτάμι και την επιφανειακή ροή αντίστοιχα. Η μέθοδος Kristensen – Jensen χρησιμοποιείται για την εξατμισοδιαπνοή, η μονοδιάστατη μορφή της εξίσωσης του Richards για την ροή στην ακόρεστη ζώνη, και η τρισδιάστατη μορφή της εξίσωσης του Boussinesq για την ροή στην κορεσμένη ζώνη. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις λύνονται με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, ενώ οι άλλες μέθοδοι (η εξατμισοδιαπνοή και η τήξη του πάγου) στο μοντέλο είναι εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες πάρθηκαν από δοκιμές σε πειραματικές λεκάνες (DHI, 2004).

Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος 17/10/2006 στην Αλμυρίδα λάβαμε υπόψη μας την επιφανειακή ροή, την ροή στο κανάλι και την ροή στην ακόρεστη ζώνη. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά το μαθηματικό υπόβαθρο των διεργασιών που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2.2.1. Επιφανειακή και ποτάμια ροή

Η επιφανειακή ροή, επηρεάζεται από την τοπογραφία, την τραχύτητα του εδάφους, την εξάτμιση και την διήθηση κατά μήκος της ροής. Η επιφανειακή ροή λαμβάνει χώρα όταν ο ρυθμός της βροχόπτωσης ξεπερνάει τον ρυθμό διήθησης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται λίμνες στην επιφάνεια του εδάφους και τέλος το νερό να ρέει επιφανειακά. Το μοντέλο επιτρέπει την αλληλεπίδραση με άλλες διεργασίες, όπως είναι η εξάτμιση, η διήθηση και η ροή μέσα στο κανάλι. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για τον προσδιορισμό της επιφανειακής ροής είναι η κινηματική εξίσωση του Saint Venant.

Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών - Diffusive Wave Approximation

Χρησιμοποιώντας το Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στο οριζόντιο επίπεδο, θέτουμε το επίπεδο του εδάφους ως $z_g(x, y)$, το βάθος της ροής (πάνω από την επιφάνεια του εδάφους) το θέτουμε ως $h(x, y)$ και την ταχύτητα ροής στον x και y άξονα την θέτουμε ως $u(x, y)$ και $v(x, y)$ αντίστοιχα. Επίσης θέτουμε $i(x, y)$ το δίκτυο εισροής στην επιφανειακή ροή. Οπότε με βάση την διατήρηση της μάζας έχουμε:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = i \quad (1)$$

Επίσης με βάση την διατήρηση της ορμής έχουμε ότι:

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{qv}{gh} \quad (2)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{qu}{gh} \quad (3)$$

Όπου S_f η κλίση της τριβής στον x και y άξονα και S_o είναι η κλίση της επιφάνειας του εδάφους. Οι εξισώσεις (1), (2) και (3) είναι γνωστές ως εξισώσεις St.Venant και όταν λυθούν αποδίδουν την πλήρως δυναμική περιγραφή ενός ρηχού, (δισδιάστατου) ελεύθερου αγωγού.

Η δυναμική επίλυση της δισδιάστατης εξίσωσης του St.Venant είναι αριθμητικά μία πρόκληση. Συνηθίζεται για να μειώσουμε την πολυπλοκότητα του προβλήματος να απαλείψουμε τους τρεις τελευταίους όρους στην εξίσωση της ορμής. Επιπλέον αγνοούμε τις απώλειες της ορμής λόγω της τοπικής και θερμογόνου επιτάχυνσης και τις πλευρικές εισροές κάθετες στην διεύθυνση ροής. Αυτό είναι γνωστό ως μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (diffusive wave approximation) και εφαρμόζεται από το MIKE SHE.

Θεωρώντας μόνο ροή στην x άξονα η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\partial z_g}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

Εάν απλοποιήσουμε την εξίσωση (4) χρησιμοποιώντας την εξίσωση $z = z_g + h$ έχουμε ότι:

$$S_{fx} = -\frac{\partial}{\partial x}(z_g + h) = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (5)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση στον y άξονα είναι η εξής:

$$S_{fy} = -\frac{\partial}{\partial y}(z_g + h) = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (6)$$

Η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών επιτρέπει το βάθος της ροής να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ γειτονικών κελιών και τα λιμνάζοντα ύδατα που

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

δημιουργούνται να μπορούν να προσομοιωθούν. Παρόλα αυτά όπως και με κάθε αριθμητική επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων, αριθμητικά προβλήματα μπορούν να υπάρχουν όταν η κλίση της επιφάνειας του νερού είναι πολύ μικρή και οι ταχύτητες είναι πολύ χαμηλές.

Τώρα, εάν χρησιμοποιηθεί ο τύπος Strickler/Manning για κάθε κλίση της τριβής, με συντελεστή Strickler K_x και K_y για τις δύο κατευθύνσεις έχουμε ότι:

$$S_{fx} = \frac{u^2}{h^{4/3} K_x^2} \quad (7)$$

$$S_{fy} = \frac{u^2}{h^{4/3} K_y^2} \quad (8)$$

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (5) και (6) τις εξισώσεις (7) και (8) έχουμε ότι:

$$\frac{u^2}{h^{4/3} K_x^2} = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{u^2}{h^{4/3} K_y^2} = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (10)$$

Μετά από απλοποίηση των εξισώσεων (9) και (10) και πολλαπλασιασμό και των δύο μελών των εξισώσεων με h , η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων και των βαθών είναι η εξής:

$$uh = K_x \left(-\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad (11)$$

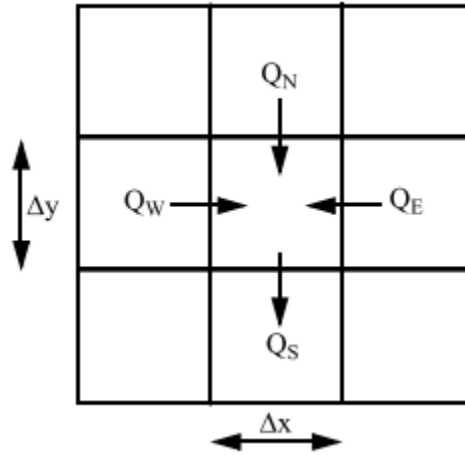
$$vh = K_y \left(-\frac{\partial z}{\partial y} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad (12)$$

Σημειώνεται ότι οι ποσότητες uh και vh αντιπροσωπεύουν την εκροή ανά μονάδα μήκους κατά μήκος των ορίων του κελιού στην x και y κατεύθυνση αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Διατύπωση των Πεπερασμένων Διαφορών

Θεωρούμε την επιφανειακή ροή σε μία μικρή περιοχή του μοντέλου MIKE SHE (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα), έχοντας πλευρές με μήκος Δx και Δy και βάθος νερού $h(t)$ για χρόνο t .



Εικόνα 3.2: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών (DHI, 2004)

Ο όρος των ταχυτήτων στην εξίσωση (1) με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να γραφεί ως εξής για την κατεύθυνση x και y αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uh) \cong \frac{1}{\Delta x} \{ (uh)_{east} - (uh)_{west} \} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(vh) \cong \frac{1}{\Delta y} \{ (vh)_{north} - (vh)_{south} \} \quad (14)$$

οι δείκτες αναφέρονται στην κατεύθυνση μιας ποσότητας νερού για παράδειγμα, Δx $(uh)_{west}$ είναι ο όγκος της ροής στο δυτικό όριο.

$$\Delta h = h(t + \Delta t) - h(t) = I + \frac{\sum Q \Delta t}{\Delta x^2} \quad (15)$$

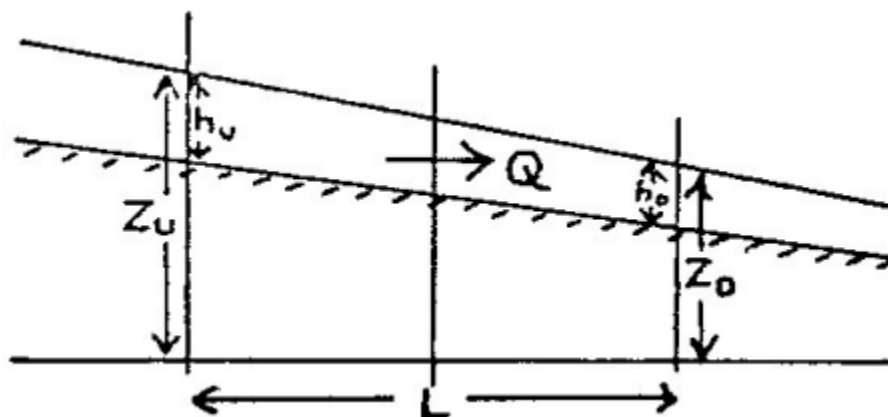
Όπου:

$$I = i \Delta x^2 \quad (16)$$

$$\sum Q = Q_N + Q_S + Q_E + Q_W \quad (17)$$

όπου i είναι το δίκτυο εισροής στην επιφανειακή ροή στην εξίσωση (1) και Q είναι οι ροές στο τετράγωνο από το βόριο, νότιο, ανατολικό και δυτικό όριο που δημιουργούνται σε χρόνο t .

Στην συνέχεια θεωρούμε ότι ροή του νερού ανάμεσα στα όρια είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2 όπου Z_U και Z_D είναι το ψηλότερο και το χαμηλότερο από τα δύο ύψη νερού με αναφορά το επίπεδο του εδάφους. Επίσης θεωρήσουμε ότι το βάθος του νερού που αντιστοιχεί στο Z_U είναι h_U και αντίστοιχα για το Z_D είναι h_D .



Εικόνα 3.3: Επιφανειακή ροή ανάμεσα στα όρια (DHI, 2004)

Αν χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις (11) και (12) μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή Q , ανάμεσα στα κελία του καννάβου έχουμε ότι:

$$Q = \frac{K \Delta x}{\Delta x^{\frac{1}{2}}} (Z_U - Z_D)^{1/2} h_u^{5/3} \quad (18)$$

όπου K είναι ο κατάλληλος συντελεστής Strickler και το βάθος του νερού h_U είναι το βάθος του νερού όπου το νερό μπορεί ελεύθερα να ρέει στο επόμενο κελί. Αυτό το βάθος είναι ίσο με το πραγματικό βάθος νερού μείον την ποσότητα του νερού που παγιδεύεται

σε ρηχές κοιλότητες του εδάφους. Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει ότι η επιφανειακή ροή στο κελί θα είναι μηδέν εάν το ανάντη βάθος είναι μηδέν. Η ροή κατά μήκος των ανοιχτών ορίων στην άκρη του μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιώντας καθορισμένα οριακά επίπεδα νερού.

Η τροποποιημένη μέθοδος Gauss - Seidel χρησιμοποιείται για την αριθμητική λύση της εξίσωσης. Το νερό προστίθεται ή απομακρύνεται (εξαιτίας της διήθησης, της εκροής ή της εξάτμισης) στο λιμνάζον νερό στην αρχή κάθε χρονικού βήματος για τον υπολογισμό της επιφανειακής ροής. Οι επιφανειακές ροές μειώνονται σε κάποιες περιπτώσεις ώστε να αποφευχθεί εσωτερικό λάθος στο ισοζύγιο του νερού και απόκλιση από την επιθυμητή λύση. Επομένως η εκροή πρέπει να είναι:

$$\sum |Q_{out}| \leq \sum Q_{in} + I + \frac{\Delta x^2 h(t)}{\Delta t} \quad (19)$$

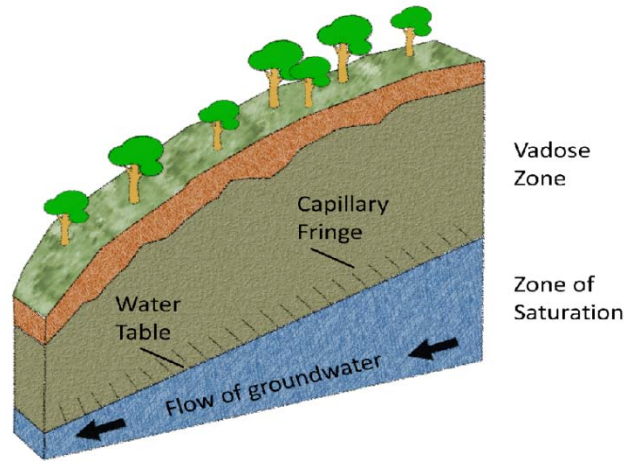
όπου

$\sum Q_{in}$ είναι το άθροισμα των ρυθμών εισροής ($m^3 s^{-1}$) και

$I = i \Delta x^2$ είναι το δίκτυο εισροών στην επιφανειακή ροή σε κάθε πλέγμα ($m^3 s^{-1}$)

3.2.2.2. Ροή στη Ακόρεστη Ζώνη

Ακόρεστη ονομάζεται η ζώνη εκείνη του υπεδάφους, όπου οι πόροι καταλαμβάνονται και από αέρα και από νερό και η πίεση μέσα στους πόρους είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Στην ακόρεστη ζώνη η υδραυλική πίεση είναι αρνητική, λόγω των επιφανειακών τάσεων των μηνίσκων του νερού των πόρων, που σχηματίζονται στα εδαφικά κενά με τη βοήθεια των τριχοειδών δυνάμεων. Στις τριχοειδείς δυνάμεις οφείλεται και η ζώνη πλήρους κορεσμού, που παρατηρείται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και στην οποία αναπτύσσονται αρνητικές υδραυλικές πιέσεις. Το υπόγειο νερό, που καταλαμβάνει την ακόρεστη ζώνη, δεν κινείται, εκτός εάν τού ασκηθεί μεγαλύτερη υποπίεση από την αρνητική πίεση στην οποία βρίσκεται.



Εικόνα 3.4: Ροή στην ακόρεστη ζώνη

Στην ακόρεστη ζώνη διακρίνονται δύο υποζώνες: η ζώνη του εδαφικού ύδατος και η ζώνη των τριχοειδών φαινομένων. Η πρώτη φτάνει από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος των φυτών. Η δεύτερη εκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι εκεί που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα. (Κουμπούρης, 2005). Η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση στην ακόρεστη ζώνη είναι γνωστή ως εξίσωση Richard:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

όπου

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα

ψ είναι η πίεση

z είναι το ύψος πάνω από το οριζόντιο επίπεδο

θ είναι η περιεκτικότητα του νερού

t είναι ο χρόνος

Η υγρασία του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη παρουσιάζει μία κυκλική πορεία καθώς ανανεώνεται από την βροχόπτωση, απομακρύνεται λόγω εξατμισοδιαπνοή και εισέρχεται στον υπόγειο υδροφόρο. Η ροή στην ακόρεστη θεωρείται κατακόρυφη

καθώς η βαρύτητα υπερισχύει της διήθησης. Επιπλέον η ροή στην ακόρεστη ζώνη στο MIKE SHE υπολογίζεται μόνο κατακόρυφα σε μία διάσταση, η οποία είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, αυτή η θεώρηση μπορεί να περιορίσει της αξιοπιστία όσον αφορά την περιγραφή της ροής σε ορισμένες περιπτώσεις όπως είναι σε ορεινές πολύ απότομες κλίσεις με διαφορετικές ιδιότητες εδάφους. Στην παρούσα εργασία εφαρμόσαμε την μέθοδο simple Two-Layer Water Balance (Jianbiao Lu, 2006).

Μέθοδος 2-Layer Water Balance

Η μέθοδος 2-Layer Water Balance χωρίζει την ακόρεστη ζώνη στην ζώνη μέχρι το ριζικό σύστημα και στην ζώνη κάτω από το ριζικό σύστημα. Αυτά τα δύο στρώματα παριστάνουν τις μέσες συνθήκες στην ακόρεστη ζώνη. Η αποθηκευτικότητα στην ακόρεστη ζώνη προσδιορίζεται από το μέση και μέγιστη τιμή της περιεκτικότητας σε νερό στην ακόρεστη ζώνη. Το νερό εισρέει λόγω της διήθησης στην κορεσμένη ζώνη όποτε η αποθηκευτικότητα στην ακόρεστη ζώνη είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι ίση με τη μέγιστη περιεκτικότητα νερού. Η μέθοδος απλά υπολογίζει την ποσότητα του νερού που εισρέει στην κορεσμένη ζώνη, ενώ υπολογίζεται και η αποθηκευτικότητα στην ακόρεστη ζώνη (Jianbiao Lu, 2006).

Ποτάμια Ροή

Η ποτάμια ροή προσομοιώνεται με συνδυασμό του MIKE SHE και MIKE 11, το οποίο είναι το υδραυλικό μοντέλο της DHI. Η αποτύπωση του υδατορεύματος στο μοντέλο MIKE SHE γίνεται προσεγγιστικά έτσι ώστε αυτό να διατρέχει τα όρια του καννάβου (πλέγματος) του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η μεταφορά ύδατος από την επιφανειακή ροή στην κορεσμένη ζώνη ανάλογα την υδραυλική κλίση. Επειδή η ανταλλαγή συμβαίνει στα άκρα ανάμεσα στα κελιά του καννάβου, όσο πιο σαφές είναι ορισμένος είναι ο κάρναβος, τόσο καλύτερα θα αναπαρασταθεί η χωρική κατανομή. Οι εξισώσεις πλήρης δυναμική μέθοδο μεγάλης τάξης του Saint Venant χρησιμοποιούνται

για να προσομοιωθεί η μονοδιάστατη ροή στο ποτάμι και η στάθμη του νερού σ' αυτό. Μέσω αυτού τμήματος πραγματοποιείται η ανταλλαγή του νερό μεταξύ του επιφανειακού νερού και του υδροφόρου ορίζοντα. Ολόκληρο το δίκτυο του ποταμού προσομοιώνεται με το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11. Το MIKE SHE θα ανταλλάξει νερό με τμήματα του MIKE 11 τα οποία επικαλύπτονται από το πλέγμα της επιφανειακής και υπόγειας ροής. Η υπολογισμένη ροή τροφοδοτείται στο MIKE 11 ως πλευρική ροή. (Jianbiao Lu, 2006).

"Πλήρως δυναμική, μεγάλης τάξης" μέθοδος

Η περιγραφή της ροής με την "Πλήρως δυναμική, μεγάλης τάξης" μέθοδο περιέχει κάποιους όρους μεγάλης τάξης στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής. Αυτή η αλλαγή επιτρέπει οι προσομοιώσεις να εκτελούνται σε μεγαλύτερα χρονικά βήματα σε σύγκριση με την περιγραφή της 'Πλήρως δυναμικής' (DHI, 2008).

Όταν εφαρμόζεται η "Πλήρως δυναμική, μεγάλης τάξης" μέθοδο, όπως στην παρούσα εργασία, το MIKE 11 επιλύει τις εξισώσεις St.Venant. Οι εξισώσεις St.Venant παράγονται από την τυπική μορφή των εξισώσεων της διατήρησης της μάζας και της ορμής με βάση τις παρακάτω τέσσερις υποθέσεις:

1. Το νερό είναι ασυμπίεστο και ομογενές, επομένως υπάρχουν αμελητέες διαφορές στην πυκνότητα.
2. Η κλίση του πυθμένα είναι μικρή, επομένως το συνημίτονο της γωνίας της κλίσης μπορεί να θεωρηθεί ίση με 1.
3. Το ύψος της στάθμης του νερού πρέπει να είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το βάθος του νερού, αυτό εξασφαλίζει ότι η ροή οπουδήποτε μπορεί να θεωρηθεί ότι κινείται σε κατεύθυνση παράλληλη στον πυθμένα.
4. Η ροή είναι υπερ – κριτική. Οι συνθήκες σουπερ – κριτικής ροής επιλύονται με ελαχιστοποίηση της εξίσωσης της ορμής, που σημαίνει απαλοιφή των μη γραμμικών όρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αν εφαρμόσουμε τις παραπάνω υποθέσεις, οι τυπικές μορφές των εξισώσεων της διατήρησης της μάζας και της ορμής μπορούν να μετασχηματιστούν στις εξισώσεις (1) και (2). Αυτοί οι μετασχηματισμοί προήλθαν από την υδραυλική αντίσταση της εξίσωσης του Manning σε μονάδες SI, και ενσωμάτωση των πλευρικών εισροών στην εξίσωση της συνέχειας.

Εξίσωση Συνέχεια:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

Εξίσωση Ορμής:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \left(a \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

όπου:

Q: η παροχή [m^3/s]

A: το εμβαδόν της διατομής [m^2]

x: το μήκος της κατεύθυνσης του ρεύματος [m]

t: ο χρόνος [s]

q: η πλευρική εισροή [m^2/s]

a: ο συντελεστής κατανομής της κατακόρυφης ταχύτητας

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2]

h: η στάθμη του νερού πάνω από τον πυθμένα [m]

n: ο συντελεστής Manning [$\text{m}/\text{s}^{1/3}$]

R: η υδραυλική ακτίνα [m]

Με τον κώδικα προγραμματισμού του μοντέλου MIKE 11 οι παραπάνω εξισώσεις μετασχηματίζονται σε ένα σετ εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

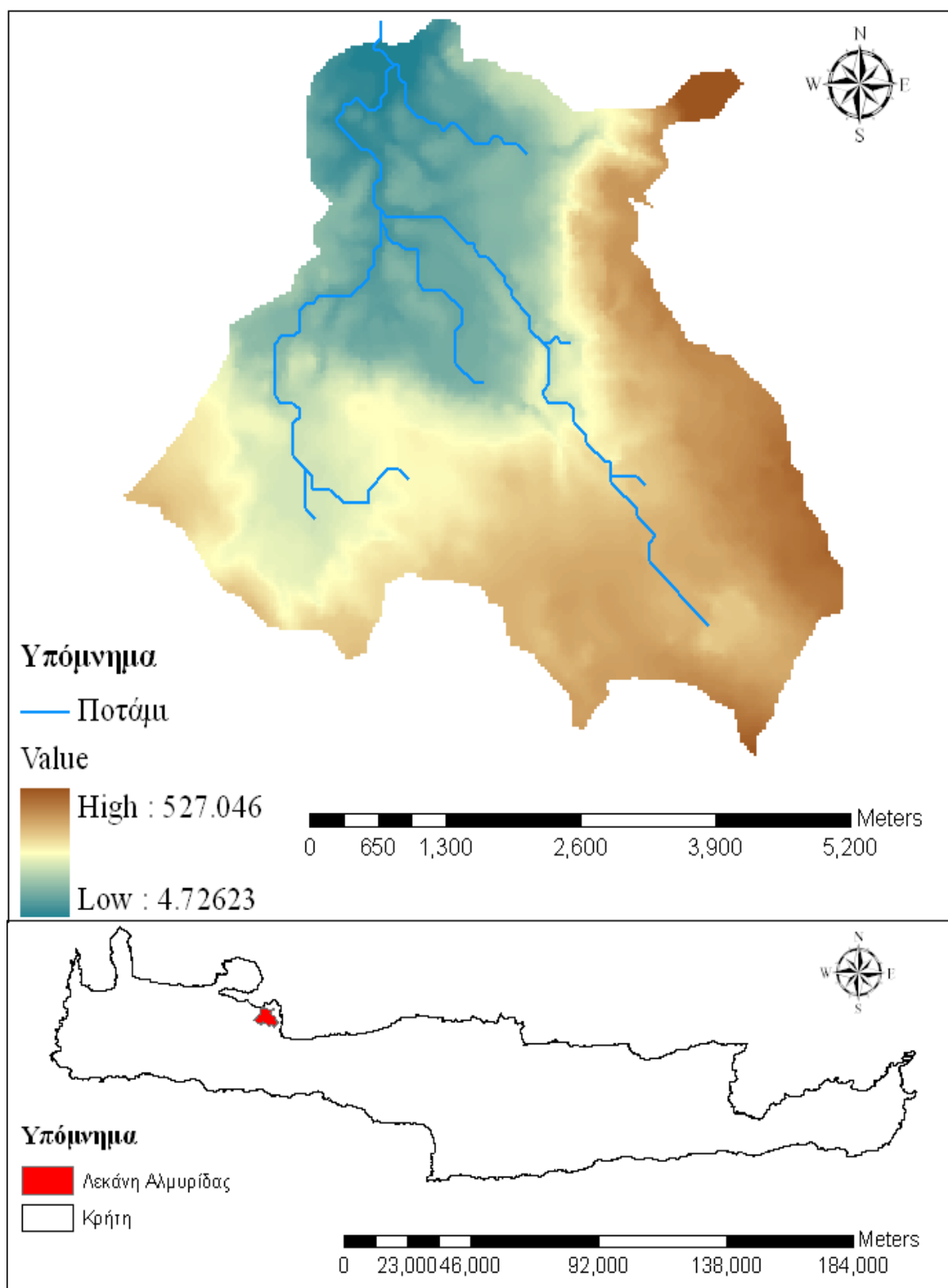
επιλύονται για κάθε σημείο του καννάβου (σε κάθε κόμβο). Οι παραπάνω μορφές των εξισώσεων St.Venant έχουν απλουστευθεί για εφαρμογή σε ορθογώνιες διατομές. Οι διατομές στα φυσικά ποτάμια είναι σπάνια ορθογώνιες, έτσι το μοντέλο MIKE 11 ολοκληρώνει τις εξισώσεις με ξεχωριστά βήματα στην πλευρική κατεύθυνση (Christopher Trevor Hammersmark, 2003).

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΑΛΜΥΡΙΔΑΣ – ΠΛΗΜΜΥΡΑ 17ης ΟΚΤΩΜΒΡΙΟΥ 2006

4.1. Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας ($24^{\circ}12'05,65''$ E, $35^{\circ}26'51,99''$ N) τοποθετείται στον νομό Χανίων. Πιο συγκεκριμένα τοποθετείται στον Αποκόρωνα που ανήκει στο δήμο Βάμου. Βόρεια της λεκάνης απορροής βρίσκεται ο όρμος της Σούδας, Νότια ο Δήμος Βρυσών, Ανατολικά ο Δήμος Γεωργιουπόλεως και ο όρμος Αλμυρού και Δυτικά ο Δήμος Αρμένων.

Βόρεια, Δυτικά και Ανατολικά της περιοχής μελέτης επικρατεί ημιορεινή και πεδινή ζώνη με ψηλότερη κορυφή τα Δραπανοκέφαλα που βαθμιαία μεταβαίνει μέσω των απόκρημνων ακτών στην παραθαλάσσια ζώνη του Κρητικού Πελάγους ενώ Νότια επικρατεί ο μεγάλος ορεινός όγκος των Λευκών Ορέων.



Εικόνα 4.1: Τοποθεσία της λεκάνης της Αλμυρίδας

4.2. Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής

4.2.1. Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας έχει εμβαδόν 24,74 km². Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 212 m (ελάχιστο = 0 m, μέγιστο = 527 m) ενώ η μέση κλίση είναι 11.9 %. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην λεκάνη είναι 648 mm και προέκυψε από περίοδο παρατήρησης 32 ετών.

4.2.2. Γεωλογικό υπόβαθρο

Το νότιο τμήμα της λεκάνης αποτελείται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, κατά τόπους μάρμαρα και Βιογενείς ασβεστόλιθους, μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή πετρώματα. Αργιλικές αποθέσεις σε καρστικές κοιλότητες βρίσκονται επίσης σε μικρότερη έκταση. Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης συναντώνται κυρίως μάρμαρα, φυλλίτες, δολομίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή σε διαδοχικές στρώσεις και αλλουβιακές αποθέσεις κυρίως κατά μήκος των πρηνών των ρεμάτων.

Τύποι Εδάφους	Ποσοστό %
Βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή πετρώματα (Μειόκαινο)	40
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά τόπους μάρμαρα (Μέσο Ιουρασικό – Ηώκαινο)	29.4
Μάρμαρα, φυλλίτες, δολομίτες, χαλαζίτες και κροκαλοπαγή σε διαδοχικές στρώσεις (Μεσοζωικό)	11.8
Αργιλικές αποθέσεις σε καρστικές κοιλότητες	9.4
Ανθρακικές στρώσεις ασβεστόλιθων και δολομιτών (Τριάσιο – Μέσο Ηώκαινο)	5
Αλλουβιακές αποθέσεις στα πρηνή των ρεμάτων (Ολόκαινο)	4.4

Πίνακας 4.1: Γεωλογία της λεκάνης της Αλμυρίδας

4.2.3. Κλίμα

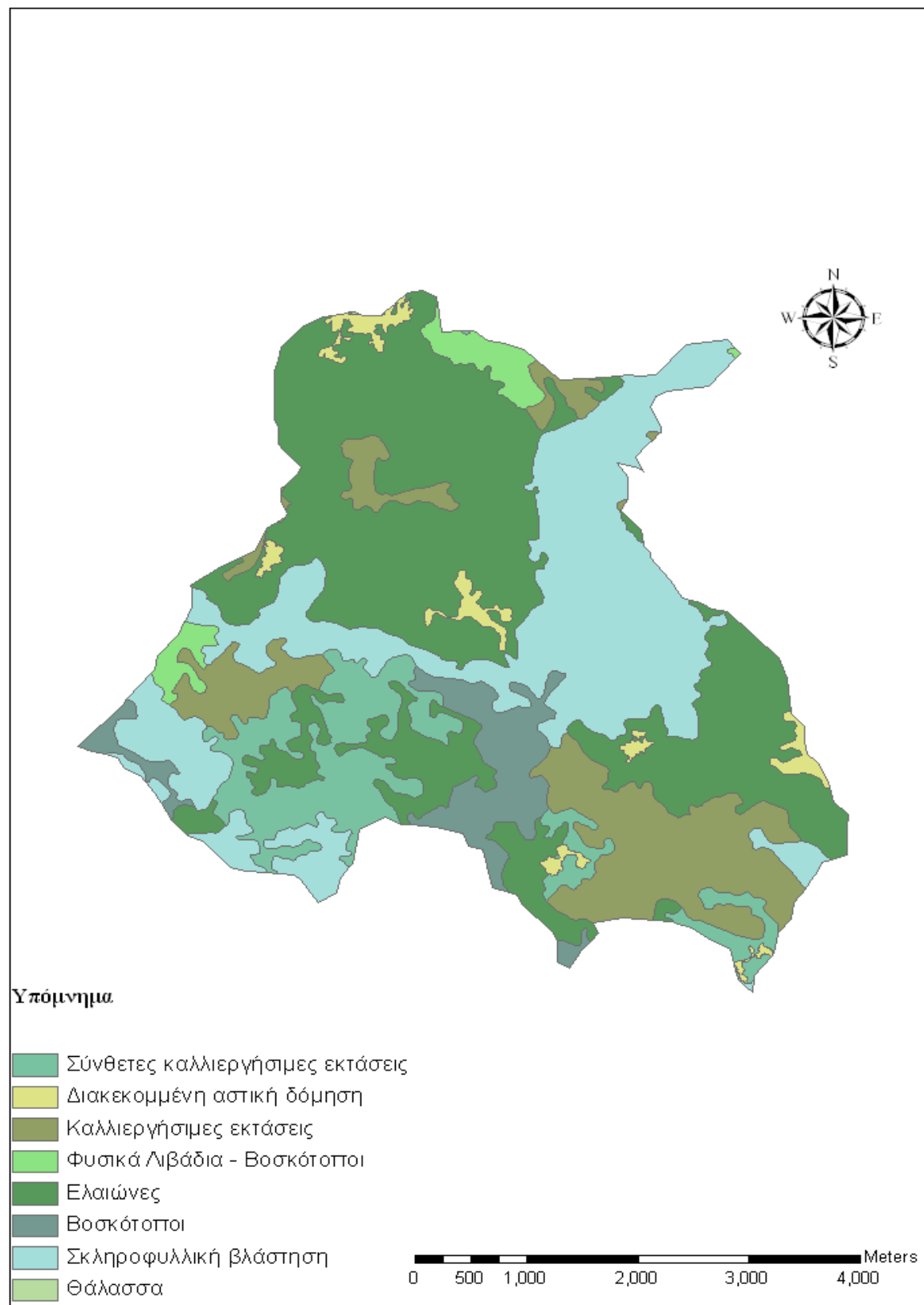
Η περιοχή έχει μεσογειακό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από τις εποχιακές διαφοροποιήσεις του έτους, μακρά, ζεστά και άνυδρα καλοκαίρια με υψηλά ποσοστά υγρασίας, γεγονός που θυμίζει εύκρατο κλίμα κατά καιρούς, και υψηλές θερμοκρασίες. Χαρακτηρίζεται επίσης από βραχείς και κρύους χειμώνες, με έντονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις κυρίως στα νότια ορεινά. Η μεγάλη ποσότητα των κατακρημνισμάτων που φθάνει με μορφή είτε βροχής είτε χιονιού στα Λευκά Όρη τροφοδοτούν τον υδροφόρο της περιοχής με μεγάλα ποσά ύδατος.

4.2.4. Χρήσεις γης

Ο χάρτης χρήσεων γης προέρχεται από το πρόγραμμα Corine Land Cover 2000 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (Εικόνα 4.2). Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση Corine, η εδαφική κάλυψη στην Ευρώπη κατηγοριοποιείται σε 44 κατηγορίες, χρησιμοποιώντας χάρτες κλίμακα 1:100.000. Οι κατηγορίες που απαντώνται στην λεκάνη της Αλμυρίδας είναι 7 (Πίνακας).

Κατηγορίες χρήσεων γης	Ποσοστό %
Ελαιώνες	39.41
Φυσικά λιβάδια - Βοσκότοποι	1.61
Σκληροφυλλική βλάστηση	26.75
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	14.71
Σύνθετες καλλιεργήσιμες εκτάσεις	10.99
Βοσκότοποι	6.20
Διακεκομμένη αστική δόμηση	0.34

Πίνακας 4.2: Χρήσεις γης της λεκάνης της Αλμυρίδας



Εικόνα 4.2: Χρήσεις γης στην λεκάνη της Αλμυρίδας

4.3. Η πλημμύρα στις 17 Οκτωβρίου 2006

4.3.1. Γενικές πληροφορίες για την πλημμύρα

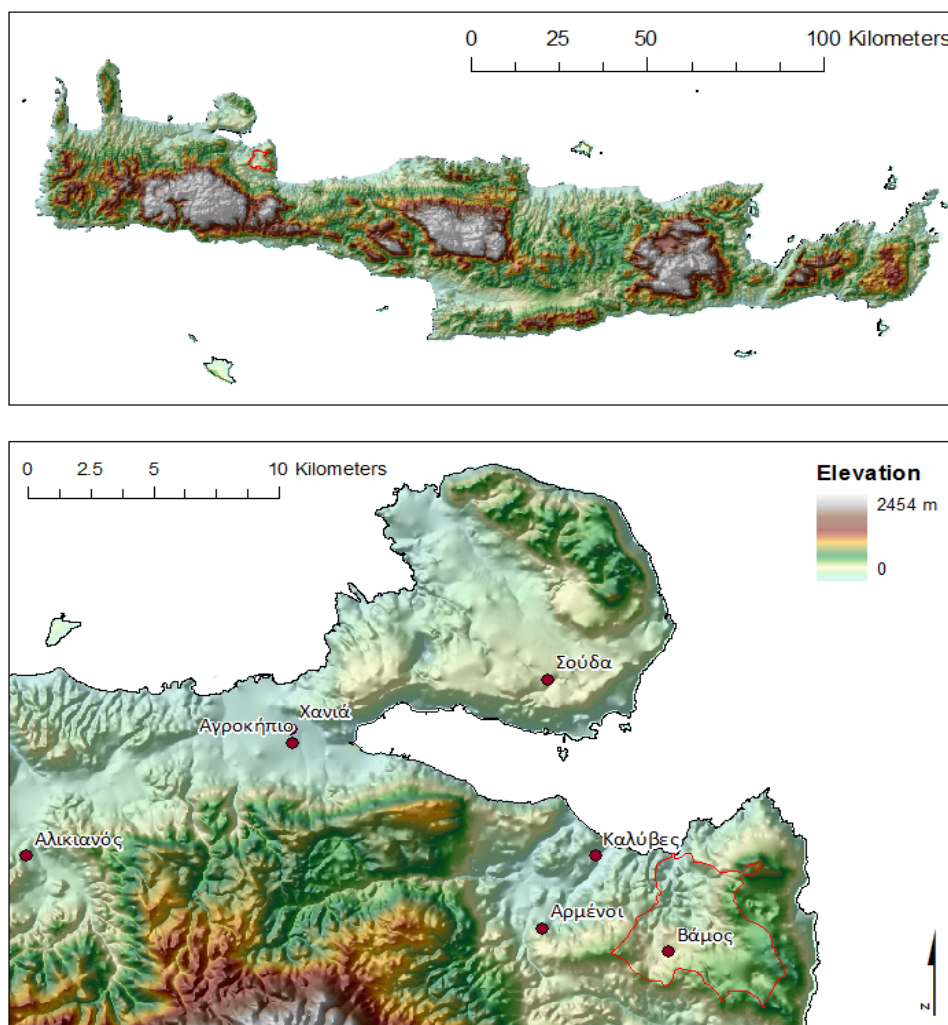
Από πληροφορίες των τοπικών εφημερίδων και πηγών στο διαδίκτυο, έγινε γνωστό ότι τις μεγαλύτερες ζημιές από τη νεροποντή, υπέστη ο νομός Χανίων και κυρίως η περιοχή του Αποκόρωνα. Η νομαρχία Χανίων κήρυξε σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης τους δήμους: Αρμένων, Βάμου, Γεωργιούπολης και Κρυονερίδας. Η Πυροσβεστική Υπηρεσία δέχτηκε δεκάδες κλήσεις για αντλήσεις νερών από υπόγεια σπιτιών και ξενοδοχείων που πλημμύρισαν. Περισσότερα από 14 αυτοκίνητα (τα περισσότερα εκ των οποίων ενοικιαζόμενα) παρέσυρε στη θάλασσα ο χείμαρρος που περνάει από το κέντρο του οικισμού της Αλμυρίδας. Σύμφωνα με στο χείμα από την Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας, ζημιές προκλήθηκαν σε 20 ξενοδοχεία και 60 κατοικίες, ενώ διαπιστώθηκαν εκτεταμένες ζημιές σε πολλά χιλιόμετρα του οδικού δικτύου.

Από το πρωί της 17ης Οκτωβρίου, αγνοούνταν ο 54χρονος Άγγλος υπήκοος David-John Westwell, μόνιμος κάτοικος Γαβαλοχωρίου, στο νομό Χανίων. Το ίδιο μεσημέρι, βρέθηκε το αυτοκίνητό του σε ρέμα που ξεκινάει από το Γαβαλοχώρι, ενώ αργότερα, ύστερα από έρευνες της ΕΜΑΚ, εντοπίστηκαν το μπουφάν του και τα κλειδιά του, που αναγνωρίστηκαν από τη σύζυγό του, σε απόσταση 300 μέτρων από τη θάλασσα. Την επομένη (18 Οκτωβρίου) στις 17:30 τοπική ώρα, βρέθηκε το πτώμα του 54χρονου Άγγλου, στο λιμάνι της Αλμυρίδας, 3 km μακριά από εκεί όπου την προηγούμενη ημέρα είχε βρεθεί το αυτοκίνητό του. Είχε πληγές σε όλο του το σώμα και το κεφάλι από τις πέτρες του ποταμού όπου πνίγηκε. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η περιοχή την επόμενη μέρα από την πλημμύρα.

(<http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1788>)

4.3.2. Προσδιορισμός της βροχόπτωσης

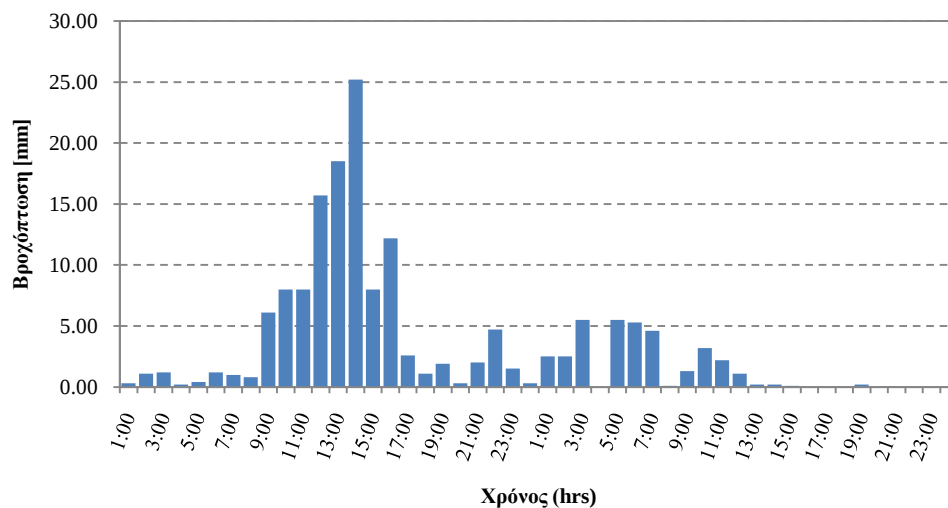
Για τον προσδιορισμό της βροχόπτωσης που δημιούργησε την πλημμύρα της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006 έχουμε δεδομένα από τον βροχομετρικό σταθμό στη Σούδα και στις Καλύβες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι τοποθεσίες των βροχομετρικών σταθμών.



Εικόνα 4.3: Τοποθεσία των βροχομετρικών σταθμών

Ο βροχομετρικός σταθμός της Σούδας δεν βρίσκεται κοντά στην λεκάνη της Αλμυρίδας οπότε τα ωριαία δεδομένα που έχουμε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την προσομοίωση της πλημμύρας. Όμως μπορούμε εξάγουμε πληροφορίες για την χρονική κατανομή της βροχής που θα δημιουργήσουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4



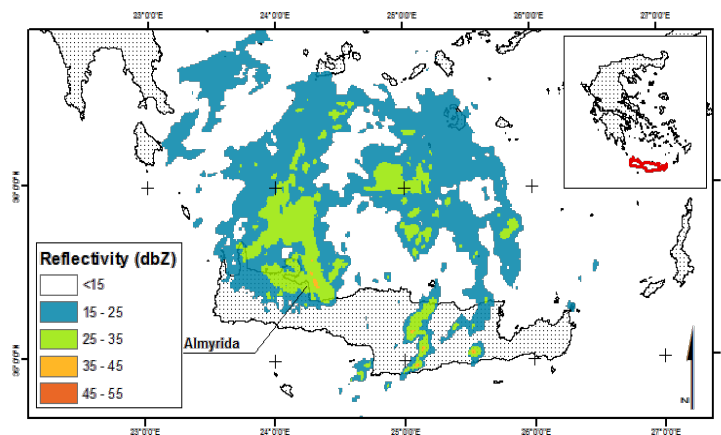
Διάγραμμα 4.1: Ωριαία βροχόπτωση από το σταθμό στη Σούδα στις 17 Οκτωβρίου 2006

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της βροχής 25 mm και εμφανίζεται στις 14:00. Η μέγιστη της βροχής διαρκεί μία ώρα ενώ με βάση το διάγραμμα δεν βρέχει καθόλου μετά της 17:00 την επόμενη μέρα.

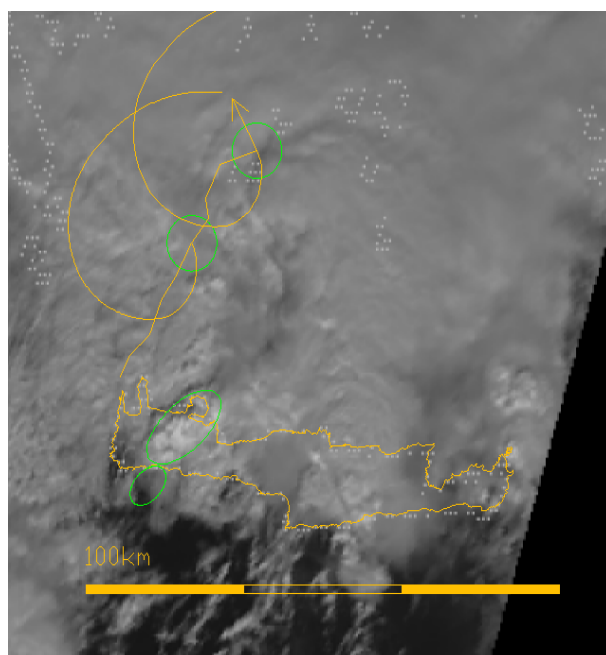
Από τον βροχομετρικό σταθμό στις Καλύβες έχουμε δεδομένα ημερήσια οπότε μπορούμε να γνωρίζουμε την συνολική βροχή που έπεσε αρκετά κοντά στην λεκάνη. Ο σταθμός στις Καλύβες είχε μετρήσει 220 mm την ημέρα που πραγματοποιήθηκε η πλημμύρα.

Εκτός από τα βροχομετρικά δεδομένα χρησιμοποιήσαμε και εικόνες από το METEOSAT και από το C – Band ραντάρ. Με βάση αυτές τις εικόνες προσδιορίσαμε την χρονική στιγμή που εμφανίστηκε η μέγιστη τιμή της βροχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4



Εικόνα 4.4: Εικόνα από το C – Band ραντάρ στις 11:45 πμ



Εικόνα 4.5: Εικόνα από το METEOSAT στην αρχή του φαινομένου

Σύμφωνα με αυτές τις εικόνες η χρονική στιγμή που παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της βροχής είναι 12:00 μμ.

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες από την περιοχή κατά την διάρκεια και μετά από το τέλος του πλημμυρικού γεγονότος. Σύμφωνα με αυτές στην διατομή ελέγχου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού ήταν περίπου 2 m (Εικόνα 4.6) ενώ στις 5:00 μμ η στάθμη του νερού ήταν περίπου 30 cm (Εικόνα 4.7)



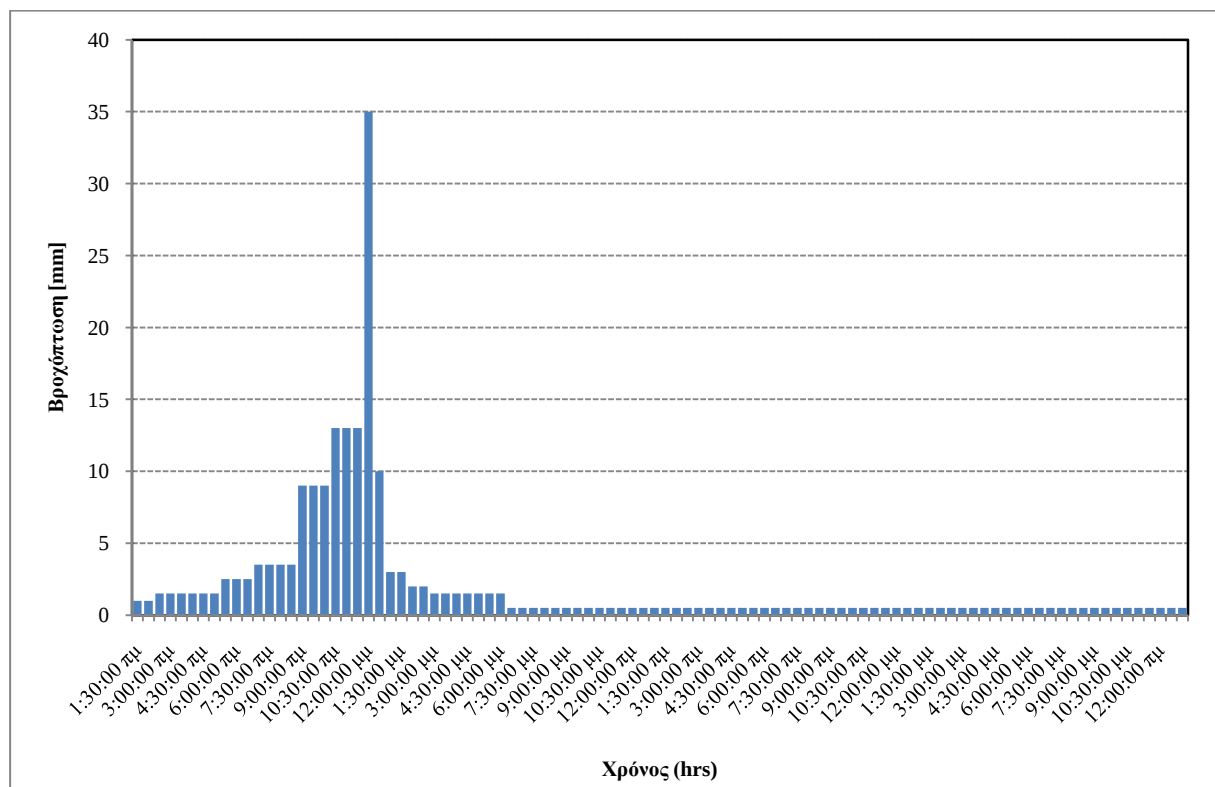
Εικόνα 4.6: Μέγιστη στάθμη νερού στη διατομή ελέγχου
(<http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1785>)



Εικόνα 7: Μέγιστη στάθμη νερού (<http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1785>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες δημιουργήθηκε η παρακάτω τεχνητή χρονοσειρά βροχόπτωσης:



Διάγραμμα 4.2: Τεχνητή χρονοσειρά βροχόπτωσης που δημιουργήθηκε για την πλημμύρα τις 17ης Οκτώβριου 2006

Τα βασικά χαρακτηριστικά της βροχής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά Βροχής	
Έναρξη	17/10/2006 1:30 πμ
Λήξη	19/10/2006 1:00 πμ
Διάρκεια	47.5 (hrs)
Χρονικό βήμα	30 min
Μέγιστη τιμή	35 mm

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά παραγόμενης βροχής

4.3.3. Μέθοδος *Monde Carlo*

Η μέθοδος του Monde Carlo είναι ένας αλγόριθμος που στηρίζεται στην επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για να υπολογίσει τα αποτελέσματά του. Γενικά οι μέθοδοι του Monde Carlo χρησιμοποιούνται συχνά στην προσομοίωση των φυσικών και μαθηματικών συστημάτων. Λόγω της εμπιστοσύνης τους στον επαναλαμβανόμενο υπολογισμό και τους τυχαίους ή ψευδό - τυχαίους αριθμούς, οι μέθοδοι του Monde Carlo είναι πιο κατάλληλη για την πραγματοποίηση των πράξεων από έναν υπολογιστή. Οι μέθοδοι του Monde Carlo συνήθως χρησιμοποιούνται όταν είναι ανέφικτο ή αδύνατο να υπολογιστεί ένα ακριβές αποτέλεσμα με έναν αιτιοκρατικό αλγόριθμο.

Η μέθοδος Monde Carlo χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ενός συνόλου βροχοπτώσεων με σκοπό τον προσδιορισμό του σφάλματος στο διάγραμμα της παροχής και της στάθμης του νερού στην διατομή ελέγχου. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

$$\hat{P} = P \cdot Z_1 + Z_2$$

$$\text{Εάν } \hat{P} < 0 \text{ τότε } \hat{P} = 0$$

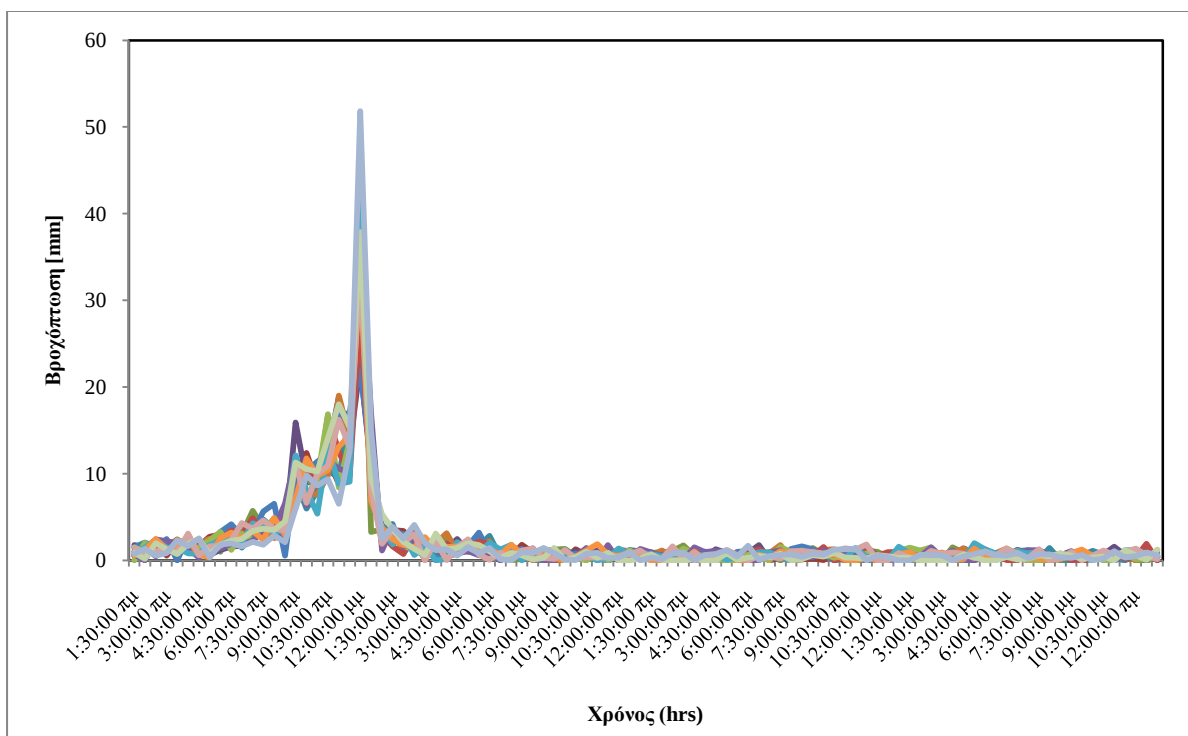
$$0.95 \times \sum P \leq \sum \hat{P} \leq 1.05 \times \sum P$$

Όπου:

P : η αρχική χρονοσειρά βροχόπτωσης

$\hat{P}$: η παραγόμενη χρονοσειρά βροχόπτωσης

Z_1 και Z_2 είναι τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν κανονική κατανομή $Z_1 \in N(1, 0.3)$ και $Z_2 \in N(0, 0.5)$ αντίστοιχα.

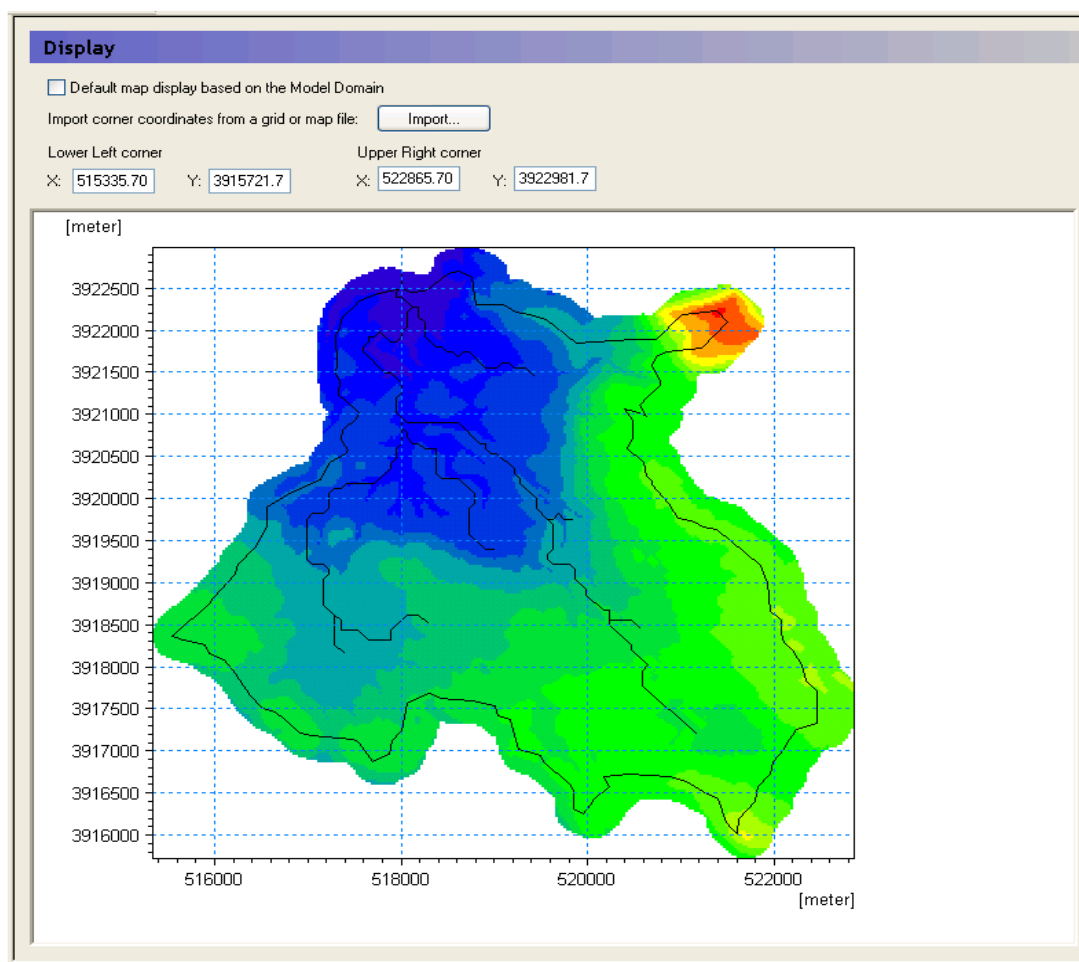


Διάγραμμα 4.3: Σύνολο παραγόμενων βροχοπτώσεων με την μέθοδο Monde Carlo

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Βαθμονόμηση μοντέλου

Στο μοντέλο MIKE SHE αρχικά γίνεται καθορισμός της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό εισάγεται shapefile της περιοχής μελέτης. Έτσι προκύπτει:



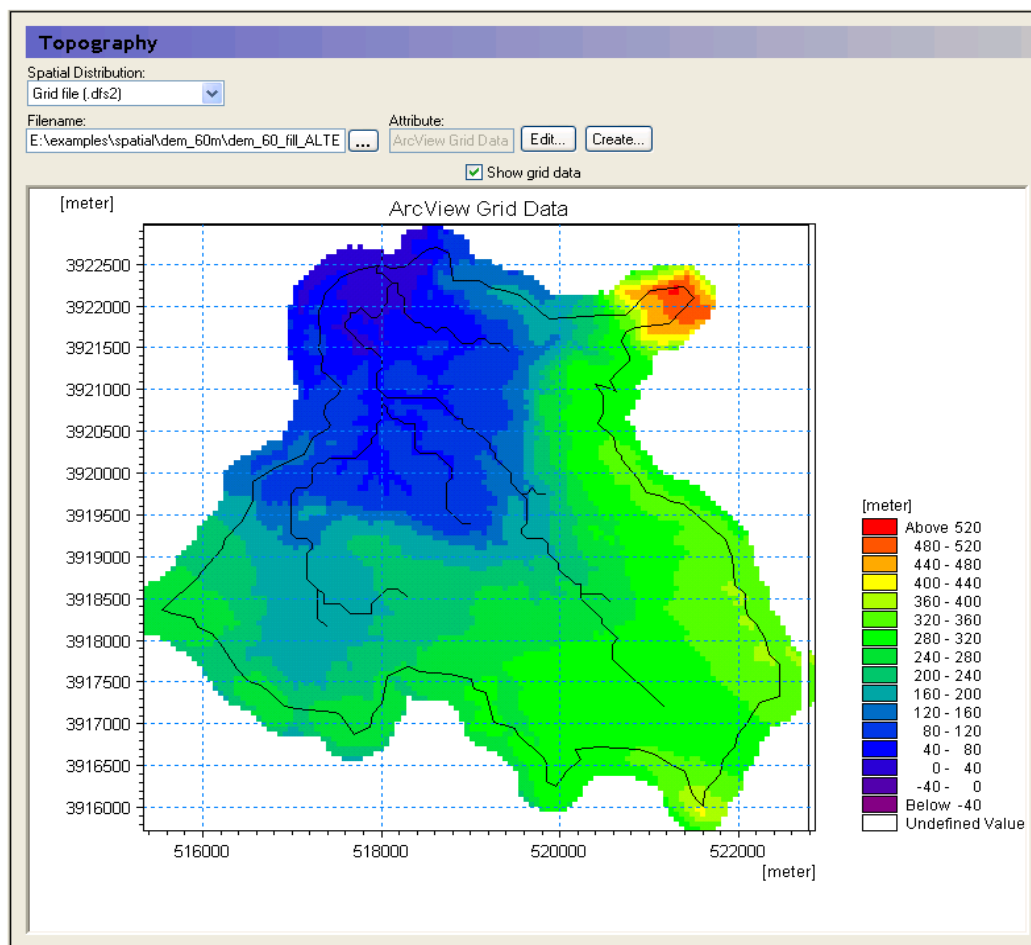
Εικόνα 5.1:: Περιοχή μελέτης στο μοντέλο MIKE SHE

Στη συνέχεια καθορίζονται διάφορες παράμετροι της προσομοίωσης όπως η περίοδος προσομοίωσης, το χρονικό βήμα κλπ. ενώ δημιουργείται και ο κάνναβος όπου θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα.

Initial time step	0.005 hrs
Max allowed OL time step	0.0085 hrs
Max allowed UZ time step	0.0085 hrs
Increment rate (0 – 1)	0.5
Max precipitation depth per time step	30 mm
Max infiltration amount per time step	1 mm
Input precipitation rate requiring its own time step	0.1 mm/hr

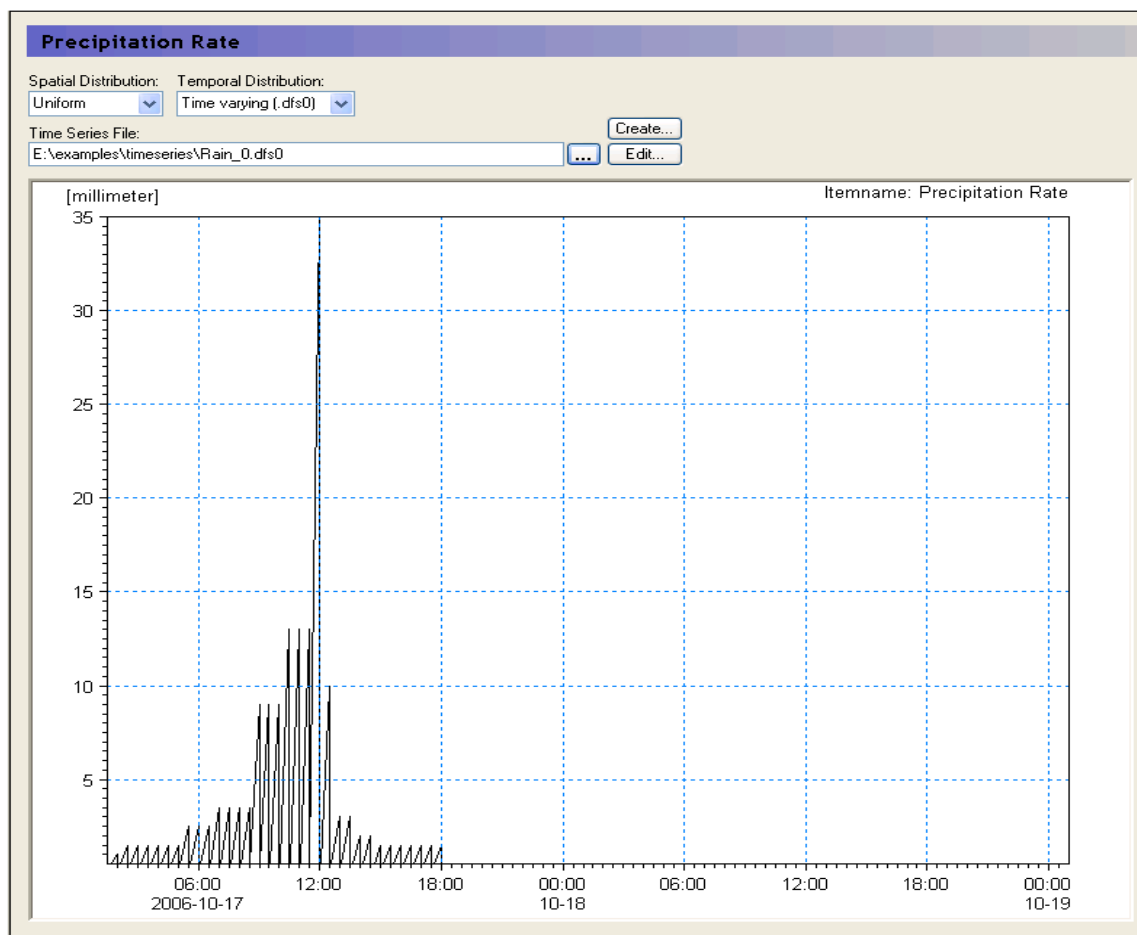
Πίνακας 5.1: Παράμετροι προσομοίωσης

Μετά τον καθορισμό των παραπάνω παραμέτρων προσομοίωσης εισάγεται ένα shapefile που περιέχει τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο shapefile προέκυψε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και χρησιμοποιείται για να αναπαρασταθεί το ανάγλυφο της περιοχής.



Εικόνα 5.2: Τοπογραφία της λεκάνης της Αλμυρίδας

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή της βροχής. Η βροχή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πλημμύρας θεωρείται ομοιόμορφη για όλη την λεκάνη.

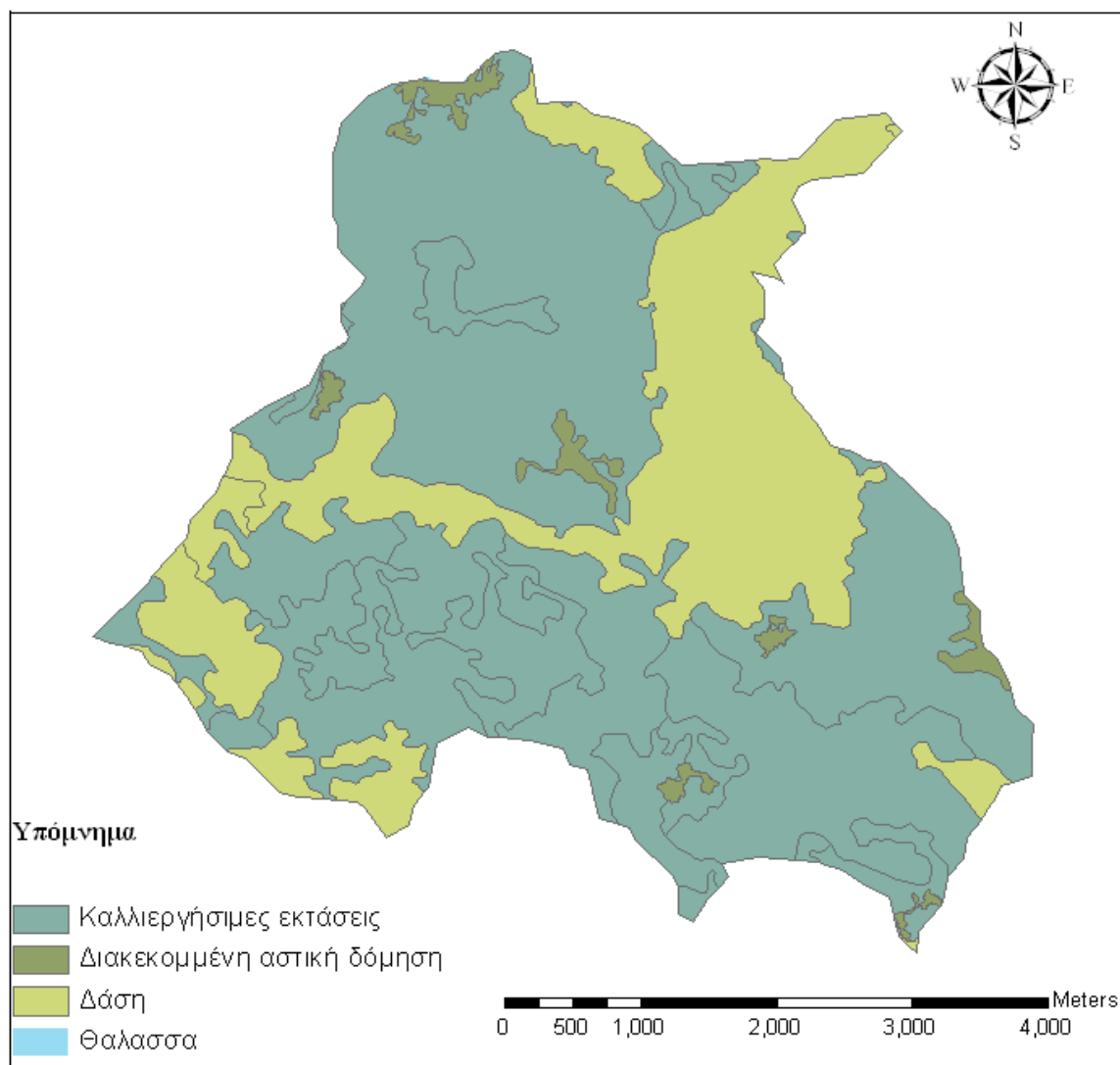


Εικόνα 5.3: Χρονοσειρά βροχής

Μετά την εισαγωγή της βροχής, επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των μεταβλητών που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής καθορίζονται από τις κλίσεις του εδάφους. Για τον καθορισμό του ανάγλυφου της λεκάνης όπως αναφέραμε και παραπάνω εισάγεται ένα shapefile που έχει προκύψει από ένα DEM 60 x 60 m. Επίσης η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιεί ως

δεδομένα τον συντελεστή Strickler/Manning, την επιβράδυνση άφιξης της υπεδάφιας απορροής στο υδρογραφικό δίκτυο (detention storage) και το συντελεστή διαρροής (leakage coefficient). Οι τιμές για τον συντελεστή Strickler/Manning καθορίζονται από την κατηγορία της χρήσεις γης. Οι χρήσεις γης που υπάρχουν στην λεκάνη ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες (καλλιεργήσιμες εκτάσεις, διακεκομμένη αστική δόμηση, δάση) (Εικόνα 5.4). Η ομαδοποίηση έγινε για λόγους ευκολίας όσον αφορά τον προσδιορισμό του συντελεστή Manning. Οι τιμές του Manning που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κατηγορία προήλθαν από την βιβλιογραφία (Chow, V.T., 1959) (Πίνακας 5.2). Όλες μαζί οι τιμές Manning εισήχθησαν στο μοντέλο με αρχείο κάναβου (.dfs2) . Τέλος η παράμετρος detention storage θεωρείται ενιαία για όλη την λεκάνη και ίση με μηδέν δηλαδή θεωρείται ότι δεν υπάρχουν περιοχές όπου το νερό λιμνάζει. Το ίδιο ισχύει και για την παράμετρο leakage coefficient.

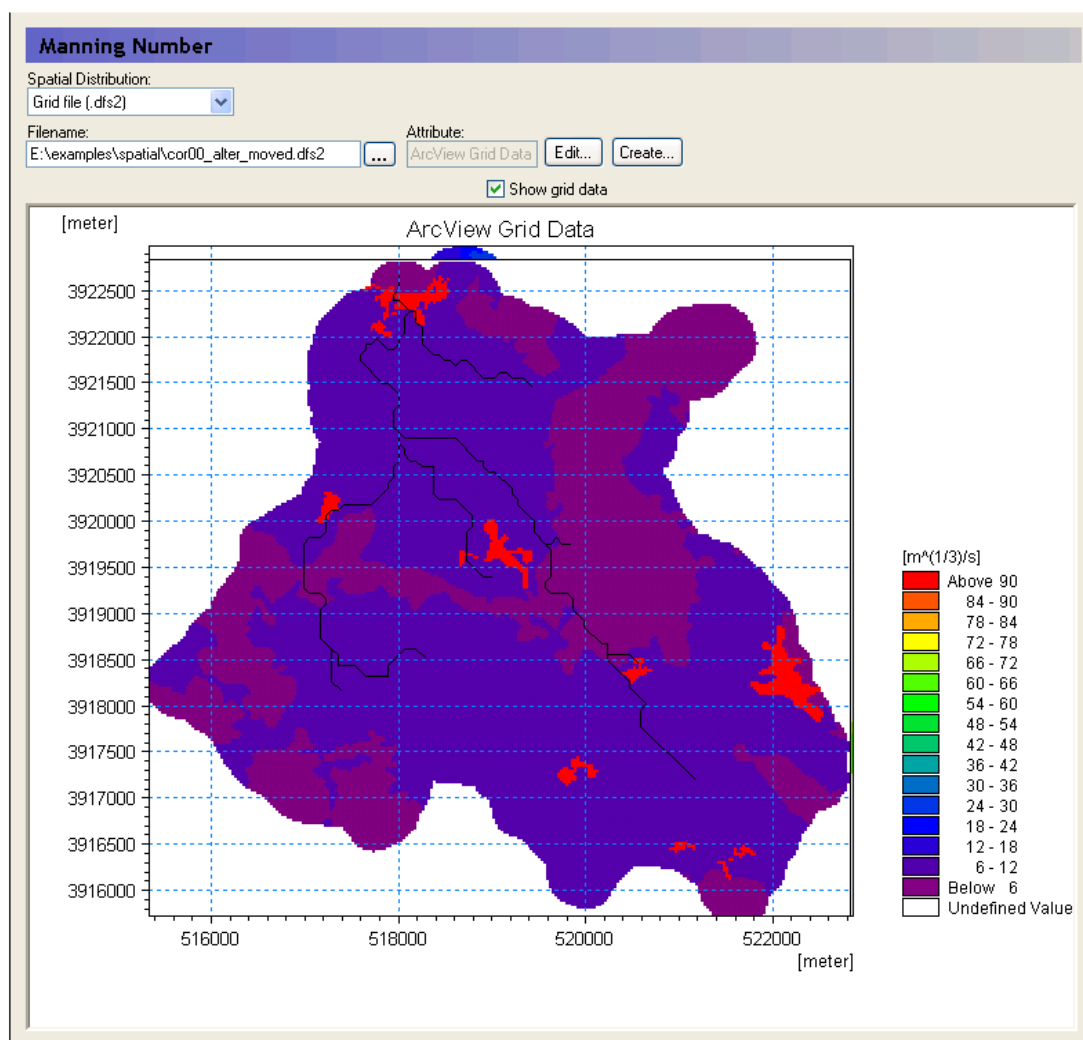
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Εικόνα 5.4: Χρήσεις γης για την λεκάνη της Αλμυρίδας

Καθορισμένες τιμές		
Κατηγορίες χρήσεων γης	Αριθμός Manning n	Αριθμός Manning M (1/n)
Διακεκομμένη αστική δόμηση	0.011	90.9
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	0.15	6.67
Δάση	0.4	2.5

Πίνακας 5.2: Συντελεστής Manning



Εικόνα 5.5: Συντελεστής Manning για την λεκάνη της Αλμυρίδας

Η ροή στην ακόρεστη ζώνη υπολογίζεται με την μέθοδο Two-Layer Water Balance. Όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιεί η μέθοδος θεωρούνται ενιαίες για όλη την επιφάνεια της λεκάνης. Οι τιμές για κάθε παράμετρο δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Water content at saturation	0.4
Water content at field capacity	0.2
Water content at wilting point	0.2
Saturated hydraulic conductivity	$5.5 \cdot 10^{-7}$ m/s

Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης της ακόρεστης ζώνης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Water content at saturation: Είναι η μέγιστη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, συνήθως είναι περίπου ίση με το πορώδες του εδάφους.

Water content at field capacity: Είναι η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατηθεί από το έδαφος πριν το νερό αρχίσει να απορρέει επιφανειακά.

Water content at wilting point: Είναι η ελάχιστη ποσότητα νερού στο έδαφος που μπορεί να απομακρυνθεί από τα φυτά.

Saturated hydraulic conductivity: Είναι ίση με το μέγιστο ρυθμό διήθησης του εδάφους.

Η τιμή της μεταβλητής saturated hydraulic conductivity που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο επιλέχθηκε από τον παρακάτω πίνακα:

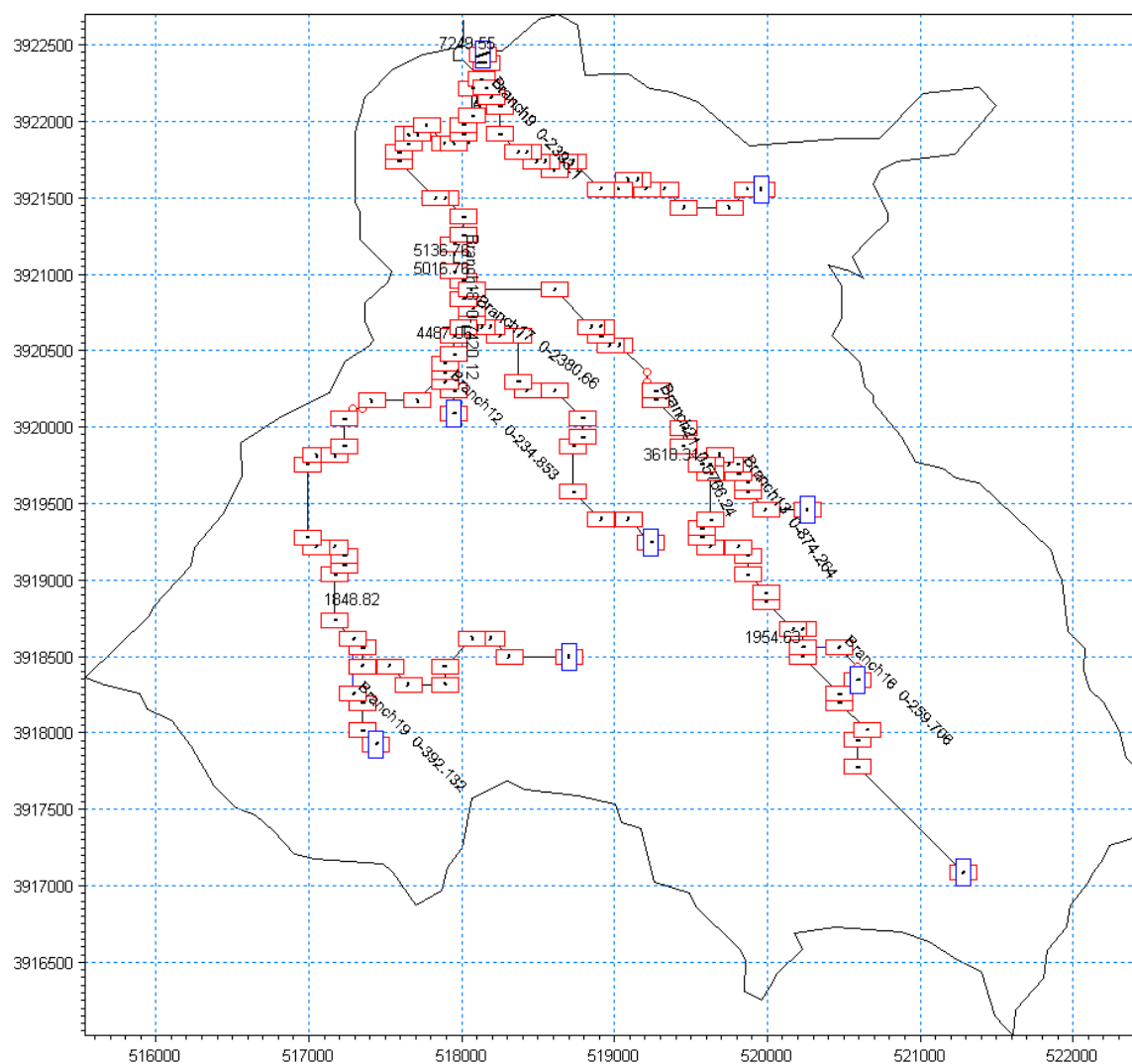
K (cm/s)	10 ²	10 ¹	10 ⁰ =1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
Σχετική Διαπερατότητα	Διαπερατό				Ημι - περατό				Αδιαπέραστο				
Υδροφορέας	Καλός				Φτωχός				Δεν Υπάρχει				
Μη διαστρωματωμένη άμμο και χαλίκι	Καλά ταξινομημένο χαλίκι		Καλά ταξινομημένη άμμο ή άμμος και χαλίκι		Πολύ λεπτή άμμος, ιλύς								

Πίνακας 5.4: Πίνακας τιμών συντελεστών υδραυλικής διαπερατότητας (Πηγή: Bear, 1972)

Η τιμή που επιλέχθηκε σύμφωνα με τον πίνακα αντιστοιχεί σε ημι – περατό έδαφος. Όμως αυτό δεν αντιστοιχεί στο τύπο του εδάφους που υπάρχει στην περιοχή. Η μικρή τιμή της μεταβλητής επιλέχθηκε γιατί είχε προηγηθεί βροχή στην περιοχή πριν το πλημμυρικό γεγονός. Αυτό συνεπάγεται ότι το έδαφος είναι κορεσμένο και δεν θα διηθηθεί μεγάλη ποσότητα νερού στην ακόρεστη και στην συνέχεια κορεσμένη ζώνη.

Για την προσομοίωση του ποταμού στην περιοχή της Αλμυρίδας χρησιμοποιήθηκε το υδραυλικό μέρος του MIKE, το MIKE 11. Εκεί καθορίστηκε πάλι η περιοχή μελέτης ενώ δημιουργήθηκε και το δίκτυο υδατορευμάτων της περιοχής.

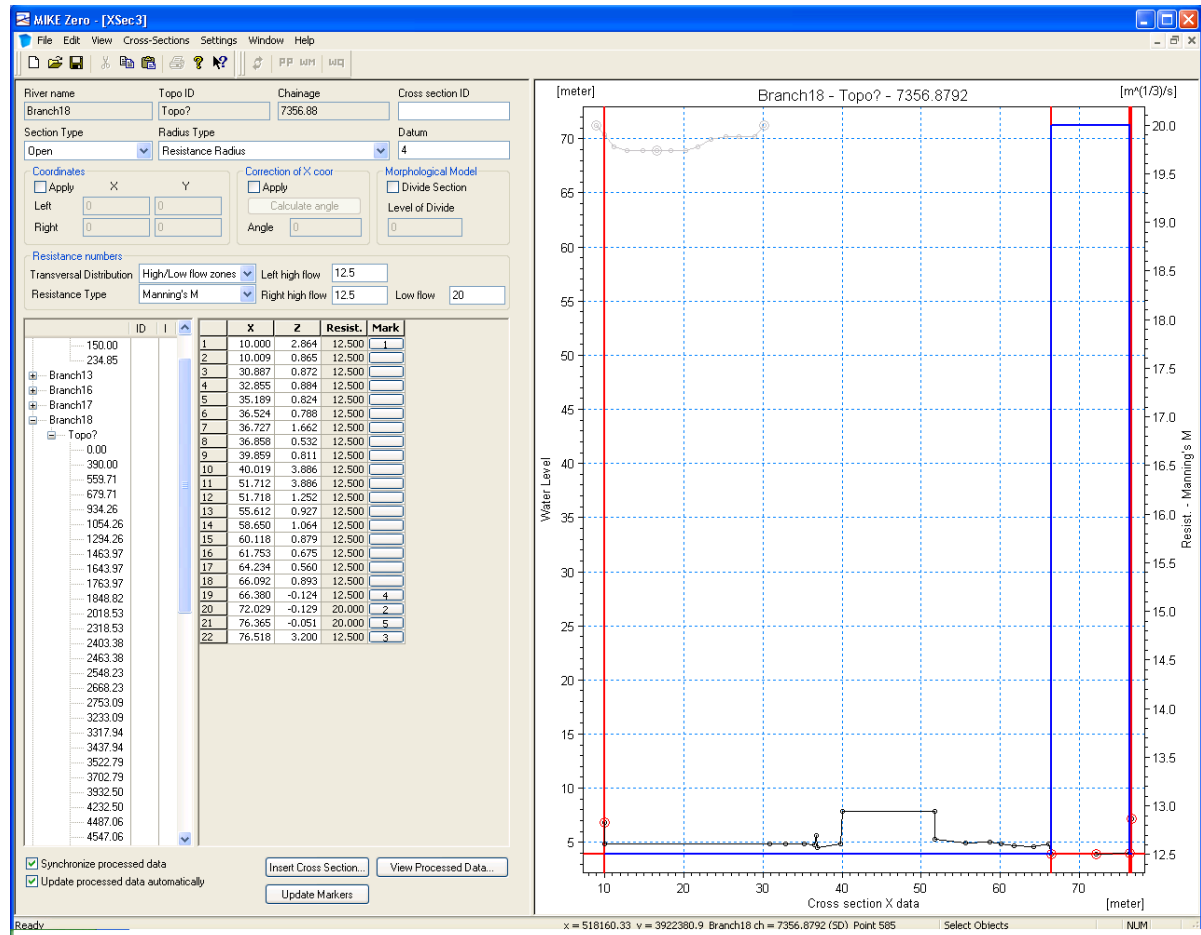
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Εικόνα 5.6: Δίκτυο υδατορευμάτων για την λεκάνη της Αλμυρίδας

Αφού δημιουργήθηκε το δίκτυο υδατορευμάτων, εισήχθησαν οι συνοριακές συνθήκες του κάθε υδατορεύματος. Τέλος για κάθε υδατόρεμα εισήχθησαν διατομές όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4 έτσι ώστε το πρόγραμμα να αποκτήσει μια πληροφορία για τις διατομές. Τα δεδομένα των διατομών προήλθαν από μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο στα πλαίσια μίας προηγούμενης μεταπτυχιακής διατριβής (Τσιτσιλώνης, 2008)

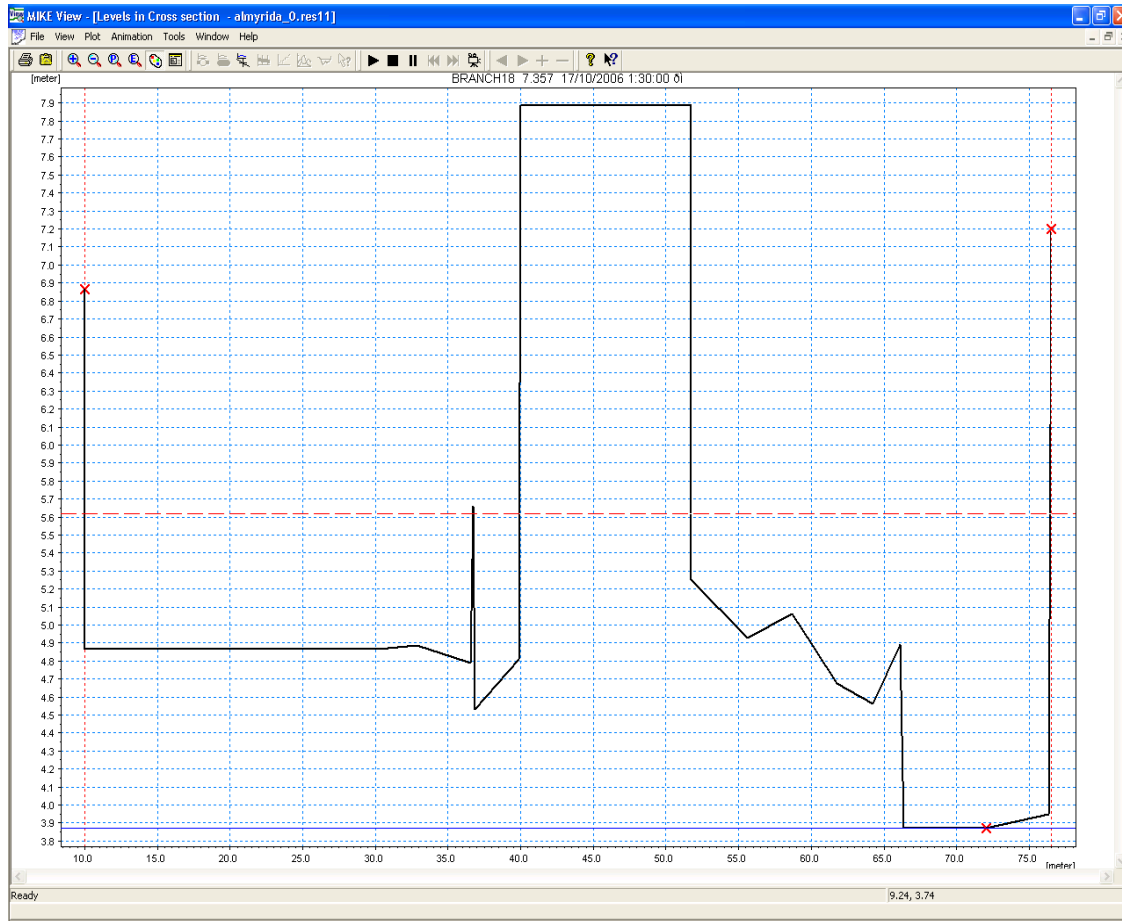
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Εικόνα 5.7: Εισαγωγή δεδομένων για την διατομή ελέγχου

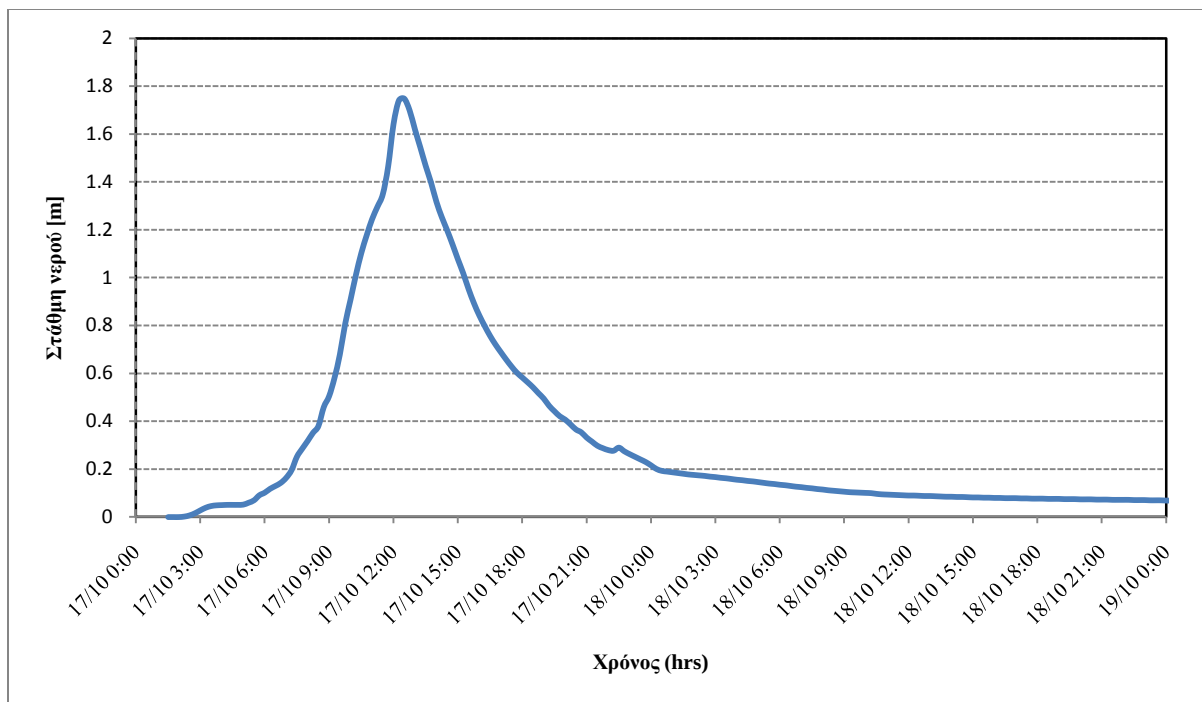
5.2.Αποτελέσματα μοντέλου

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων «τρέχουμε» το μοντέλο το οποίο μας δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα όσον αφορά την στάθμη του νερού και την παροχή. Τα αποτελέσματα είναι για την διατομή ελέγχου.

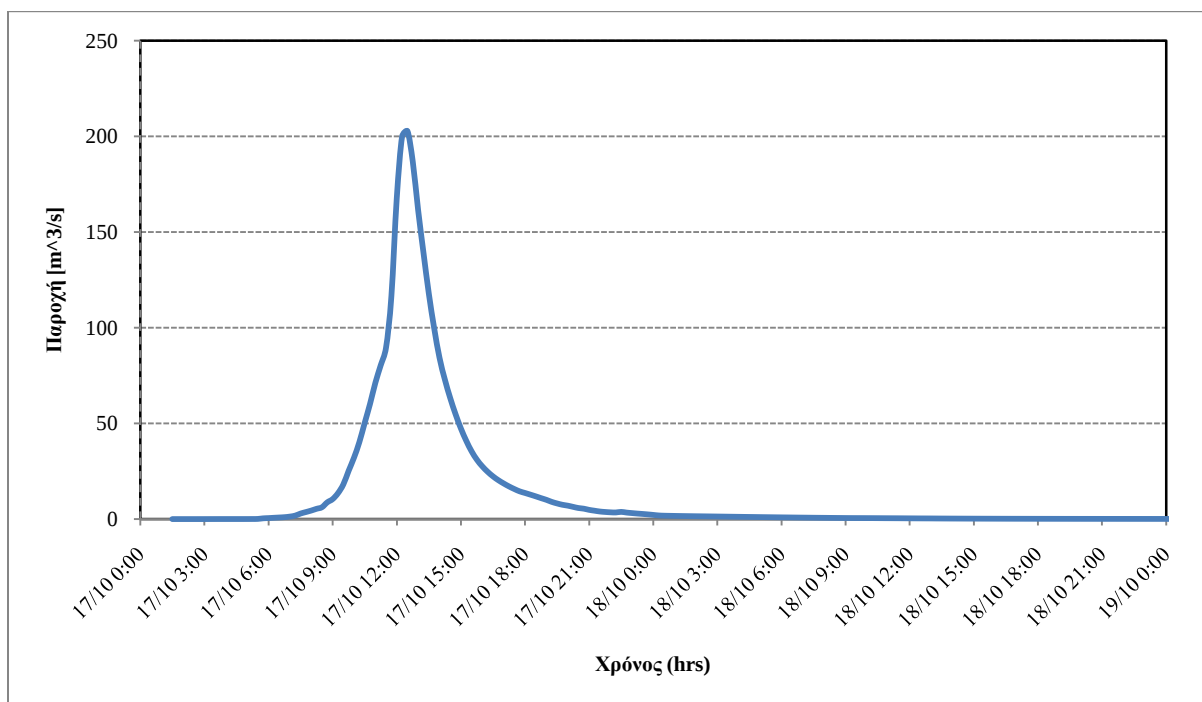


Εικόνα 5.8: Μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού στην διατομή ελέγχου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Διάγραμμα 5.1: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου



Διάγραμμα 5.2: Παροχή νερού στην διατομή ελέγχου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα της στάθμης του νερού και της παροχής παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της στάθμης είναι **1.75 m** και η αντίστοιχη παροχή είναι **202.8 m³/s**. Σύμφωνα με τις μετρήσεις στο πεδίο το δεξί όριο της διατομής, είναι ένας τοίχος, στον οποίο υπήρχε σημάδι που είχε αφήσει η πλημμύρα (floodmark), σε ύψος περίπου 2.20m (Εικόνα 4.6). Το σχετικό σφάλμα που αντιστοιχεί στην τιμή που έδωσε το μοντέλο είναι 20.5%. Η απόκλιση αυτή του μοντέλου, μπορεί να δικαιολογηθεί ως εξής:

1. Στη μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή λόγω εμποδίων (π.χ. πέτρες, ξύλα) που πιθανόν να υπήρχαν γύρω από το σημείο μέτρησης. Η ύπαρξη αυτών των εμποδίων οδήγησε σε πλασματική ανύψωση της στάθμης.
2. Επίσης ένας άλλος παράγοντας στον οποίο μπορεί να οφείλεται η απόκλιση είναι ότι η διατομή ελέγχου βρίσκεται πάνω σε στροφή της κοίτης και το σημείο στο οποίο υπάρχει το flood mark, είναι στην εξωτερική μεριά της «στροφής». Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό κατά τη διάρκεια της πλημμύρας να πέφτει με μεγαλύτερη ορμή στο σημείο αυτό και να αφήνει σημάδι πιο πάνω απ' ότι πραγματικά έφτασε η μέγιστη στάθμη.
3. Τέλος η απόκλιση μπορεί να οφείλεται στην διαφορετική μορφή που είχε η διατομή ελέγχου όταν μετρήθηκε σε σύγκριση με την μορφή που είχε κατά τη διάρκεια της πλημμύρας. Η διατομή είχε καθαριστεί από τα φερτά υλικά όταν μετρήθηκε.

Επίσης σύμφωνα με το διάγραμμα της στάθμης του νερού παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στις 12:30 μμ οπότε η διαφορά με την μέγιστη τιμή της βροχής είναι 30 mm. Ο χρόνος αυτός είναι γνωστός ως χρόνος υστέρησης ή lag time. Τέλος ο συντελεστής επιφανειακής απορροής είναι 0.51 αφού η ποσότητα του νερού που απορρέει επιφανειακά είναι 2.45 Mm³ και η ποσότητα που έβρεξε είναι 4.82 Mm³ (Συντελεστής Απορροής = Απορροή / Βροχόπτωση).

5.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Για να ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου στις αλλαγές των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έγινε ανάλυση ευαισθησίας για κάθε ένα από τα τρία βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (Saturated hydraulic conductivity), τον συντελεστή τραχύτητας Manning της λεκάνης και τον συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα.

Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας στο μοντέλο είναι ίσος με το μέγιστο ρυθμό διήθησης του εδάφους. Τυπικές τιμές που μπορεί να πάρει η συγκεκριμένη μεταβλητή δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

K (cm/s)	10 ²	10 ¹	10 ⁰ =1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
Σχετική Διαπερατότητα	Διαπερατό				Ημι - περατό				Αδιαπέραστο				
Υδροφορέας	Καλός				Φτωχός				Δεν Υπάρχει				
Μη διαστρωματωμέν η άμμο και χαλίκι	Καλά ταξινομημένο χαλίκι		Καλά ταξινομημένη άμμο ή άμμος και χαλίκι		Πολύ λεπτή άμμος, ιλύς								

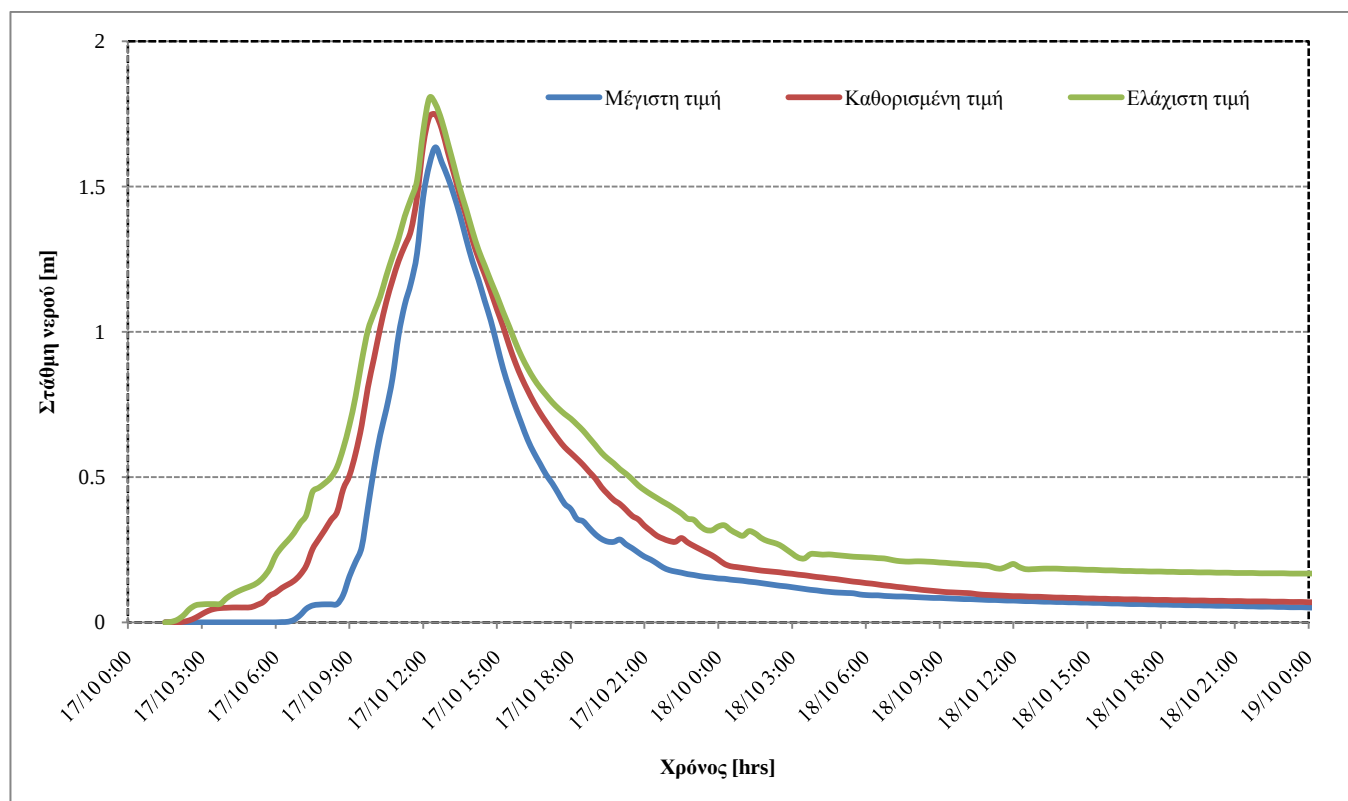
Πίνακας 5.5 Πίνακας τιμών συντελεστών υδραυλικής διαπερατότητας (Πηγή: Bear, 1972)

Στον πίνακα 5.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις διάφορες τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας της υδρολογικής λεκάνης, διατηρώντας τον συντελεστή Manning στη λεκάνη και στο ποτάμι στις βαθμονομημένες τους τιμές.

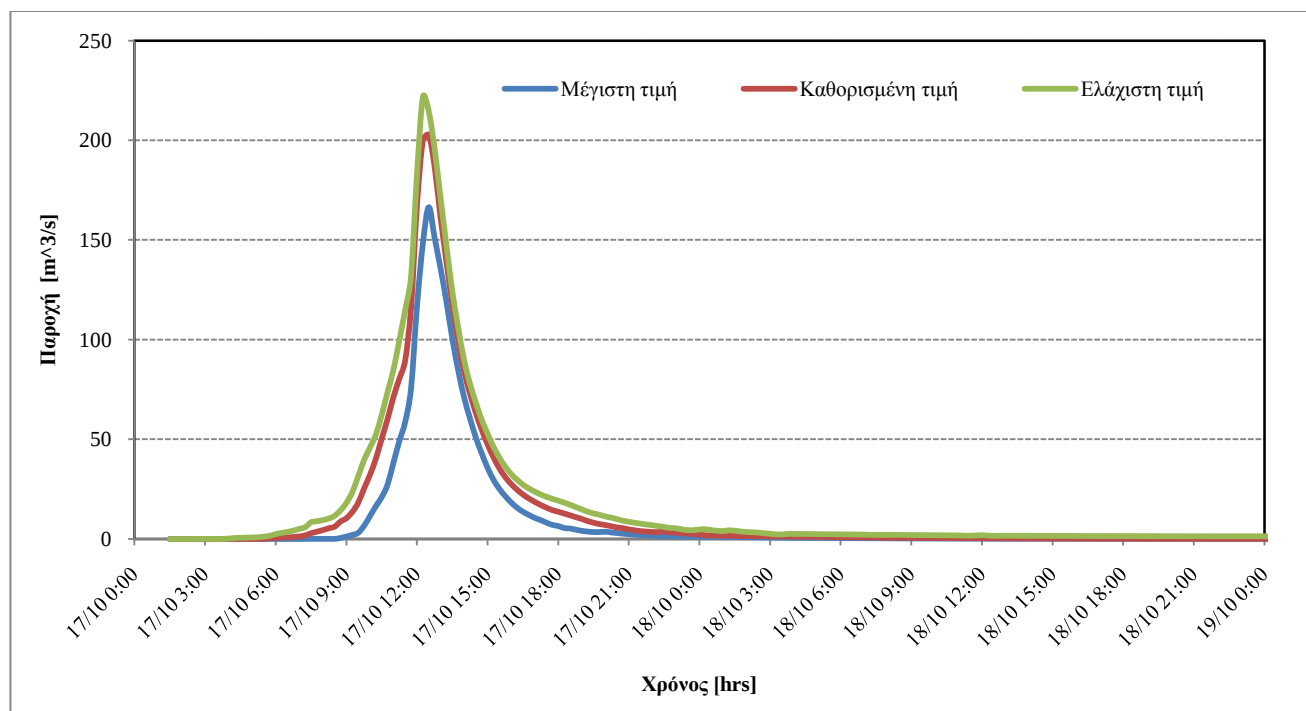
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τιμές	Συντελεστής Υδραυλικής Αγωγιμότητας [m/s]	Χρονική στιγμή μέγιστης τιμής	Μέγιστη τιμή στάθμης του νερού [m]	Παροχή αιχμής [m ³ /s]	Όγκος βροχής [Mm ³]	Όγκος επιφανειακής απορροής [Mm ³]	Συντελεστής επιφανειακής απορροής
Ελάχιστη	$2.2 \cdot 10^{-7}$	17/10/2006 12:15	1.8	221.6	4.82	3.02	0.63
Καθορισμένη	$5.5 \cdot 10^{-7}$	17/10/2006 12:30	1.75	202.8	4.82	2.45	0.51
Μέγιστη	$1.36 \cdot 10^{-6}$	17/10/2006 12:30	1.64	166.4	4.82	1.68	0.35

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας



Διάγραμμα 5.3: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας



Διάγραμμα 5.4: Παροχή του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας

Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όσο μειώνουμε τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας αυξάνεται η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού. Το ίδιο συμβαίνει και για την παροχή αιχμής. Συγκεκριμένα η μείωση του συντελεστή κατά 60 % συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης τιμής της στάθμης κατά 3.1 % και της παροχής αιχμής κατά 8.5 %. Αντίθετα η αύξηση του συντελεστή κατά 60 % προκαλεί μείωση της μέγιστης τιμής της στάθμης κατά 6.5 % και της παροχής αιχμής κατά 18 %. Τέλος με την αύξηση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας έχουμε μείωση του συντελεστή επιφανειακής απορροής κατά 31 % ενώ με την μείωση του συντελεστή έχουμε αύξηση του συντελεστή επιφανειακής απορροής κατά 19 %. Η μεταβολή αυτή του συντελεστή επιφανειακής απορροής φαίνεται και οπτικά από το διάγραμμα της παροχής καθώς μεταβάλλεται το εμβαδό που βρίσκεται μεταξύ της καμπύλης και του άξονα x. Το εμβαδό αυτό απεικονίζει τον όγκο του νερού που απορρέει επιφανειακά στην λεκάνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συντελεστής Υδραυλικής Αγωγιμότητας	Αύξηση 60%	Μείωση 60%
Στάθμη νερού [m]	-6.5 %	3.1 %
Παροχή [m ³ /s]	-18 %	8.5%
Συντελεστής Επιφανειακής Απορροής	-31 %	19 %

Πίνακας 5.7: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για διάφορες τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας

Συντελεστής τραχύτητας Manning στην λεκάνη

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning στην λεκάνη επηρεάζει κυρίως τον χρόνο απόκρισης της λεκάνης απορροής. Οι τιμές που παίρνει καθορίζονται από την κατηγορία της χρήσης γης. Στον πίνακα 5.7 δίνονται ενδεικτικές τιμές Manning για κάθε κατηγορία χρήσεως γης.

ΤΥΠΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	n
Ομαλές επιφάνειες – σκυρόδεμα, ασφαλτός, αμμοχάλικα ή γυμνό χώμα (που συμπιέζεται)	0.011
Αγρανάπαυση – χωρίς υπολείμματα (γυμνά, οργωμένο χώμα)	0.05
Καλλιεργημένα χώματα	
Κάλυψη υπολειμμάτων < 20 %	0.06
Κάλυψη υπολειμμάτων > 20 %	0.17
Χλόη	
Χαμηλή βλάστηση	0.15
Πυκνή βλάστηση	0.24
Βλάστηση σε σειρά	0.13
Σκληροφυλική βλάστηση	
Ελαφριά Θαμνώδης	0.40
Πυκνά Θαμνώδης	0.80

Πίνακας 5.8: Συντελεστής τραχύτητας Manning επιπέδων ροής για διάφορους τύπους επιφανειών (Πηγή: Chow, V.T., 1959)

Για την περιοχή μελέτης χρησιμοποιούμε αρχείο Καννάβου (.dfs2) το οποίο περιέχει τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning για τις τρεις κατηγορίες χρήσεων γης (εκτενής ανάλυση για την επιλογή των τριών κατηγοριών έγινε στην παράγραφο 5.1). Με βάση τις καθορισμένες τιμές δημιουργήθηκαν άλλα δύο αρχεία Καννάβου για την υδρολογική λεκάνη. Το πρώτο αρχείο περιέχει τις μέσες τιμές για κάθε κατηγορία ενώ το δεύτερο αρχείο περιέχει την μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία. Ο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

λόγος που δημιουργήθηκε ένα αρχείο με τις μέσες τιμές για κάθε κατηγορία είναι ότι έχουμε επιλέξει καθορισμένη τιμή την μικρότερη τιμή για κάθε κατηγορία χρήσεως γης. Τέλος και στα τρία αρχεία Καννάβου χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος συντελεστής τραχύτητας Manning για την διακεκομμένη αστική δόμηση γιατί η κατηγορία αυτή δεν έχει κάποιο εύρος τιμών αλλά συγκεκριμένη τιμή.

Συντελεστής τραχύτητας Manning			
Κατηγορίες χρήσεων γης	Καθορισμένη τιμή (Ελάχιστη τιμή)	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Διακεκομμένη αστική δόμηση	0.011	0.011	0.011
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	0.15	0.19	0.24
Δάση	0.4	0.6	0.8

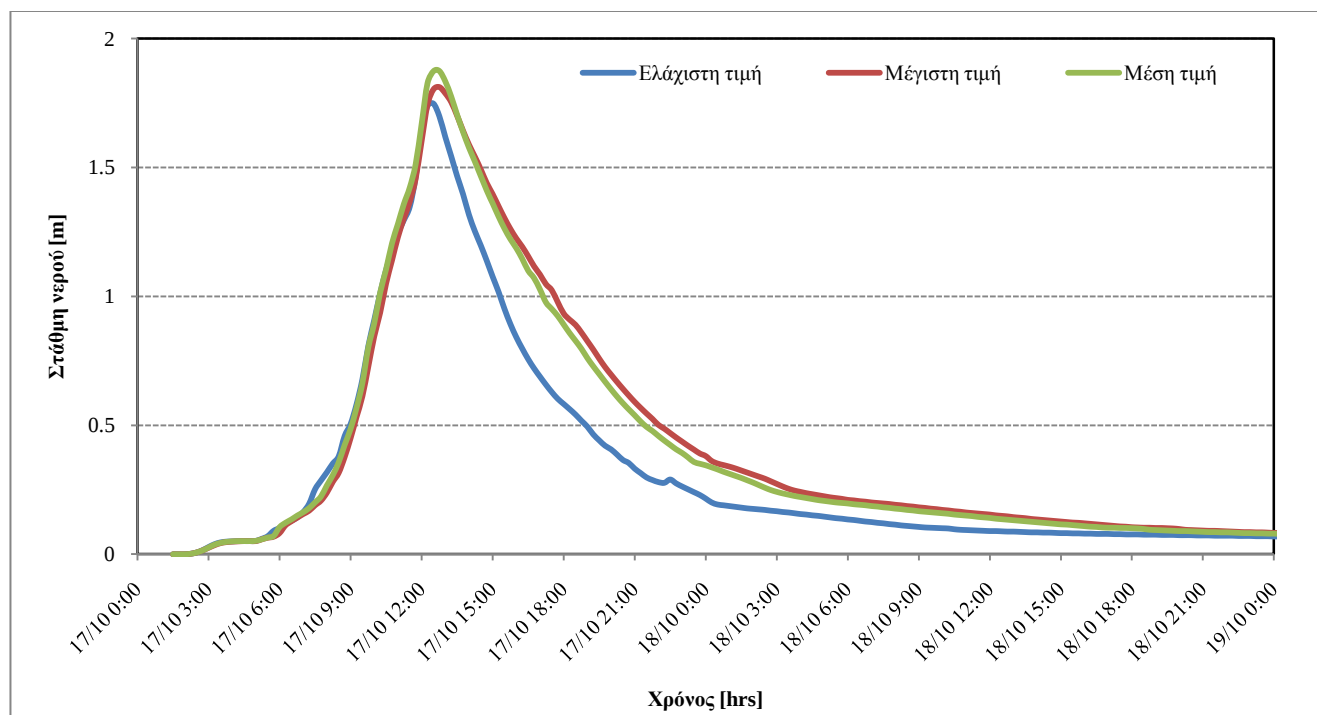
Πίνακας 5.9 Συντελεστές τραχύτητας Manning για τα τρία αρχεία Καννάβου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τρία αρχεία Καννάβου που χρησιμοποιήσαμε:

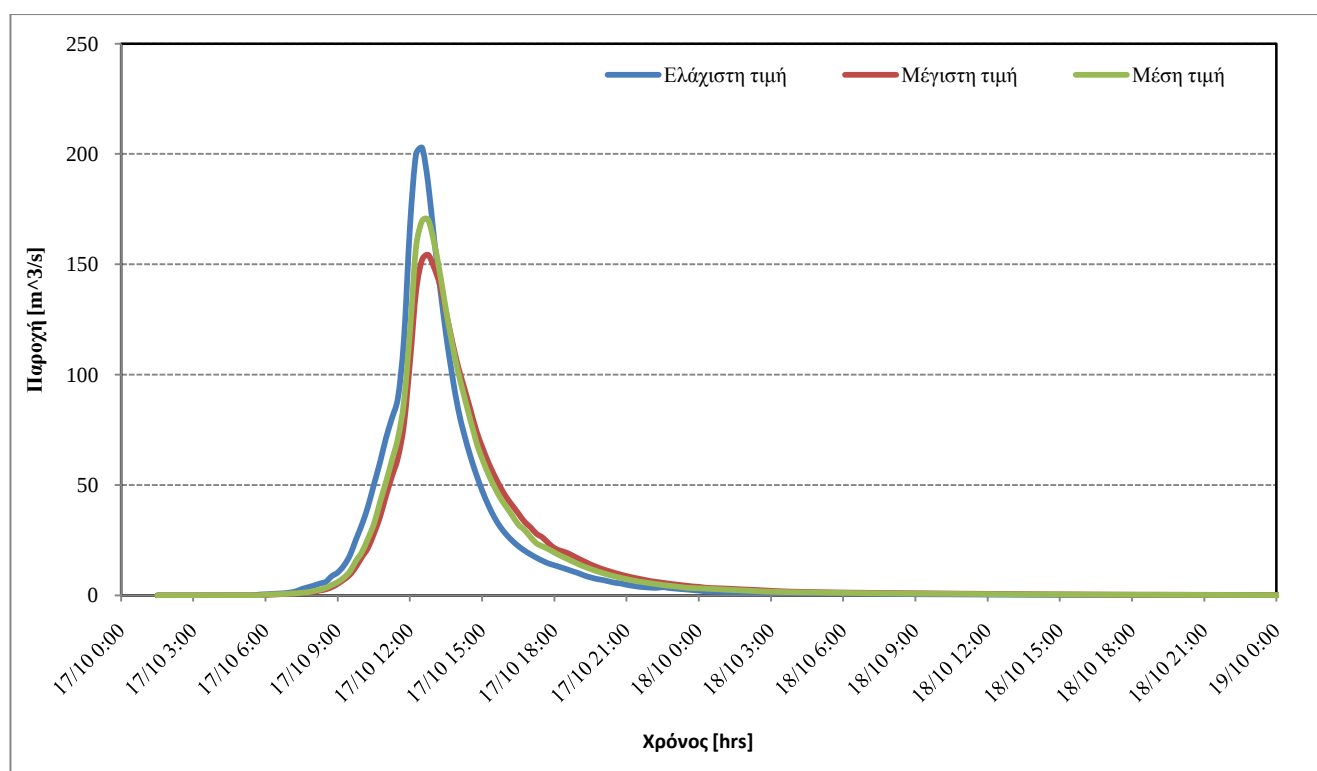
Συντελεστές τραχύτητας Manning	Χρονική στιγμή μέγιστης τιμής	Μέγιστη τιμή Στάθμης του νερού [m]	Παροχή αιχμής [m^3/s]	Όγκος βροχής [Mm^3]	Όγκος επιφανειακής απορροής [Mm^3]	Συντελεστής επιφανειακής απορροής	Χρόνος υστέρησης [min]
Καθορισμένη τιμή (Ελάχιστη τιμή)	17/10/2006 12:30	1.75	202.8	4.82	2.45	0.51	30
Μέση τιμή	17/10/2006 12:45	1.9	170.2	4.82	2.41	0.50	45
Μέγιστη τιμή	17/10/2006 12:45	1.8	154.3	4.82	2.41	0.50	45

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Διάγραμμα 5.5: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη



Διάγραμμα 5.6: Παροχή νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη

Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας Manning στην λεκάνη προκαλεί αύξηση της μέγιστης στάθμης του νερού και μείωση της παροχής αιχμής. Έτσι έχουμε 6 % αύξηση της μέγιστης τιμής της στάθμης του νερού για τις μέγιστες τιμές του συντελεστή τραχύτητας και μείωση 24 % στην παροχή αιχμής. Για την μέση τιμή του συντελεστή τραχύτητας η μέγιστη στάθμη του νερού αυξάνεται περισσότερο (12 %) ενώ και η παροχή αιχμής μειώνεται περισσότερο (24 %). Επίσης με την μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας μεταβάλλεται και ο χρόνος υστέρησης (lag time) της λεκάνης από 30 min σε 45 min. Αυτή η μεταβολή ήταν αναμενόμενη αφού όπως αναφέραμε και πιο πριν ο συντελεστής τραχύτητας του Manning επηρεάζει τον χρόνο απόκρισης της λεκάνης απορροής. Τέλος η μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας Manning δεν φαίνεται να επηρεάζει το συντελεστή επιφανειακής απορροής καθώς παραμένει αμετάβλητος.

Συντελεστής τραχύτητας Manning	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Στάθμη νερού [m]	12 %	6 %
Παροχή [m^3/s]	-16 %	-24 %
Συντελεστής Επιφανειακής Απορροής	Αμετάβλητος	Αμετάβλητος

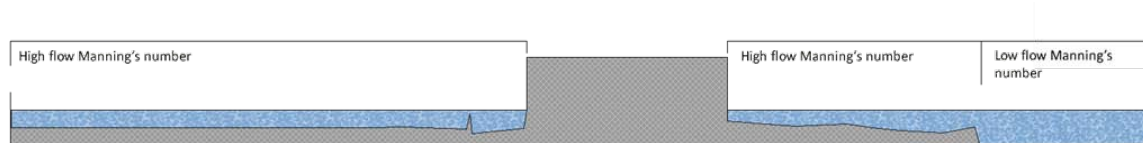
Πίνακας 5.11: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα τρία αρχεία του συντελεστή τραχύτητας Manning

Συντελεστής τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα επηρεάζει κυρίως το ύψος της στάθμης του νερού. Οι τιμές που παίρνει καθορίζονται από την μορφολογία του υδατορεύματος δηλαδή την ύπαρξη εμποδίων όπως είναι οι πέτρες και τα ξύλα. Η τιμή την οποία χρησιμοποιήσαμε για την βαθμονόμηση του μοντέλου είναι 0.05 για όλο το υδατόρευμα εκτός από ένα κομμάτι του υδατορεύματος που βρίσκεται μέσα στον

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

οικισμό της Αλμυρίδας. Σε αυτό το κομμάτι θεωρήσαμε δύο τιμές, μία για τα ψηλά μέρη των διατομών ($n = 0.08$) και άλλη για τα χαμηλότερα ($n = 0.05$). Στην Εικόνα 5.7 φαίνεται σχηματικά αυτός ο διαχωρισμός για την διατομή ελέγχου.



Εικόνα 5.9: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών του συντελεστή τραχύτητας Manning για την διατομή ελέγχου.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας.

Συντελεστής τραχύτητας Manning			
	Ελάχιστη τιμή	Καθορισμένη τιμή	Μέγιστη τιμή
Ενιαία τιμή	0.03	0.05	0.08
Χαμηλά μέρη των διατομών	0.03	0.05	0.08
Ψηλά μέρη των διατομών	0.05	0.08	0.1

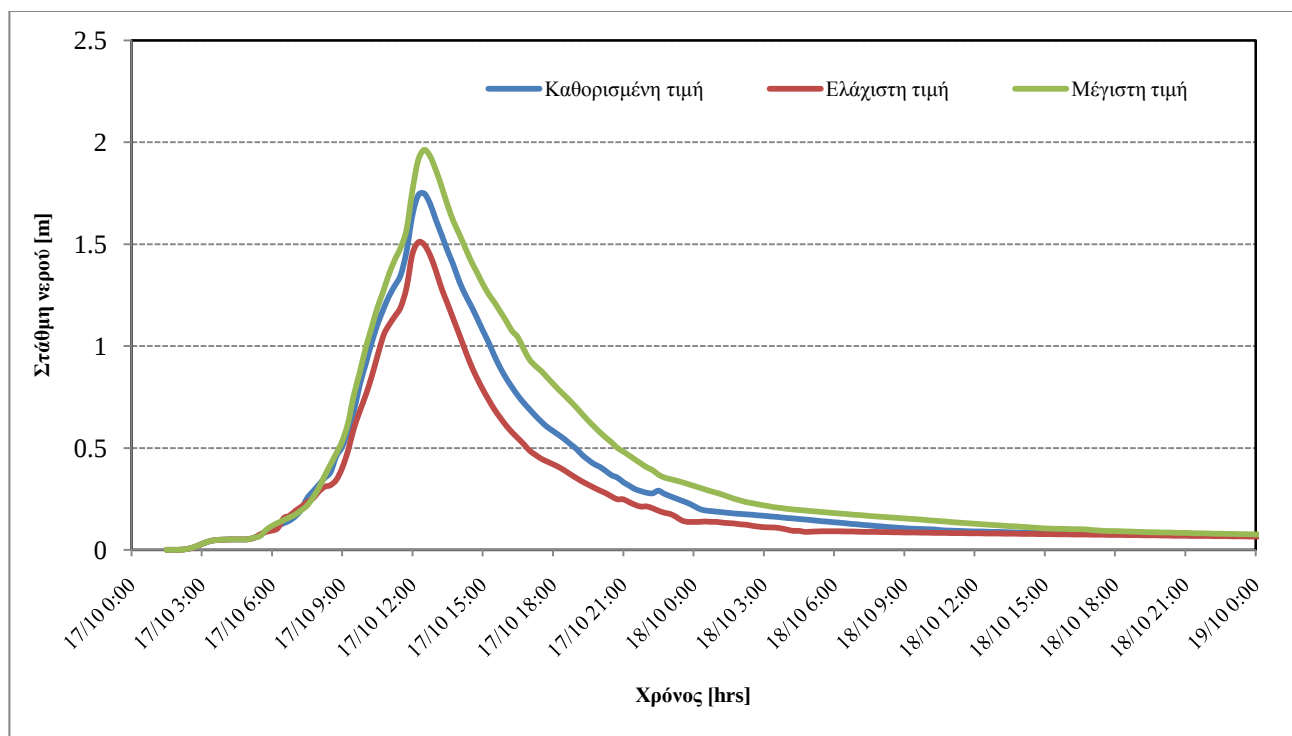
Πίνακας 5.12: Συντελεστές τραχύτητας Manning για το υδατόρεμα

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητα Manning στο υδατόρεμα:

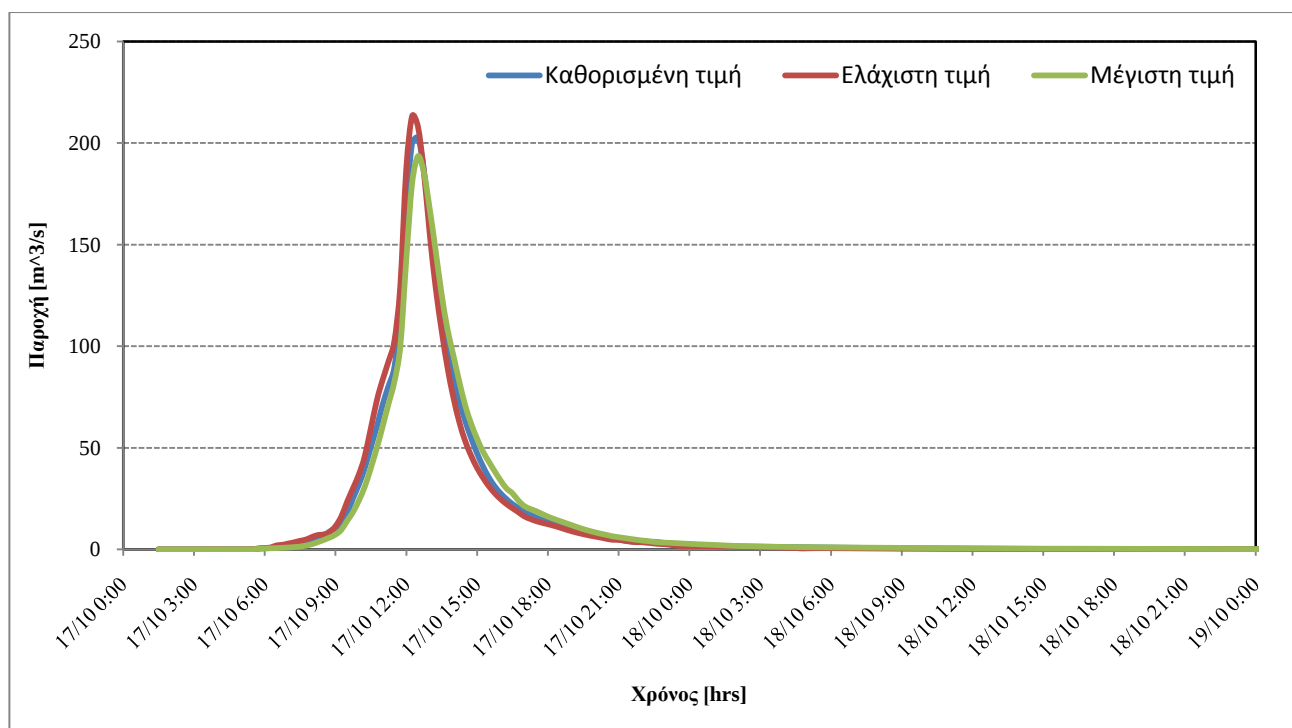
Συντελεστής τραχύτητας Manning	Χρονική στιγμή μέγιστης τιμής	Μέγιστη τιμή Στάθμης του νερού [m]	Παροχή αιχμής [m^3/s]	Όγκος βροχής [Mm^3]	Όγκος επιφανειακής απορροής [Mm^3]	Συντελεστής επιφανειακής απορροής	Χρόνος υστέρησης [min]
Ελάχιστη τιμή	17/10/2006 12:15	1.5	213.2	4.82	2.45	0.51	15
Καθορισμένη τιμή	17/10/2006 12:30	1.75	202.8	4.82	2.45	0.51	30
Μέγιστη τιμή	17/10/2006 12:30	1.96	193.5	4.82	2.45	0.51	30

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τον συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρεμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Διάγραμμα 5.7:: Στάθμη του νερού στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα



Διάγραμμα 5.8: Παροχή στην διατομή ελέγχου για διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα

Συμπεράσματα

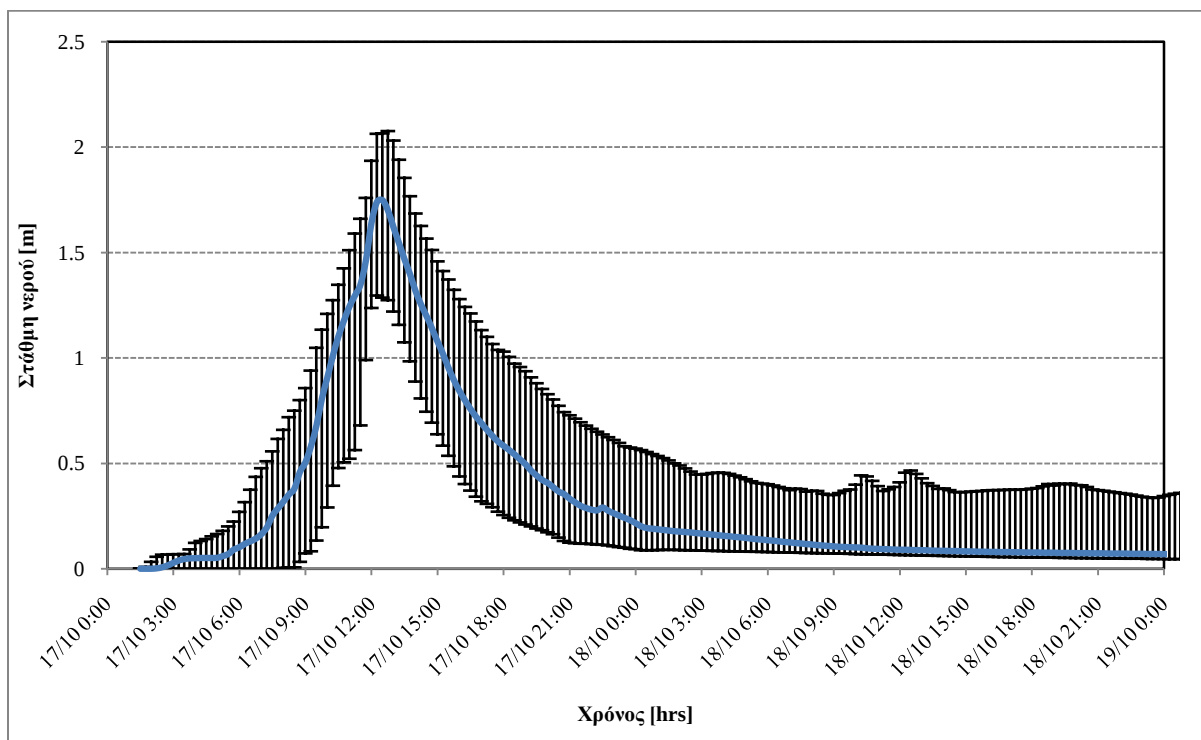
Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα επηρεάζει κυρίως την μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού και πολύ λιγότερο την παροχή αιχμής. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή του συντελεστή τραχύτητας προκαλεί την αύξηση της μέγιστης τιμής της στάθμης του νερού κατά 12 % και την μείωση της παροχής αιχμής κατά 4.6%. Αντίθετα η μείωση του συντελεστή έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού κατά 14.3 % και να αυξηθεί η παροχή αιχμής κατά 5 %. Επίσης ο χρόνος υστέρησης (lag time) μειώθηκε κατά 15 min όταν χρησιμοποιήσαμε την ελάχιστη τιμή του συντελεστή ενώ παρέμεινε αμετάβλητος για την μέγιστη τιμή του συντελεστή. Τέλος ο συντελεστής επιφανειακής απορροής δεν φάνηκε να επηρεάζεται από την μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα.

Συντελεστής Manning	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Στάθμη νερού [m]	-14.3 %	12 %
Παροχή [m^3/s]	5 %	-4.6 %
Συντελεστής Επιφανειακής Απορροής	Αμετάβλητος	Αμετάβλητος

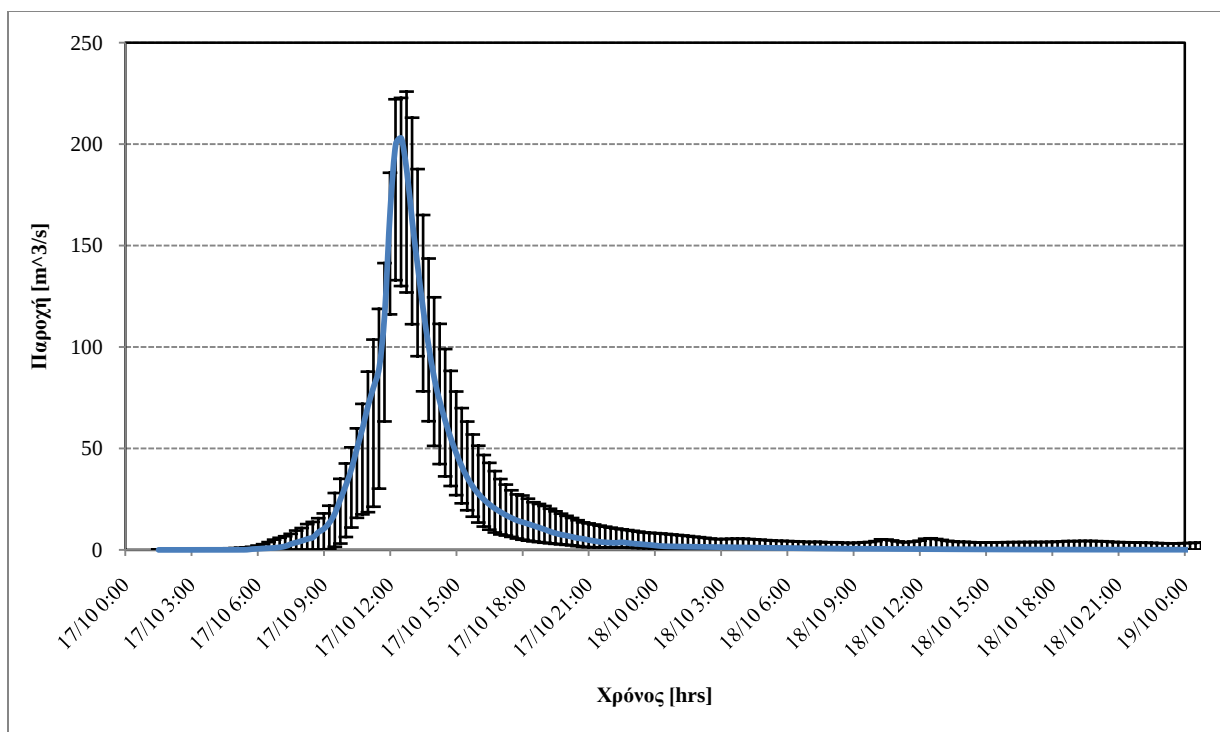
Πίνακας 5.14: Συνοπτική παρουσίαση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning στο υδατόρευμα

5.4.Αποτελέσματα μεθόδου Monde Carlo

Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου και την ανάλυση ευαισθησίας για τις τρεις παραμέτρους προσδιορίστηκε το σφάλμα στο διάγραμμα της στάθμης του νερού και της παροχής στην διατομή ελέγχου. Για το λόγο αυτό αρχικά δημιουργήθηκε ένα σύνολο χρονοσειρών βροχής με την μέθοδο Monde Carlo (αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου έγινε στην παράγραφο 4.3.3). Στην συνέχεια για κάθε χρονοσειρά βροχής γινόταν προσομοίωση του γεγονότος δύο φορές. Έτσι στην πρώτη περίπτωση γινόταν η προσομοίωση με τις ελάχιστες τιμές των τριών παραμέτρων που έγινε η ανάλυση ευαισθησίας ενώ στην δεύτερη περίπτωση η προσομοίωση γινόταν με τις μέγιστες τιμές. Συνολικά δημιουργήθηκαν 15 χρονοσειρές βροχής και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.9: Διακύμανση της στάθμης του νερού στη διατομή ελέγχου για το σύνολο των βροχοπτώσεων



Διάγραμμα 5.10: Διακύμανση της παροχής του νερού στη διατομή ελέγχου για το σύνολο των βροχοπτώσεων

Με βάση τα διαγράμματα της στάθμης του νερού και της παροχής καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού κυμαίνεται από 1.3 έως 2.1 m ενώ η τιμή της παροχής αιχμής από $130 \text{ m}^3/\text{s}$ έως $223 \text{ m}^3/\text{s}$. Το σχετικό σφάλμα για την τιμή της μέγιστης στάθμης του νερού κυμαίνεται από 20 % έως 25.7% και το αντίστοιχο για την παροχή αιχμής κυμαίνεται από 10 % έως 35.9 %.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1. Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή αποτέλεσε μία προσπάθεια προσέγγισης της αστραπιαίας πλημμύρας που πραγματοποιήθηκε στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας, με βασικότερο στοιχείο την αντιμετώπιση της έλλειψης στοιχείων, τόσο για την προσομοίωση όσο και για την βαθμονόμηση. Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν συνοψίζονται στα εξής:

1. Η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) κατά 60% συνεπάγεται μείωση της μέγιστης τιμής της στάθμης του νερού κατά 6.5% και της τιμής της παροχής αιχμής στη διατομή ελέγχου κατά 18%. Δηλαδή η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού μειώνεται από 1.75 m σε 1.64 m και η παροχή από 202.8 m³/s σε 166.4 m³/s. Αντίθετα η μείωση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας κατά 60% έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης τιμής της στάθμης του νερού κατά 3.1% , από 1.75 m σε 1.8 m. Η τιμή της παροχής μεταβάλλεται κατά 8.5% καθώς αυξάνεται από 202.8 m³/s σε 221.6 m³/s
2. Η αύξηση της τραχύτητας της λεκάνης (συντελεστής Manning) μειώνει σημαντικά την τιμή της παροχής αιχμής κατά 24% ενώ η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού αυξάνεται ελάχιστα κατά 6%. Επίσης επηρεάζει τον χρόνο υστέρησης.
3. Η αύξηση του συντελεστή Manning στο υδατόρευμα αυξάνει την μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού κατά 12% (1.75 m σε 1.96 m) και μεταβάλλει ελάχιστα την παροχή αιχμής κατά 4.6% (202.8 m³/s σε 193.5 m³/s). Επίσης η μείωση του συντελεστή Manning προκαλεί μείωση κατά 14.3% (1.75 m σε 1.5 m) στην μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού και αύξηση κατά 5% στην παροχή αιχμής (202.8 m³/s σε 213.2 m³/s)
4. Η μέγιστη τιμή της στάθμης του νερού μπορεί να πάρει τιμές από 1.3 m έως 2.1 m και η παροχή αιχμής από 130 m³/s έως 223 m³/s

6.2. Προτάσεις

Με βάση της γενικότερης ενασχόλησης μας με τα πλημμυρικά φαινόμενα και λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε κατά τον προσδιορισμό της βροχής που προκάλεσε την αστραπιαία πλημμύρα στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας καταλήξαμε σε κάποιες προτάσεις. Οι προτάσεις αυτές σχετίζονται με μέτρα που πρέπει να παρθούν για την αντιμετώπιση ανάλογων φαινομένων στο μέλλον καθώς επίσης και ενέργειες που πρέπει να γίνουν για την βελτίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Οι προτάσεις είναι οι εξής:

1. Για την βελτίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι απαραίτητη η μέτρηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις φυσικές παραμέτρους της υδρολογικής λεκάνης. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι η εδαφική υγρασία, η ικανότητα κατακράτησης νερού για διάφορους τύπους εδαφών της υδρολογική λεκάνης και η λεπτομερέστερη καταγραφή των χρήσεων γης από δορυφορικές εικόνες.
2. Κρίνεται αναγκαίο να εγκατασταθούν βροχογράφοι σε περισσότερα σημεία της υδρολογικής λεκάνης ώστε να μπορέσει να γίνει μία καλύτερη εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής.
3. Αποτροπή δημιουργίας ή απομείωση των πλημμυρικών αιχμών με έργα υδρονομίας.
4. Εκτόνωση των πλημμυρικών αιχμών σε ειδικά διαρρυθμισμένες ζώνες μέσα στην πόλη ή στην περιφέρεια της πόλης
5. Αποτροπή δημιουργίας φερτών υλικών, μείωση της στερεοπαροχής και συγκράτηση των επιπλεόντων υλικών με μικρά υδραυλικά έργα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγλική:

1. Bronstert A (2003) 'Floods and climatic change: interactions and impacts'. Risk Anal 23:545–557
2. Berz G, Kron W, Loster T, Rauch E, Schimetschek J, Schmieder J, Siebert A, Smolka A, Wirtz A (2001) 'World map of natural hazards – a global view of the distribution and intensity of significant exposures'. Nat Hazards 23:443–465
3. Barredo I. Jose (2006) 'Major flood disasters in Europe: 1950–2005' Nat Hazards 42:125–148
4. Christopher Trevor Hammersmark (2003) Hydrodynamic Modeling and GIS Analysis of the Habitat Potential and Flood Control Benefits of the Restoration of a Leveed Delta Island, University of California, Davis
5. Chow, V.T., (1959) Open Channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, NY
6. DHI (Danish Hydraulic Institute) (2008) MIKE SHE water movement: user manual, Hørsholm, Denmark
7. DHI (Danish Hydraulic Institute) (2008) MIKE 11: user manual, Hørsholm, Denmark.
8. 'Guidance on flash flood management', Associated Programme on Flood Management December 2007
9. Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator – based assessment
10. Jonkman SN (2005) 'Global perspectives on loss of human life caused by floods'. Nat Hazards 34:151–175
11. Jianbiao Lu (2006) Modeling Hydrological Responses to Forest Management and Climate Change at Contrasting Watersheds in the Southeastern United States. PhD, Faculty of North Carolina State University.
12. Kron W (2002) 'Flood risk = hazard × exposure × vulnerability. In: Wu B, Wang ZY, Wang G, Huang GGH, Fang H, Huang J (eds) Flood defence'. Science Press, New York.

13. Perry CA (2000) 'Significant floods in the United States during the 20th Century – USGS measures a century of floods', U.S. Geological Survey, Fact Sheet 024–00, March 2000

Ελληνική:

1. Βαφειάδης Μ., Επ. Καθηγητής ΤΥΤΠ-ΑΠΘ, «Υδρολογική προσομοίωση για αντιπλημμυρική προστασία - Αστραπιαίες πλημμύρες»,
2. Κουτσογιαννάκη Ειρήνη & Κουτρούλης Αριστείδης, «Προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων λεκάνης απορροής με ανεπαρκή στοιχεία πεδίου. Εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη του Γιοφύρου», , Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά Οκτώβριος 2004.
3. Κουμπούρης Ε., «Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προσομοίωσης PTC στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής Λιμένα Χερσονήσου-Ηρακλείου», Διπλωματική Εργασία, 2005, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
4. Μαμάσης Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
5. Τσιτσιλώνης Σωτήριος, «Μεταπλημμυρική έρευνα και μελέτη αστραπιαίων πλημμυρών. Προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος 17/10/2006 στην Αλμυρίδα.» Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά Νοέμβριος 2008.

Ιστοσελίδες:

1. http://news.kathimerini.gr/4dcgi/_w_articles_ell_1_22/11/2007_249904
(Καθημερινή, 2007)
2. <http://www.teicrete.gr/diatmim/notes/Akraia>
3. http://toxics.usgs.gov/definitions/unsaturated_zone.html. Retrieved on 2006 – 07 – 01 (Unsaturated Zone Definitions Page' USGS.)
4. <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/unsatflow.html>. Retrieved on 2006 - 07 – 01.
(‘Unsaturated Zone Flow: Definitions and Details’. USGS.)
5. <http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1788>
6. <http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1785>
7. <http://members.explorecrete.com/index.php?showtopic=1785>