

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΠΜΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

Διπλωματική Εργασία: **Ανάλυση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας και  
Μοντελοποίηση Ροής του ρέματος Σταλού Χανίων**

**Φοιτητής:**

Χρήστος Γκούμας, Μηχ. Περιβάλλοντος

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Καθηγητής Δρ. Γεώργιος Καρατζάς (Επιβλέπων)

Καθηγητής Δρ. Νικόλαος Νικολαΐδης

Αν. Καθηγητής Δρ. Νικόλαος Παρανυχιανάκης

**Χανιά 2019**



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για την στήριξη και καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου, και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ.κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και Νικόλαο Παρανυχιανάκη για την εξέταση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Τριχάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας χωρίς να τέθηκε ποτέ ζήτημα χρόνου και απασχόλησής του. Επίσης ευχαριστώ πολύ την Δρ. Ειρήνη Βοζινάκη για το χρόνο που αφιέρωσε και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε μέσα από την εμπειρία της με το λογισμικό MIKE, αλλά και τον Δρ. Νεκτάριο Κουργιαλά για τις πληροφορίες και βάση για την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην DHI και τον εκπρόσωπό τους στην Ελλάδα κ. Ηλία Μουσσούλη για την δωρεάν παροχή εκπαιδευτικής άδειας χρήσης του λογισμικού MIKE HYDRO River, αλλά και τις συμβουλές του για την υλοποίηση του μοντέλου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την αρραβωνιαστικιά μου Κάλλια που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια τόσο των μεταπτυχιακών όσο και των προπτυχιακών μου σπουδών και μου έδωσε την απαραίτητη δύναμη να συνεχίσω και να τελειώσω τα εγχειρήματά μου αυτά, και τους γονείς μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>Ευχαριστίες.....</b>	<b>3</b>
<b>Εικόνες.....</b>	<b>7</b>
<b>Πίνακες .....</b>	<b>10</b>
<b>Περίληψη.....</b>	<b>11</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>12</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Σκοπός .....</b>	<b>13</b>
<b>Κεφάλαιο 2: Υδατικοί Πόροι και Διαχείρισή τους .....</b>	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Υδατικοί πόροι .....	16
2.3 Υδρολογικός κύκλος.....	19
2.4 Πλημμύρες .....	23
2.4.1 Ορισμός.....	23
2.4.2 Αίτια δημιουργίας πλημμυρών .....	24
2.4.3: Τύποι Πλημμυρών .....	26
2.4.4: Επιπτώσεις από πλημμύρες .....	28
2.4.5: Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ.....	30
<b>Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση Επιφανειακών Υδάτων .....</b>	<b>32</b>
3.1: Εισαγωγή.....	32

3.2: Υδρολογικά Μοντέλα.....	32
3.3: Γενικές αρχές προσομοίωσης των πλημμυρών.....	37
<b>Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση λογισμικού που χρησιμοποιείται (Mike FLOOD και ArcGIS). ....</b>	<b>38</b>
4.1: ESRI ArcGIS.....	38
4.2: MIKE HYDRO River .....	39
<b>Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση και περιγραφή περιοχής μελέτης .....</b>	<b>42</b>
5.1: Περιγραφή περιοχής μελέτης – Ρέμα στην περιοχή του Σταλού .....	42
5.1.1: Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά .....	42
5.1.2: Γεωλογία .....	47
5.1.3: Χρήσεις Γης .....	49
<b>Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση μεθοδολογίας.....</b>	<b>51</b>
6.1: Μεθοδολογία χωρικής εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου με χρήση GIS .....	51
6.1.1: Ορισμός και γενική περιγραφή του GIS .....	52
6.1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΓΣΠ (GIS).....	53
6.1.3: Υλοποίηση Χωρικής Εκτίμησης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας.....	55
6.1.4: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν:.....	57
6.2: Παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης με το Mike HYDRO River .....	63
6.2.1: Συλλογή δεδομένων βροχόπτωσης και στάθμης.....	63
6.2.2: Κατασκευή Μοντέλου με το MIKE HYDRO River .....	67

<b>Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα μοντελοποίησης.....</b>	<b>80</b>
7.1: Αποτελέσματα Χωρικής Εκτίμησης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας με χρήση ΓΣΠ (GIS). 80	
7.1.1: Πλημμυρική Επικινδυνότητα Επιμέρους παραγόντων .....	80
7.1.2: Συνδυαστική χωρική πλημμυρική επικινδυνότητα.....	85
7.1.3: Εξέταση μελλοντικής πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	88
7.2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με το λογισμικό MIKE HYDRO River .....	90
<b>Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα .....</b>	<b>95</b>
8.1: Χωρική εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με τη χρήση ΓΣΠ.....	95
8.2: Μοντελοποίηση με το λογισμικό MIKE HYDRO River .....	96
8.3: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	98
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>100</b>

## Εικόνες

Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή νερού. (Πηγή: <a href="http://water.usgs.gov/edu/graphics/greek/earthwheredistribution.gif">http://water.usgs.gov/edu/graphics/greek/earthwheredistribution.gif</a> ) .....	17
Εικόνα 2: Υδρολογικός κύκλος ( <a href="http://plemenosem.wikispaces.com/">http://plemenosem.wikispaces.com/</a> ). .....	21
Εικόνα 3: Παροχή υδατορεύματος πριν και μετά την αστικοποίηση της περιοχής (Λυκοκανέλλος, 2003).....	26
Εικόνα 4: Συνολικός αριθμός πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη, 1973-2002 (Hogois et al., 2003) .....	28
Εικόνα 5: Συνολικός αριθμός πλημμυρικών γεγονότων ανά περιφέρεια στην Ευρώπη (Hogois et al., 2003). .....	29
Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, με το υπό μελέτη ρέμα στον Σταλό Νέας Κυδωνίας.....	42
Εικόνα 7: Τοποθεσία της περιοχής μελέτης στη Βόρεια ακτή της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων.....	43
Εικόνα 8: Ρέμα υπό μελέτη και υπολεκάνες των παρακλαδιών του ρέματος .....	44
Εικόνα 9: Περιοχή Natura 2000 στην περιοχή μελέτης .....	45
Εικόνα 10: Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου της περιοχής μελέτης (DEM - Digital Elevation Model).....	46
Εικόνα 11: Ρέματα στην περιοχή μελέτης.....	47
Εικόνα 12: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης.....	48
Εικόνα 13: Χάρτης χρήσεων γης, σύμφωνα με τα τελευταία του Corine Land Cover, για την περιοχή μελέτης. ....	50

Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης των επιμέρους παραγόντων που συμβάλλουν στην πλημμυρική επικινδυνότητα .....	56
Εικόνα 15: Γεωλογικοί σχηματισμοί και κατηγοριοποίησή τους σύμφωνα με την υδροπερατότητά τους .....	58
Εικόνα 16: Εγκατεστημένοι μετεωρολογικοί σταθμοί (κίτρινο) και νεοεγκατεστηθέντες σταθμοί μέτρησης στάθμης και βροχόπτωσης (πράσινο) στην περιοχή μελέτης.....	60
Εικόνα 17: Κλίση εδάφους στην περιοχή μελέτης: Μαύρο = 0 μοίρες, Άσπρο = 90 μοίρες .....	61
Εικόνα 18: Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης .....	62
Εικόνα 19: Η τοποθεσία των δύο σταθμών μέτρησης στο ρέμα του Σταλού.....	64
Εικόνα 20: Ο σταθμός μέτρησης στάθμης με Radar, στον Κάτω Σταλό .....	65
Εικόνα 21: Ο μετεωρολογικός σταθμός, εγκατεστημένος στη Δημοτική Βιβλιοθήκη του Άνω Σταλού .....	66
Εικόνα 22: Δημιουργία νέου μοντέλου MIKE HYDRO River. ....	67
Εικόνα 23: Το κύριο παράθυρο εργασίας του MIKE HYDRO River. ....	68
Εικόνα 24: Το αρχείο Ψηφιοποιημένου Μοντέλου Αναγλύφου (DEM) σε μορφή txt. ....	70
Εικόνα 25: Η περιοχή μελέτης, απεικονίζοντας το DEM της περιοχής, με χρωματική λεζάντα για το υψόμετρο. ....	71
Εικόνα 26: Υπολεκάνες απορροής για κάθε ένα παρακλάδι (branch) του υπό μελέτη ρέματος.72	
Εικόνα 27: Τα 5 παρακλάδια του ρέματος, με τις αρχικές και τελικές συντεταγμένες μήκους (chainage).....	72
Εικόνα 28: Εισαγωγή Routing Method για τα παρακλάδια του ρέματος.....	73



Εικόνα 29: Το υπό μελέτη ρέμα με τις μετρηθείσες τομές.....	74
Εικόνα 30: Εισαγωγή των τομών στο MIKE HYDRO River .....	75
Εικόνα 31: Εισαγωγή Markers στις τομές.....	76
Εικόνα 32: Εισαγωγή οριακών συνθηκών (boundary conditions). ....	77
Εικόνα 33: Εισαγωγή χρονοσειράς ροής για το υπό μελέτη ρέμα στο MIKE HYDRO River, με χρονικά μεταβαλλόμενη ποσότητα βασισμένη στην βροχή.....	78
Εικόνα 34: Παραμετροποίηση ποσοστού τελικής τιμής οριακής συνθήκης στο MIKE HYDRO River. ....	79
Εικόνα 35: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Χρήσεων Γης .....	81
Εικόνα 36: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Υψομέτρου .....	81
Εικόνα 37: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Συσσώρευσης Ροής.....	82
Εικόνα 38: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Υδρογεωλογίας .....	82
Εικόνα 39: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Έντασης Βροχής .....	83
Εικόνα 40: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Κλίσης.....	84
Εικόνα 41: Σχηματική απεικόνιση αλληλεπίδρασης παραγόντων πλημμυρικής επικινδυνότητας. ....	85
Εικόνα 42: Συνολική πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης.....	88
Εικόνα 43: Σύγκριση πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω χρήσεων γης: Τρέχουσα (Αριστερά) και μελλοντική (Δεξιά).....	89
Εικόνα 44: Σύγκριση συνολικής πλημμυρικής επικινδυνότητας: Τρέχουσα (Αριστερά) και μελλοντική (Δεξιά). ....	89

Εικόνα 45: Εξαγόμενα αποτελέσματα από το μοντέλο MIKE HYDRO River .....	91
Εικόνα 46: Μετρήσεις στάθμης (Πάνω) από το τοποθετημένο σταθμήμετρο, σε σύγκριση με τα εξαγόμενα από το μοντέλο δεδομένα (Μέση) και η βροχή αντίστοιχα (κάτω) για την περίοδο της μοντελοποίησης. ....	92
Εικόνα 47: Σύγκριση θεωρητικών με πραγματικές τιμές. ....	93

## Πίνακες

Πίνακας 1: Κατανομή του νερού στη γη. Πηγή: Gleick, P. H., 1996 .....	18
Πίνακας 2: Εκτίμηση των μέσων ετήσιων φυσικών διακινήσεων του νερού της Γης (συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου). Η επιφανειακή και η υπόγεια συνιστώσα απορροής αναφέρονται στην έξοδο προς τη θάλασσα (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999).....	22
Πίνακας 3: Υπολογισμοί παραγόντων πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	86

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την πλημμυρική επικινδυνότητα στην περιοχή του Κάτω Σταλού Νέας Κυδωνίας Χανίων σε 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η χωρική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης με χρήση ΓΣΠ (Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών – GIS) για εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας βάσει 6 παραγόντων: Υψόμετρο, Κλίση, Συγκέντρωση Ροής, Υδρογεωλογία, Χρήσεις Γης και Χωρική Κατανομή Έντασης Βροχής. Οι 6 αυτοί παράγοντες ποσοτικοποιούνται με τη δημιουργία χαρτών raster (καννάβου) και στη συνέχεια συνδυάζονται χωρικά για τη δημιουργία χάρτη συνολικής πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης.

Επιπλέον, στο δεύτερο στάδιο, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση ενός ρέματος που βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης και που είναι κοντά σε περιοχή που έχει παρατηρηθεί να έχει πληγεί από πλημμυρικά φαινόμενα. Το υπό μελέτη ρέμα ξεκινάει Νότια του Άνω Σταλού κι ενώνεται με άλλο ένα μεγάλο παρακλάδι και καταλήγει στην Βόρεια ακτή της περιοχής μελέτης κι εκβάλλει στη θάλασσα. Με εγκατάσταση μετεωρολογικού σταθμού στα ανάντη του ρέματος και σταθμήμετρου κοντά στην εκβολή του, δόθηκε η δυνατότητα άντλησης πρόσφατων δεδομένων από το πεδίο και χρήση τους για μοντελοποίηση του ρέματος σε μονοδιάστατο μοντέλο ροής με το λογισμικό MIKE HYDRO River, σε συνδυασμό με την καταγραφή τομών και ψηφιοποίησή τους στο λογισμικό ΓΣΠ ArcGIS.

Από την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προσδιορίστηκε η χωρική πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής τόσο με την υπάρχουσα κατάσταση, όσο και η μελλοντική, λαμβάνοντας υπ' όψη την προβλεπόμενη επέκταση του πολεοδομικού σχεδίου του Δήμου Χανίων για την περιοχή μελέτης. Επίσης προσδιορίστηκε η συμπεριφορά του ποταμού σε έντονα βροχοπτώτικα φαινόμενα και διαπιστώθηκε η χαμηλή επικινδυνότητα υπερχείλισης του ρέματος, καθώς δεν έφτασε το νερό σε καμία χρονική στιγμή επικίνδυνα επίπεδα, παρά την έντονη και μεγάλη σε διάρκεια βροχόπτωση.

## Abstract

In this thesis the main goal was to assess the Flood Risk of the area of Kato Stalos, located just West of the city of Chania in Crete, in 2 stages. The first stage is the spatial assessment of the study area's flood risk by use of Geographical Information Systems software (GIS), based on 6 main factors: Altitude, Slope, Flow Accumulation, Hydrogeology, Land Use and Spatial Distribution of Rainfall Intensity. The aforementioned 6 factors were quantified on a same-basis scale by creating raster maps, and subsequently utilized in the calculation of the total Flood Risk of the study area, by being spatially combined with a weighted coverage method.

The second stage of the study was to model a stream located within the study area and that is also located near previously recorded flood events. The stream that was modeled in this thesis originates from just South of the village of Ano Stalos, merges with another substantial branch and its estuary is in the North of the study area, in the locale of Kato Stalos. The installation of both a meteorological logging and transmitting station in Ano Stalos, as well as a water level logger and transmitter in the lower estuary part of the stream enabled the acquisition of real and recent data, which was subsequently used to construct a 1-D flow model in the MIKE software suite, with the MIKE HYDRO River module, in addition to recording stream cross sections and their digitization through the ArcGIS GIS Software suite.

The implementation of the aforementioned methodology lead to the determination of the spatial Flood Risk of the Stalos area in Chania for the current situation, as well as the future, by taking into account the newly designed Civil Plan which is expected to be implemented in the near future and includes an expansion of built areas. In addition, the behavior of the stream during heavy rain events was assessed, and it was determined that the flood risk of the adjacent to the stream areas was relatively low, as the water level never reached nowhere near dangerous levels, despite heavy rain for extended periods of time.

## Κεφάλαιο 1: Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή του Κάτω Σταλού του Δήμου Χανίων, με την κατασκευή χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας, αλλά και μοντελοποίησης της περιοχής με χρήση του λογισμικού MIKE Flood. Τα απαραίτητα δεδομένα για εισαγωγή στο λογισμικό μοντελοποίησης αντλήθηκαν από εγκατεστημένους σταθμούς από το Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνδυασμό με πληθώρα άλλων χωρικών δεδομένων που έχει συλλέξει το εργαστήριο, αλλά και επιτόπιες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με αφορμή την παρούσα διπλωματική εργασία. Για την συγκεκριμένη εργασία τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από 2 εγκατεστημένους σταθμούς στην περιοχή του Σταλού: έναν σταθμό μέτρησης στάθμης στα κατάντη και έναν μετεωρολογικό σταθμό στα ανάντη της λεκάνης απορροής, και η εγκατάσταση και συντήρηση των σταθμών αυτών πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Interreg VA– ERMIS-F Διαδικτυακή Υπηρεσία Περιβαλλοντικών Κινδύνων – Πλημμυρες, στο οποίο συμμετέχει το Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Κύπρου, τον Δήμο Χανίων, το Πανεπιστήμιο Αιγαίου, την Διεύθυνση Υδάτων Βορείου Αιγαίου, το Τμήμα Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου και το Συμβούλιο Αποχετεύσεων Λεμεσού – Αμαθούντας. Η Διαδικτυακή Υπηρεσία Περιβαλλοντικών Κινδύνων, ERMIS-F, είναι ένα ευρωπαϊκό έργο (Πράξη) που εντάσσεται στο Πρόγραμμα Συνεργασίας Interreg V–A «Ελλάδα – Κύπρος 2014-2020», στον Άξονα «Βελτίωση της από κοινού διαχείρισης κινδύνων από φυσικές, τεχνολογικές και ανθρωπιστικές καταστροφές» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΤΠΑ) και από Εθνικούς Πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου. Το ERMIS-F αναπτύσσει ένα ενιαίο σύστημα πληροφόρησης και διαχείρισης κινδύνων φυσικών καταστροφών, με εστίαση τις πλημμύρες, για τρεις Περιφέρειες Εφαρμογής:

- την Λεκάνη απορροής παραπόταμου Αραδίππου στη Λάρνακα Κύπρου

- την Λεκάνη του οικισμού Καλλονής (Ρέμα Κυπριανού) στη Λέσβο
- και τη Λεκάνη της Νέας Κυδωνίας, στα Χανιά της Κρήτης

Το πρόγραμμα θα παραδώσει στην Τοπική Αυτοδιοίκηση της κάθε περιοχής εφαρμογής για Δημόσια χρήση μια Πρότυπη Ολοκληρωμένη Δημόσια Υποστηριζόμενη Υπηρεσία, ένα Ψηφιακό Σύστημα και μια Διαδικτυακή Πλατφόρμα Πληροφόρησης και Διαχείρισης Πλημμυρικών Κινδύνων που θα υποστηρίζονται από μια εφαρμογή Κοινωνικής Δικτύωσης και Crowd Sourcing, προσβλέποντας στη δυναμική αξιοποίηση της Υπηρεσίας ERMIS-F από την τοπική κοινωνία(ermis-f.eu).

Η ανάγκη για αξιολόγηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας έγκειται στην ολοένα και αυξανόμενη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων, με συχνότερες βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης που οδηγούν σε επικίνδυνα πλημμυρικά γεγονότα. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης του Κάτω Σταλού με εφαρμογή της ήδη ανεπτυγμένης μεθόδου των κκ Κουργιαλά και Καρατζά. Πιο συγκεκριμένα, η πλημμυρική επικινδυνότητα προσδιορίζεται σε 2 στάδια: Το πρώτο στάδιο είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής χρησιμοποιώντας Γεωχωρικά δεδομένα, με χρήση λογισμικού ΓΠΣ – GIS, και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν θεματικοί χάρτες για τους 6 επιμέρους παράγοντες της πλημμυρικής επικινδυνότητας για την περιοχή. Στη συνέχεια με την χρήση της μεθόδου σταθμισμένης κάλυψης, συνδυάστηκαν οι θεματικοί χάρτες για την δημιουργία του χάρτη συνολικής πλημμυρικής επικινδυνότητας για την περιοχή μελέτης.

Με την γεωχωρική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας έγινε επιβεβαίωση της υψηλής πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης. Επιλέχθηκε το ρέμα στην περιοχή του Σταλού, που εκβάλλει στην παραλία του Κάτω Σταλού και πηγάζει στα ορεινά της περιοχής του Άνω Σταλού Νέας Κυδωνίας Χανίων. Με τους νεοεγκατεστηθέντες σταθμούς μέτρησης στάθμης στα κατάντη του ρέματος και μετεωρολογικών δεδομένων (με έμφαση στη βροχόπτωση) στα ανάντη του ρέματος, αποφασίστηκε η μοντελοποίηση της στάθμης του ρέματος στην περιοχή υψηλής πλημμυρικής επικινδυνότητας στον Κάτω Σταλό, στο σημείο μέτρησης στάθμης, με χρήση του λογισμικού μοντελοποίησης MIKE HYDRO River, με ευγενική χορηγία της DHI και των εκπροσώπων της στην Ελλάδα. Στόχος των παραπάνω ήταν ο προσδιορισμός του επιπέδου

βροχόπτωσης που οδηγούν σε υπερχείλιση του ρέματος και κατά συνέπεια πλημμύρα των παρακείμενων στο ρέμα περιοχών, με ιδιαίτερη έμφαση στο κατά πόσον οφείλεται η υπερχείλιση του ρέματος για την πλημμύρα των περιοχών αυτών.

## Κεφάλαιο 2: Υδατικοί Πόροι και Διαχείρισή τους

### 2.1 Εισαγωγή

Η σημασία του νερού για τον άνθρωπο είναι αδιαμφισβήτητη. Αποτελεί το 60% του ανθρώπινου σώματος, ενώ η ανάγκη αναπλήρωσής του είναι διαρκής. Εκτός από βιολογικές, οι ανάγκες του ανθρώπου για καθαρό νερό εκτείνονται σε όλες τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ειδικότερα, το νερό είναι απαραίτητο για λόγους υγιεινής, για καθαριότητα, για καλλιέργεια γεωργικών προϊόντων και για κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Για όλα τα παραπάνω χρειάζεται γλυκό νερό, το οποίο συνήθως βρίσκεται σε λίμνες, πηγές και ποτάμια.

Η συντριπτική πλειονότητα του νερού στην επιφάνεια της Γης είναι αλμυρό νερό στους ωκεανούς και αποτελεί το 96% της συνολικής ποσότητας νερού στον πλανήτη μας. Το γλυκό νερό βρίσκεται σε διάφορες μορφές, όπως βρόχινο, σε ποτάμια, λίμνες, χειμάρρους, αλλά και υπογείως, και είναι απαραίτητο για την καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Μπορεί να θεωρούμε ως βασική πηγή του γλυκού νερού τους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, αλλά οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν σημαντικό κομμάτι του συνολικού διαθέσιμου νερού. Οι υπόγειοι υδροφορείς ανανεώνονται συνεχώς με τις βροχοπτώσεις και τροφοδοτούν πηγές και χειμάρρους.

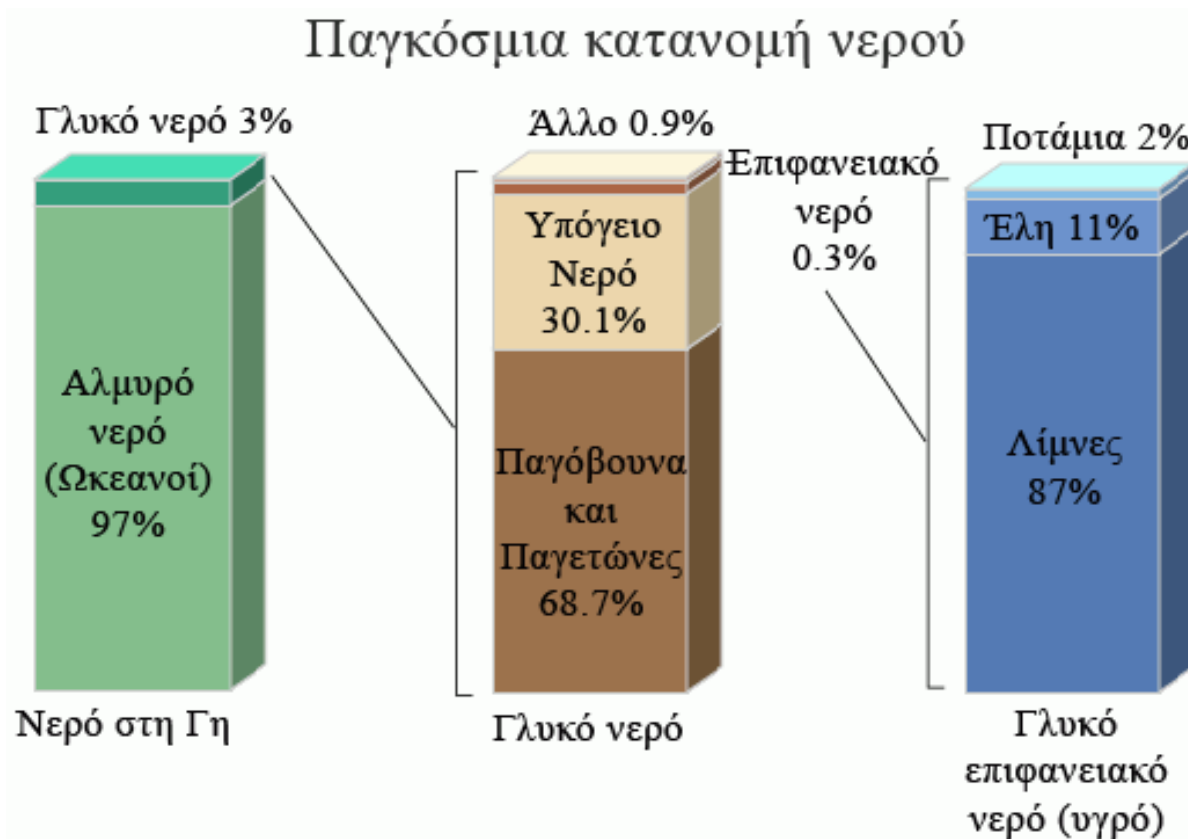
### 2.2 Υδατικοί πόροι

Με τον όρο υδάτινοι πόροι αναφέρεται κανείς σε όλα τα επιφανειακά αλλά και υπόγεια ύδατα μιας περιοχής, ενώ ο όρος υπόγεια ύδατα αναφέρεται στις υδάτινες ποσότητες οι οποίες υπάρχουν στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (Καρατζάς, 2000).

Η οδηγία-πλαίσιο για τα ύδατα 2000/60/ΕΚ αποτελεί σημαντικότερο νομοθετικό θέσπισμα όσον αφορά τα ύδατα, καθώς μεταξύ άλλων ορίζει τα επιφανειακά ύδατα ως τα Εσωτερικά ύδατα, εξαιρώντας τα υπόγεια, τα μεταβατικά και τα παράκτια. Πιο συγκεκριμένα, τα εσωτερικά ύδατα είναι το σύνολο των στάσιμων ή των ρεόντων επιφανειακών υδάτων, αλλά και τα υπόγεια ύδατα



τα οποία βρίσκονται προς την πλευρά της ξηράς σε σχέση με τη γραμμή βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων. Τα μεταβατικά ύδατα είναι τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα τα οποία βρίσκονται πλησίον στομίων ποταμών και είναι εν μέρει αλμυρά λόγω γειτνίασης με παράκτια ύδατα, αλλά ουσιαστικά επηρεάζονται από ρεύματα γλυκού νερού. Τα παράκτια ύδατα είναι τα επιφανειακά ύδατα τα οποία απέχουν προς την θάλασσα το πολύ ένα ναυτικό μίλι, από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από το οποίο μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων. Τα παράκτια ύδατα, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι το ανώτερο όριο των μεταβατικών υδάτων. (Τζώρτζη, 2009). Η κατανομή του νερού στα διάφορα αυτά είδη σε παγκόσμια κλίμακα αναπαρίσταται γραφικά παρακάτω στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή νερού. (Πηγή:  
<http://water.usgs.gov/edu/graphics/greek/earthwheredistribution.gif>)

Με την σύγχρονη κοινωνία να έχει αναπτυχθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό και με την παροχή γλυκού νερού σε όλα τα σπίτια και τις βιομηχανίες, συνειδητοποιεί κανείς την τεράστια χρήση

νερού που γίνεται σε καθημερινή βάση ανά τον κόσμο, και κατά συνέπεια πόσο σημαντική είναι η ορθή διαχείρισή τους. Στην Ελλάδα, το ποσοστό ετήσιας κατανάλωσης νερού στον αγροτικό τομέα φτάνει το 87% της συνολικής κατανάλωσης (Τάτσης, 2007). Όπως και στις άλλες μεσογειακές χώρες η ζήτηση του νερού αυξάνει κατά τους θερινούς μήνες, τότε που η προσφορά (διαθεσιμότητα) είναι στα χαμηλότερα επίπεδά της.

Πίνακας 1: Κατανομή του νερού στη γη. Πηγή: Gleick, P. H., 1996

Μορφή Νερού	Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό γλυκού νερού	Ποσοστό συνολικού νερού
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1.338.000.000	--	96,5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24.064.000	68,7	1,74
Υπόγειο Νερό	23.400.000	--	1,7
Γλυκό	10.530.000	30,1	0,76
Αλμυρό	12.870.000	--	0,94
Εδαφική Υγρασία	16.5	0,05	0,001
Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300	0,86	0,022
Λίμνες	176.4	--	0,013
Γλυκές	91	0,26	0,007

Αλμυρές	85.4	--	0,006
Ατμόσφαιρα	12.9	0,04	0,001
Έλη	11.47	0,03	0,0008
Ποταμοί	2.12	0,006	0,0002
Βιολογικό Νερό	1.12	0,003	0,0001
Σύνολο	1.386.000.000	-	100

Καθίσταται λοιπόν πέρα για πέρα σαφές ότι η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς μείωση των αποθεμάτων ή ρύπανση αυτών λόγω έλλειψης επιστημονικής γνώσης και ανάλογων πρακτικών, δύνανται να επιφέρουν ζημιά στο οικοσύστημα και στον άνθρωπο, καθώς αποτελεί το βασικό αγαθό για την επιβίωσή του.

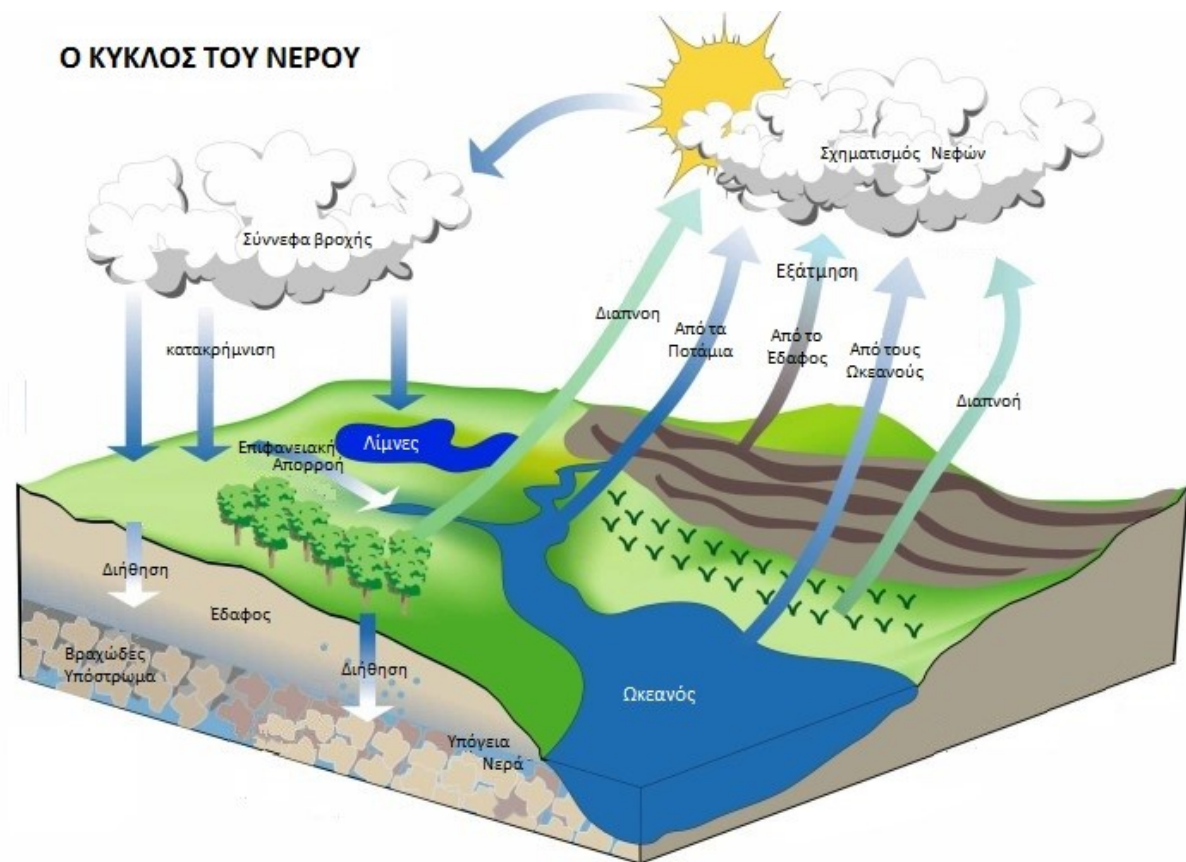
### 2.3 Υδρολογικός κύκλος

Μια πρώτη προσέγγιση για την κατανόηση και συνεπώς ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι η κατανόηση του πώς αυξομειώνονται τα αποθέματα νερού στην επιφάνεια της γης και στο υπέδαφος, και πώς το νερό κυκλοφορεί ανάμεσα στους υδάτινους πόρους αλλά και στην ατμόσφαιρα, καθώς και ποιες είναι οι περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες που υποκινούν την κυκλοφορία αυτή. Η παρουσία, κίνηση και ανακυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια και το υπέδαφος της Γης ονομάζεται υδρολογικός κύκλος (USGS). Το νερό μέσω μιας σειράς διαδικασιών κυκλοφορεί μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς, υπεδάφους και θάλασσας. Σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ, ο υδρολογικός κύκλος αποτελείται από 16 μέρη:

- Αποθήκευση νερού στη θάλασσα

- Εξάτμιση
- Εξατμοδιαπνοή
- Εξάχνωση
- Νερό στην ατμόσφαιρα
- Συμπύκνωση
- Κατακρημνίσματα
- Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια
- Απορροή από λιώσιμο του χιονιού
- Επιφανειακή απορροή
- Ροή σε υδατορεύματα
- Αποθήκευση γλυκού νερού
- Διήθηση
- Αποθήκευση υπόγειου νερού
- Εκφόρτιση υπόγειου νερού
- Πηγές

Τα παραπάνω μέρη περιλαμβάνουν τόσο τις διεργασίες κυκλοφορίας του νερού στη γη, όσο και τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύεται. Μια ποιοτική αναπαράσταση της κυκλοφορίας του νερού στο υπέδαφος, στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς, στις λίμνες και στα ποτάμια βρίσκεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Υδρολογικός κύκλος (<http://plemenosem.wikispaces.com/>).

Όπως καταδεικνύει και το σχήμα, η κινητήριος δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εξατμίζει το νερό από τους επιφανειακούς υδροφορείς. Οι σχηματιζόμενοι υδρατμοί έπειτα συμπυκνώνονται στην ατμόσφαιρα, και τέλος επιστρέφουν στη γη με τη μορφή των κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Το μεγαλύτερο μέρος του εξατμιζόμενου νερού επιστρέφει στις θάλασσες και τους ωκεανούς σε ποσοστό 90%, ενώ το υπόλοιπο 10% επιστρέφει στη γη. Από την ποσότητα του νερού που πέφτει στη γη, συγκεντρώνεται στους ποταμούς και στις λίμνες, ένα άλλο μέρος προσλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών ενώ το υπόλοιπο προχωρά στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους. Ένα ποσοστό από το νερό αυτό παρακρατείται από τους κόκκους του χώματος. Το υπόλοιπο νερό που δεν δεσμεύεται καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς, και είναι αυτό που εμπλουτίζει και αναπληρώνει τα αποθέματα των υπόγειων υδάτων. Από εκεί, υπάρχει είτε επιφανειακή είτε υπόγεια απορροή και τελικά το νερό αυτό καταλήγει να εξατμιστεί πάλι. Η διαδικασία αυτή είναι συνεχής και αποτελεί τον υδρολογικό

κύκλο. Δεν είναι μια αυστηρά τυποποιημένη διαδικασία αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, τη γεωγραφική θέση και την εποχή.

*Πίνακας 2: Εκτίμηση των μέσων ετήσιων φυσικών διακινήσεων του νερού της Γης (συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου). Η επιφανειακή και η υπόγεια συνιστώσα απορροής αναφέρονται στην έξοδο προς τη θάλασσα (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999).*

	Έκταση σε δισεκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα	Διακίνηση	Μέσος ετήσιος όγκος σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό επί των κατακρημνισμάτων, %
Σύνολο επιφάνειας Γης	510,0	Κατακρημνίσματα = Εξατμοδιαπνοή	577	100,0
Ωκεανοί	361,1	Κατακρημνίσματα	458	100,0
		Εξάτμιση	505	110,3
Ξηρά	148,9	Κατακρημνίσματα	119	100,0
		Εξατμοδιαπνοή	72	60,5
		Συνολική απορροή	47	39,5
		Επιφανειακή συνιστώσα απορροής	44.7	37,6
		Υπόγεια συνιστώσα απορροής	2.3	1,9

Όπως περιγράφηκε από τον Dingman (2002), το υδατικό ισοζύγιο για μια λεκάνη απορροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S$$

Όπου,

P : Κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιόνι)

G<sub>in</sub> : Εισροή υπογείων υδάτων

Q : Απορροή

ET: Εξατμισοδιαπνοή (Εξάτμιση και διαπνοή των φυτών)

G<sub>out</sub> : Εκροή υπογείων υδάτων

ΔS : Η μεταβολή της αποθηκευτικότητας του νερού στην λεκάνη απορροής

## 2.4 Πλημμύρες

Η άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη είναι ένα πραγματικό και πλέον επιβεβαιωμένος φαινόμενο, το οποίο κατά κοινή ομολογία της επιστημονικής κοινότητας είναι ανθρωπογενές σε ένα βαθμό, αλλά και συνδυασμός με φυσικά φαινόμενα. Η άνοδος της θερμοκρασίας οδηγεί σε ραγδαιότερα φαινόμενα κατακρήμνισης, τα οποία οδηγούν με τη σειρά τους σε πλημμυρικά φαινόμενα [Lyu et al., 2016]. Πράγματι τις τελευταίες 3 δεκαετίες τα πλημμυρικά φαινόμενα έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό παγκοσμίως, όμως ο αριθμός των ανθρώπινων θυμάτων ανά πλημμυρικό γεγονός έχει παραμείνει σχεδόν σταθερός, με μια μείωση τη δεκαετία του 2000, παρά την αύξηση του αριθμού των πλημμυρικών γεγονότων.

### 2.4.1 Ορισμός

Ο όρος «πλημμύρα» χρησιμοποιείται γενικότερα για να περιγράψει την ανεξέλεγκτη κατάκλυση μίας περιοχής από νερό. Μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εξόδου του νερού ενός υδατορέματος

από τη φυσική ή τεχνητή κοίτη του με αποτέλεσμα την κατάκλυση των παρακείμενων περιοχών. Οι βασικοί μηχανισμοί που οδηγούν σε πλημμύρα σε περιοχές παρακείμενες σε ποταμό ή ρέμα είναι :

α) με την αύξηση της υδατοπαροχής, είτε:

β) με τη μείωση της διατομής της κοίτης (Σακκάς, 2004).

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

#### 2.4.2 Αίτια δημιουργίας πλημμυρών

Τα τελευταία τριάντα χρόνια τα πλημμυρικά φαινόμενα και οι εξ αυτών απειλές, ζημιές και καταστροφές σε περιουσίες, έργα και ανθρώπινες ζωές ενισχύονται από τις κάθε είδους ανθρώπινες επεμβάσεις (π.χ. ευθυγραμμίσεις κοίτης, απορρίψεις μπαζών και σκουπιδιών στις κοίτες, χαμηλές και στενές γέφυρες, παράνομη επέκταση της καλλιεργούμενης γης προς τις



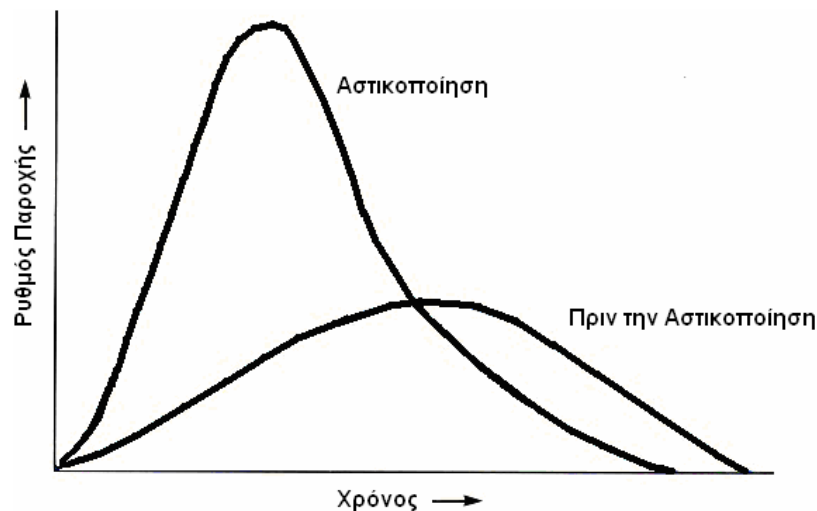
κοίτες, απουσία έργων ορεινής υδρονομίας και συντήρησης των διαβρωμένων κοιτών, αποκομιδή αδρανών υλικών με άναρχο και επικίνδυνο τρόπο). Το σημαντικό είναι ότι ο σχεδιασμός έργων αντιπλημμυρικής προστασίας οφείλει να αρχίζει από τα ανάντη και να επεκτείνεται μέχρι και την παράκτια ζώνη. (Κουργιαλάς, 2010).

Επιπλέον, ο σχεδιασμός των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας πρέπει να βασίζεται σε μελέτη με πραγματικά δεδομένα των μηχανισμών απορροής και κυρίως σε υδρομετεωρολογικά δεδομένα (βροχοπτώσεις, παροχές κ.λπ.) επί μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να περιλαμβάνει συνήθειες και ακραίες συνθήκες (Best Practices on Flood Prevention, Protection and Mitigation, 2003).

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

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

Παρακάτω εικονίζεται η επιρροή της αστικοποίησης σε ένα ποταμό έπειτα από ραγδαία βροχόπτωση. Το διάγραμμα της αστικοποίησης εμφανίζει συντομότερα και μεγαλύτερη μέγιστη παροχή συγκριτικά με το αντίστοιχο διάγραμμα πριν την αστικοποίηση. Επιπλέον, ο ριζικά μεγαλύτερος ρυθμός παροχής συμβάλλει στην εκτεταμένη διάβρωση του πυθμένα λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας ροής (Κουργιαλάς, 2010):



Εικόνα 3: Παροχή υδατορεύματος πριν και μετά την αστικοποίηση της περιοχής (Λυκοκανέλλος, 2003)

#### 2.4.3: Τύποι Πλημμυρών

Οι πλημμύρες μπορούν να πάρουν πολλές μορφές και δεν είναι εύκολο να δοθεί ένας ακριβής ορισμός του όρου. Σε γενικές γραμμές, όμως, μια πλημμύρα αναφέρεται σε μια υπερβολική συσσώρευση νερού σε μια επιφάνεια της γης, ένα γεγονός όπου το νερό αυξάνεται ή ρέει πάνω από γη που δεν είναι κατά κανόνα βυθισμένη. Οι πλημμύρες σε ολόκληρο τον κόσμο έχουν πολλές διαφορετικές αιτίες και χαρακτηριστικά (Few, 2004).

Διάφοροι τύποι και αιτίες πλημμυρών μπορούν να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Μπορεί να είναι χρήσιμο να γίνει διάκριση μεταξύ δύο γενικών κατηγοριών πλημμύρας ανάλογα με το μέγεθος της πληγείσας περιοχής και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων (χωρική και χρονική κλίμακα των συμβάντων πλημμύρας) (Menne et al., 2013).

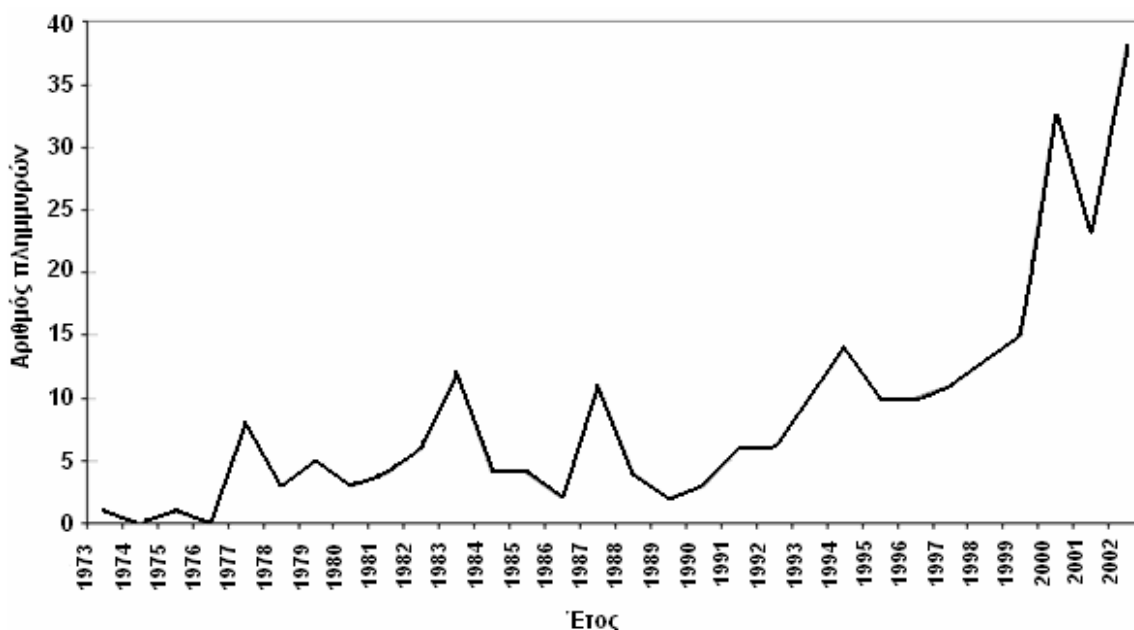
Οι τύποι των πλημμυρών διακρίνονται ως εξής: Τοπικές, ξαφνικές πλημμύρες (flash floods) προκαλούν πλημμύρες σε μικρές λεκάνες απορροής και οφείλονται κυρίως σε σύντομες, έντονες βροχοπτώσεις (π.χ. καταιγίδες). Οι ξαφνικές πλημμύρες εμφανίζονται κυρίως σε λοφώδεις ή ορεινές περιοχές και οφείλονται σε μηχανισμούς μεταφοράς βροχόπτωσης, λεπτά εδάφη και υψηλή ταχύτητα απορροής. Η διάρκεια μιας τέτοιας πλημμύρας είναι σύντομη, αλλά

αυτό το είδος πλημμύρας συσχετίζεται συχνά με σοβαρές ζημιές. Έντονη κατακρήμνιση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε πλημμύρισμα των αστικών περιοχών όπου οι υπόνομοι και τα συστήματα αποστράγγισης δεν έχουν την ικανότητα να ανταπεξέλθουν στον όγκο του νερού (Menne et al., 2013).

Εκτεταμένες, μακροχρόνιες πλημμύρες (plain floods) οι οποίες συχνά καταλήγουν σε πλημμύρες μεγαλύτερων περιοχών. Αυτές οι πλημμύρες σχεδόν πάντα προκαλούνται από βροχοπτώσεις που διαρκούν αρκετές ημέρες ή εβδομάδες, και σχετίζονται με προηγούμενο κορεσμό του εδάφους. Πλημμύρες που οφείλονται σε εκτεταμένες και μακροχρόνιες βροχοπτώσεις, που μπορεί επίσης να οφείλονται σε τήξη του χιονιού και του πάγου, συμβαίνουν κυρίως στις πεδιάδες, όταν τα χαντάκια ή η οχύρωση κατά μήκος μεγάλων ποταμών δεν μπορούν πλέον να αντέξουν το νερό από την υπερχειλίση των ποταμών. Ένα πλεονέκτημα αυτού του είδους πλημμύρας είναι ότι έχει μια πιο αργή εκδήλωση, έτσι ώστε να μπορούν να εκδίδονται έγκαιρες προειδοποιήσεις και να γίνονται οι απαραίτητες προετοιμασίες (Menne et al., 2013). Παράκτιες πλημμύρες οι οποίες συνήθως προκαλούνται από ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως ο συνδυασμός υψηλής παλίρροιας και των έντονων καταιγίδων. Οι παράκτιες πλημμύρες ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικό αριθμό ανθρώπων. Εκτιμήθηκε, το 1990, ότι περίπου 1.2 δισεκατομμύρια άνθρωποι ζούσαν σε παράκτιες περιοχές, και αυτός ο αριθμός αναμένεται να αυξηθεί σε τουλάχιστον 1,8 δισ. τις επόμενες δεκαετίες. Ο κίνδυνος παράκτιων πλημμυρών έχει αυξηθεί από το 1990 και γενικά θεωρείται ότι θα αυξηθεί ακόμη περισσότερο κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, λόγω της προβλεπόμενης αύξησης της στάθμης της θάλασσας, των πιο ακραίων καιρικών συνθηκών και την αύξηση της διάβρωσης των ακτών εξαιτίας των αυξανόμενων επιπέδων ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα και της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι πιο εκτεθειμένοι πληθυσμοί είναι αυτοί που ζουν σε χώρες με περιορισμένη προσαρμοστική ικανότητα, όπου οι παράκτιες πλημμύρες ενδέχεται να επηρεάσουν έναν μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων, καθώς η αντίσταση σε πλημμύρες και ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης είναι λιγότερο ανεπτυγμένοι. Η πυκνότητα του παράκτιου πληθυσμού καθιστούν πιθανό οι επιπτώσεις των πλημμυρών στην υγεία να επηρεάσουν μεγάλο αριθμό ανθρώπων (Menne et al., 2013).

#### 2.4.4: Επιπτώσεις από πλημμύρες

Οι πλημμύρες αποτελούν μορφή φυσικής καταστροφής, η οποία έχει δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον, όσο και στην οικονομία και την κοινωνία του τόπου στον οποίο συμβαίνει. Η κλιματική αλλαγή των τελευταίων ετών έχει εντείνει την συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων, καθώς λαμβάνουν χώρα ολοένα και πιο συχνά ραγδαία βροχοπτώτικα φαινόμενα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση των πλημμυρικών επιπτώσεων παγκοσμίως, αλλά και την επέκτασή τους σε περισσότερες χώρες. Η ανησυχητική αυτή ένταση των επιπτώσεων κατέστησαν αναγκαία την θέσπιση νέων αρχών και βάσεων για την αντιμετώπιση των πλημμυρών και των επιπτώσεών τους, όχι ως μεμονωμένα τμήματα, αλλά όλων των πλημμυρικών επιπτώσεων συνολικά. Αυτή η ανάγκη οδήγησε μεταξύ άλλων και στη θέσπιση της Κοινοτικής Οδηγίας 2000/60/EC από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο για την διαχείριση των Υδατικών Πόρων. Στην Οδηγία διευκρινίζεται η ανάγκη εκτίμησης και αποτίμησης των υδατικών πόρων, που συμπεριλαμβάνει και την αξιολόγηση των επιπτώσεων από πλημμύρες.

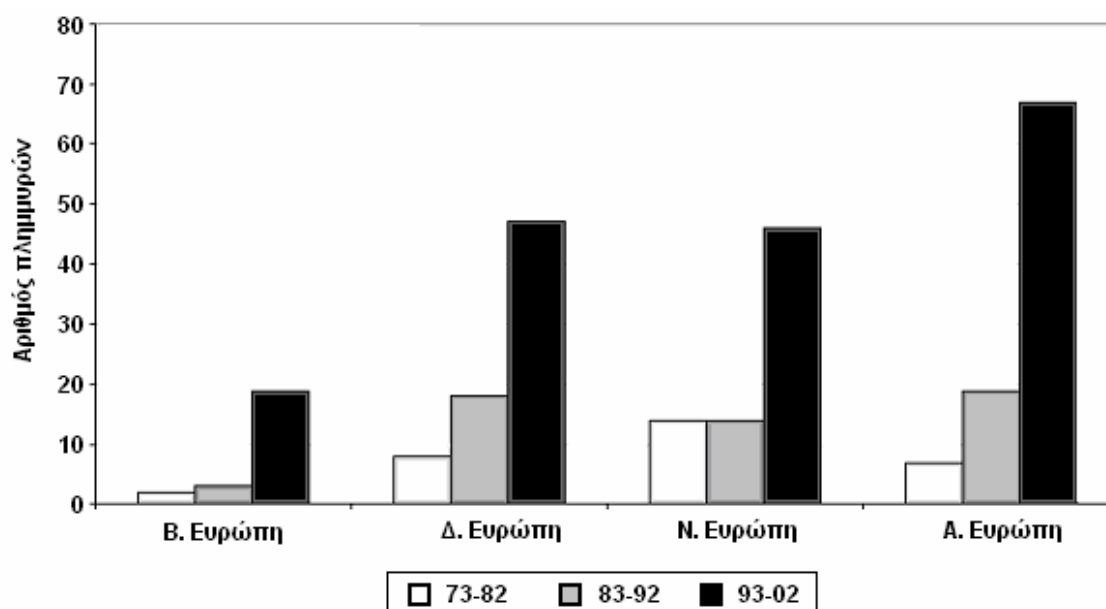


Εικόνα 4: Συνολικός αριθμός πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη, 1973-2002 (Hogoyis et al., 2003)

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλημμυρών αφορούν κυρίως την καταστροφή υδροβιοτόπων και ενδιαιτημάτων οργανισμών παρακείμενων στις πληγείσες περιοχές, με αποτέλεσμα την μη αναστρέψιμη καταστροφή τους σε πολλές περιπτώσεις, και την απώλεια

ειδών χλωρίδας και πανίδας, λόγω αδυναμίας προσαρμογής στις ακραία διαφορετικές συνθήκες του περιβάλλοντος (Green et al., 2000).

Οι οικονομικές επιπτώσεις από τις πλημμύρες είναι δύσκολο να υπολογιστούν, καθώς δεν υπάρχουν πλήρη δεδομένα για το σύνολο των πλημμυρικών επιπτώσεων. Από χώρα σε χώρα οι οικονομικές επιπτώσεις από τις πλημμύρες διαφέρουν, και μπορεί να είναι ιδιαίτερα δυσμενείς σε χώρες υπό ανάπτυξη, όπου δεν υπάρχουν οι κατάλληλες προβλέψεις και υποδομές για την διαχείριση των πλημμυρικών επιπτώσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι η πλειοψηφία των μεγαλύτερων πλημμυρικών καταστροφών έλαβαν χώρα σε χώρες της Ανατολικής Ευρώπης (EM-DAT).



Εικόνα 5: Συνολικός αριθμός πλημμυρικών γεγονότων ανά περιφέρεια στην Ευρώπη (Hogois et al., 2003).

Οι συνολικές οικονομικές επιπτώσεις από πλημμυρικά γεγονότα στην Ευρώπη τις τελευταίες 3 δεκαετίες ανήλθαν στα 72 δισεκατομμύρια ευρώ, ποσό 3 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της δεκαετίας του 1970 (Hogois, 2003)

Επιπλέον των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων, οι πλημμύρες έχουν και κοινωνικές επιπτώσεις, με τις κυριότερες κοινωνικές επιπτώσεις να είναι ο εκτοπισμός των πληγέντων πληθυσμών και την αδυναμία στέγασής τους και οικονομικής στήριξής τους από το κράτος, εντείνοντας φαινόμενα φτώχειας και κοινωνικής ανισότητας (Bouwen et al, 2004).

#### 2.4.5: Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, αναγνωρίζοντας μεταξύ άλλων, ότι οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν, μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημιές στο περιβάλλον, να θέσουν σοβαρά σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη και να υπονομεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες της Κοινότητας έθεσε σε ισχύ την Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Η Οδηγία αποσκοπεί στη θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. Σύμφωνα με την Οδηγία τα Κράτη Μέλη πρέπει να προβούν στις ακόλουθες δράσεις:

- Διεξαγωγή Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνου Πλημμύρας (εφεξής ΠΑΚΠ) για κάθε Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΠΛΑΠ) ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού που βρίσκεται στην επικράτειά τους. Βάσει της ΠΑΚΠ προσδιορίζονται οι περιοχές για τις οποίες συμπεραίνεται ότι υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα.
- Κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας σε επίπεδο ΠΛΑΠ για τις ανωτέρω περιοχές
- Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) σε επίπεδο ΠΛΑΠ για τις περιοχές που υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα σύμφωνα με τα οριζόμενα στο άρθρο 7 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Τα ΣΔΚΠ θα πρέπει να εστιάζονται στην πρόληψη, στην προστασία και στην ετοιμότητα. Προκειμένου να δοθεί στους ποταμούς περισσότερος χώρος, τα εν λόγω σχέδια θα πρέπει να εξετάζουν, όπου είναι δυνατόν, τη διατήρηση ή/και αποκατάσταση πλημμυρικών περιοχών, καθώς και μέτρα πρόληψης και μείωσης των ζημιών που προκαλούνται από τις πλημμύρες στην υγεία και τη ζωή των ανθρώπων, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά, οικονομική δραστηριότητα και στις υποδομές. Τα ΣΔΚΠ λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν και

παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των περιοχών αυτών (Οδηγία 2007/60/ΕΚ).

Η οδηγία 2007/60/ΕΚ ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο με την ΚΥΑ 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ1108/Β/21-07-2010), και ακολούθως πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω διεργασίες:

- Ολοκληρώθηκε και υποβλήθηκε στην ΕΕ η Έκθεση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας (Μάρτιος 2012).
- Ολοκληρώθηκε ο Προσδιορισμός των Ζωνών Δυσνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας στα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας και υποβλήθηκε στην ΕΕ επικαιροποίηση της Έκθεσης Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας (Νοέμβριος 2012).
- Επικαιροποιήθηκε η Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας για τη λεκάνη απορροής του π. Έβρου (Νοέμβριος 2014).
- Ολοκληρώθηκαν και υποβλήθηκαν στην ΕΕ οι Χάρτες Επικινδυνότητας και Κινδύνων Πλημμύρας για τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της Χώρας (Μάρτιος 2017)
- Ολοκληρώθηκαν, εγκρίθηκαν από την Εθνική Επιτροπή Υδάτων και υποβλήθηκαν στην ΕΕ τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας όλων των Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας μεταξύ των οποίων και ένα ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για τη λεκάνη απορροής του π. Έβρου (Ιούλιος 2018):

Ο σκοπός της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ είναι η θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και την διαχείριση των πλημμυρικών κινδύνων, με απώτερο στόχο την απομείωση ή και εξάλειψη των κινδύνων αυτών στον άνθρωπο, το περιβάλλον, τα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς και την οικονομία.

## Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση Επιφανειακών Υδάτων

### 3.1: Εισαγωγή

Η κατανόηση και εκτίμηση των φυσικών και τεχνητών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής ποταμού αποτελεί πρόβλημα και πρόκληση για τους ερευνητές. Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια κατέστησε δυνατή τη σχεδίαση και δημιουργία δεκάδων μοντέλων τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης ενός συστήματος. Τα μοντέλα αποτελούν σήμερα ένα εργαλείο διαχείρισης φυσικών και τεχνητών συστημάτων, πρόγνωσης της συμπεριφοράς τους και πρόληψης τυχόν επικίνδυνων καταστάσεων. Μοντέλο είναι η αναπαράσταση ενός συστήματος με σκοπό τη διερεύνηση και την κατανόηση της λειτουργίας και της τρέχουσας συμπεριφοράς του, τη σύγκριση εναλλακτικών σχημάτων λειτουργίας και την εκτίμηση και την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από παράγοντες όπως ο σκοπός της μελέτης, η εμπειρία του μελετητή ή το εύρος και μέγεθος των διαθέσιμων δεδομένων. Ένα από τα προβλήματα των επιστημόνων και ερευνητών είναι η έλλειψη επαρκών και ποιοτικών πραγματικών δεδομένων. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την σύνθεση δεδομένων μέσω προσομοίωσης δηλαδή την παραγωγή τεχνητών δεδομένων ίδιων χαρακτηριστικών με τα πραγματικά που χρησιμοποιήθηκαν σαν αφετηρία.

### 3.2: Υδρολογικά Μοντέλα

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι γενικά μαθηματικά μοντέλα ικανά να προσομοιώσουν τις υδρολογικές διεργασίες στο εδαφικό τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Τα μοντέλα αυτά προσπαθούν να παραστήσουν φυσικές διεργασίες (π.χ. βροχόπτωση, εξάτμιση, διήθηση, επιφανειακή απορροή) μέσω διακριτών, αναλυτικών και αλγεβρικών μαθηματικών εκφράσεων (Borah and Bera 2003; Migliaccio and Srivastava 2007).



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

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

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

4. **Προσδιοριστικά ή στοχαστικά:** Τα στοχαστικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα στις παραμέτρους του μοντέλου ενώ τα προσδιοριστικά χαρακτηρίζουν τις διεργασίες με συγκεκριμένες τιμές και η αβεβαιότητα δε λαμβάνεται υπόψη, οπότε το ίδιο σύνολο τιμών εισόδου δίνει πάντα το ίδιο σύνολο τιμών εξόδου. Επίσης πολλά προσδιοριστικά μοντέλα θεωρούν ότι η ροή είναι σταθερή σε σχέση με το χρόνο (steady), ενώ άλλα θεωρούν ότι η ροή αλλάζει κατά το χρονικό διάστημα που προσομοιώνει το μοντέλο (unsteady).
5. **Μετρούμενων παραμέτρων ή εκτιμώμενων παραμέτρων μοντέλα:** Τα μετρούμενων παραμέτρων μοντέλα χρησιμοποιούν παραμέτρους οι οποίες προσδιορίζονται από τις ιδιότητες του συστήματος που μελετάται, είτε με απευθείας μετρήσεις είτε έμμεσα με μεθόδους που βασίζονται στις μετρήσεις. Τα εκτιμώμενων παραμέτρων μοντέλα περιλαμβάνουν παραμέτρους που δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές τους. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι τιμές αυτές πραγματοποιείται προσαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα εισόδου και εξόδου.

Τα στάδια δημιουργίας ενός μοντέλου χωρίζονται σε (Schnoor, 1997):

1. Επιλογή τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
2. Κωδικοποίηση – Δημιουργία μοντέλου
3. Βαθμονόμηση Μοντέλου (Model Calibration)
4. Επαλήθευση Μοντέλου (Verification)
5. Αξιοπιστία Μοντέλου (Validation)
6. Σύγκριση προβλέψεων με δεδομένα στο μέλλον
7. Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)
8. Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis)

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ποτάμια, ρέματα, λίμνες και στο υπόγειο νερό καθορίζεται από τη θέση του επιφανειακού νερού σε σχέση με το σύστημα της υπόγειας ροής, από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, όπου λαμβάνει χώρα η υπόγεια ροή και τέλος από το

κλίμα της υπό εξέταση περιοχής (Winter, 1999). Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο επιφανειακό και στο υπόγειο νερό ελέγχεται από την κατανομή και το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας στο σχετιζόμενο με το ρέμα υδροφορέα, από τη σχέση της στάθμης του ρέματος με την παρακείμενη υπόγεια στάθμη, από τη γεωμετρία και τη θέση του ρέματος στον υδροφορέα. Γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η αλληλεπίδραση των επιφανειακών και των υπογείων ροών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής, από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και από τη σχετική θέση του επιφανειακού νερού ως προς την υπόγεια στάθμη. Τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής σχετίζονται με τη χρονική και χωρική κατανομή της στάθμης του ρέματος, τη ταχύτητα ροής και τη θερμοκρασία του ρευστού στο ρέμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι διαφορετικά χαρακτηριστικά στη ροή του επιφανειακού νερού είναι δυνατό να μεταβάλλουν την υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου μέσω διάβρωσης ή απόθεσης φερτών υλικών, επηρεάζοντας έτσι την ένταση της αλληλεπίδρασης της επιφανειακής με την υπόγεια ροή (Sophocleous, 2002). Κατά καιρούς έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες ταυτόχρονης προσομοίωσης της επιφανειακής και της υπόγειας ροής του νερού.

Η μαθηματική προσομοίωση του συνδυασμού αυτού περιλαμβάνει

- a. την επίλυση των εξισώσεων της επιφανειακής ροής,
- b. την επίλυση της κατάλληλης εξίσωσης υπόγειας ροής και
- c. το συνδυασμό της επιφανειακής και της υπόγειας ροής μέσω της διαρροής (διήθησης), που λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια επιφανειακής και υπόγειας ροής (Winter, 1999).

Το επίπεδο της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου μαθηματικής προσομοίωσης εξαρτάται α) από τις παραδοχές, που γίνονται για την απλούστευση των ισχυουσών εξισώσεων, β) από τη χωρική διάσταση (1-D, 2-D, 3-D) και γ) από το εάν η ροή έχει χρονική διάσταση ή όχι, δηλαδή ασταθής (μη μόνιμη) ή σταθερή (μόνιμη). Επίσης τα διάφορα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται μεταξύ τους βάση του τύπου των εξισώσεων και των μεθόδων επίλυσης τους, καθώς και από τον τρόπο συνδυασμού της επιφανειακής και της υπόγειας ροής. Η κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να αντιπροσωπευθεί από δύο συνιστώσες, την επιφανειακή κίνηση του νερού (overland flow) και την κίνηση του νερού σε ανοιχτούς αγωγούς (channel flow). Οι μηχανισμοί

προσομοίωσης της κίνησης του νερού μπορεί να είναι απλές προσομοιώσεις τύπου Muskingum-Cunge, όπου οι τυπικά βαθμονομημένες παράμετροι της μεθόδου Muskingum συνδέονται με φυσικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, (προέλευση και ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, κλίση πυθμένα του ρέματος, παροχή ανά μονάδα πλάτους), είτε με την πιο λεπτομερή και ορθή θεωρητικά μέθοδο της περιγραφής της κίνησης του νερού σε ανοιχτούς αγωγούς, που διέπεται από ένα σύστημα δύο διαφορικών εξισώσεων, γνωστών ως εξισώσεων Saint-Venant. Οι εξισώσεις Saint-Venant εκφράζουν μαθηματικά τις αρχές της διατήρησης της μάζας και της ενέργειας. Τα φυσικά ρέματα μπορεί να βρίσκονται σε υδραυλική επαφή με τους υπόγειους υδροφορείς μέσω του πυθμένα τους, οπότε η διήθηση και η υπόγεια ροή θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα δια μέσου κορεσμένου πορώδους μέσου. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ικανοποιητικά από κάποια απλή εξίσωση, που βασίζεται στο νόμο του Darcy. Σε διαφορετική όμως περίπτωση, ο υπολογισμός της διήθησης και της υπόγειας ροής γίνεται, είτε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο διήθησης όπως αυτά των Horton, Kostiaikov, Green-Ampt, Philip, κ.λ.π., είτε με την πιο αυστηρή θεωρητικά μέθοδο προσομοίωσης της κίνησης του νερού σε ένα κορεσμένο – ακόρεστο πορώδες μέσο, με βάση την εξίσωση Richards. Η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού μέσα σε φυσικά υδατορεύματα, ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις την αναλυτική και την αριθμητική. Αναλυτική ονομάζεται η λύση εξισώσεων με τη χρήση μαθηματικών τύπων και αριθμητική, η λύση των εξισώσεων που λαμβάνεται με μια διαδικασία επαναλαμβανόμενων βημάτων. Εκτός από ειδικές περιπτώσεις οι εξισώσεις Saint Venant και η εξίσωση Richards δεν έχουν αναλυτικές λύσεις. Για την επίλυση τους χρησιμοποιούμε αριθμητικές προσεγγίσεις, δηλαδή διαδικασίες επαναλαμβανόμενων βημάτων, με τη βοήθεια μεθόδων πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων όγκων. Γενικά η ακρίβεια της αριθμητικής προσομοίωσης του φυσικού φαινομένου εξαρτάται καταρχήν από τη μαθηματική περιγραφή του, την αριθμητική τεχνική, που χρησιμοποιείται στην επίλυση της εξίσωσης καθώς και από την ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων, που υπεισέρχονται στις εξισώσεις.

### 3.3: Γενικές αρχές προσομοίωσης των πλημμυρών

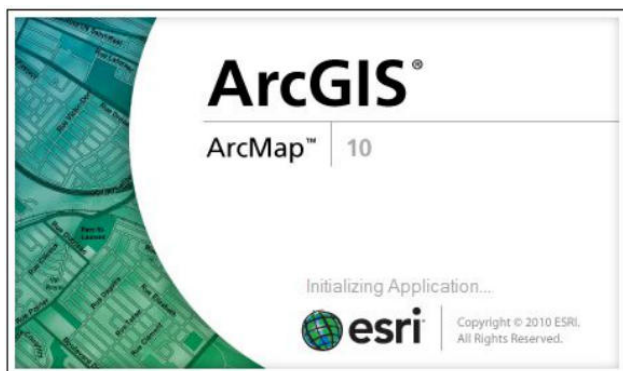
Η πλημμύρα ορίζεται εύκολα ποσοτικά με βάση κάποιο όριο παροχής ή στάθμης, η υπέρβαση του οποίου συνιστά “πλημμύρα” αν αναφερόμαστε σε υδατόρευμα. Μια τέτοια παροχή μπορεί να προκαλέσει υπερχειλίση της κοίτης του υδατορεύματος ή ανεπιθύμητη κατάκλιση κάποιας περιοχής κοντά στο υδατόρευμα. Η κύρια παράμετρος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

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

## Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση λογισμικού που χρησιμοποιείται (Mike FLOOD και ArcGIS).

### 4.1: ESRI ArcGIS

Το ArcGIS Desktop αποτελεί μια σουίτα εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα ArcMap, ArcCatalog και ArcToolbox. Με συνδυαστική χρήση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια χρειαστεί όσον αφορά τη δημιουργία και την επεξεργασία χαρτών GIS, είτε απλή είτε πολυσύνθετη, όπως



χαρτογράφηση, γεωγραφική ανάλυση, επεξεργασία και σύνθεση δεδομένων, διαχείριση δεδομένων, απεικόνιση και γεωανάλυση. (esri.com, accessed on 13/08/19)

Από τη σουίτα ArcGIS, έγινε χρήση κυρίως του προγράμματος ArcMap, καθώς οι κυριότερες εργασίες που χρειάστηκαν ήταν δημιουργία κι επεξεργασία αρχείων shape file και raster. Το ArcMap είναι το κεντρικό πρόγραμμα της σουίτας ArcGIS Desktop, και χρησιμοποιείται για όλες τις εργασίες που έχουν να κάνουν με χάρτες, όπως χαρτογράφηση, ανάλυση χαρτών και επεξεργασία. Οι χάρτες απεικονίζονται σε μορφή σελίδας συμπεριλαμβάνοντας ένα γεωγραφικό παράθυρο (data frame) ως βάση, με μια σειρά επιπέδων, λεζαντών, κλιμάκων και άλλων στοιχείων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αρχεία shapfile για την εισαγωγή των δεδομένων, αλλά και αρχεία καννάβου raster, που περιείχαν αριθμητική πληροφορία για κάθε κελί του καννάβου. Το μέγεθος καννάβου ήταν 5μ επί 5μ. Τα αρχεία είναι ένα ευρέως διαδεδομένα και ομαδοποιούνται σε 3 ή και περισσότερα αρχεία, τα οποία και είναι αλληλεξαρτώμενα. (ArcGIS Handbook, Univ. of Maryland, 2012).

## 4.2: MIKE HYDRO River

Το MIKE HYDRO είναι το κοινό Γραφικό Περιβάλλον εργασίας για έναν αριθμό προϊόντων της σειράς MIKE Powered by DHI. Στο κοινό αυτό γραφικό περιβάλλον, το MIKE Hydro προσφέρει ένα σύγχρονο περιβάλλον εργασίας για το χρήστη, με την διεπαφή να επικεντρώνεται στη χρήση χαρτών για την κατασκευή των μοντέλων, τον καθορισμό των επιμέρους παραμέτρων του μοντέλου και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για εφαρμογές σχετικές με την διαχείριση υδάτινων πόρων.

Για το MIKE HYDRO υπάρχουν δύο κυρίως μοντέλα που κάνουν χρήση της διεπαφής, το Basin module και το River module. Το MIKE HYDRO Basin είναι μια βάση ανάπτυξης μοντέλων για διαχείριση και σχεδιασμό μέτρων για Υδρολογικές Λεκάνες απορροής. Οι κυριότερες εφαρμογές του Basin module είναι:

- Ολοκληρωμένες μελέτες διαχείρισης Υδατικών Πόρων
- Υλοποίηση εναλλακτικών λύσεων για κατανομή υδάτων κι επίλυση προβλημάτων λειψυδρίας
- Βελτιστοποίηση χρήσης και λειτουργίας λιμνών αποθήκευσης νερού και υδροηλεκτρικών σταθμών
- Διερεύνηση ταυτόχρονης χρήσης υπόγειων υδάτων και επιφανειακών υδάτων
- Βελτιστοποίηση πρακτικών άρδευσης

Το MIKE HYDRO Basin με τα μοντέλα που αναπτύσσει κάνει χρήση δικτύων ποταμών και υπολεκανών που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης του συγκεκριμένου υπό μελέτη ποταμού ως βασικά στοιχεία εισόδου του μοντέλου. Επιπρόσθετα από τα παραπάνω, το λογισμικό προσφέρει δυνατότητες για επέκταση και προσθήκη επιπλέον λεπτομερειών στο υπό κατασκευή μοντέλο, με τις κυριότερες να είναι τα River Routing, Water Users (λεπτομερής παραμετροποίηση των οντοτήτων που κάνουν χρήση του νερού, τόσο για κανονικούς χρήστες, όσο και για άρδευση), Hydro Power and Reservoirs, Hydrology (για προσομοίωση επιφανειακής απορροής λόγω βροχόπτωσης), Groundwater, Global ranking of water users, Reservoir

sedimentation (υπολογισμός μεταφοράς ιζήματος στις λίμνες αποθήκευσης), και Water quality options σε συνεργασία με το MIKE ECO Lab. (DHI, 2017)

Για τους σκοπούς της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής το HYDRO Basin δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς ο κυριότερος λόγος χρήσης της σουίτας MIKE είναι η προσομοίωση πλημμυρικών συμβάντων και η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του υπό εξέταση ποταμού κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώτικών φαινομένων. Κατά συνέπεια, το μοντέλο που χρησιμοποιείται δεν είναι το HYDRO Basin, αλλά το HYDRO River, καθώς πρόκειται για υδραυλικό κι όχι υδρολογικό μοντέλο.

Το MIKE HYDRO River είναι το module το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την μοντελοποίηση της επιφανειακής ροής του υπό εξέταση ποταμού στον Κάτω Σταλό. Η βασική λειτουργία του River Module είναι ο καθορισμός, κατασκευή και η εκτέλεση μονοδιάστατων (1-D) υδραυλικών μοντέλων ποταμών, για χρήση σε ποικίλα σενάρια υδραυλικής μοντελοποίησης.

Οι τυπικές εφαρμογές του River module είναι οι παρακάτω:

- Εφαρμογές υδραυλικής μελέτης ποταμών
- Ανάλυση πλημμυρών και μελέτες απομείωσης επιπτώσεων από πλημμυρικά γεγονότα
- Πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων ή φαινομένων ξηρασίας σε πραγματικό χρόνο
- Ανάλυση κατάρρευσης φραγμάτων
- Βελτιστοποίηση διεργασιών λιμνών αποθήκευσης και θυροφραγμάτων
- Οικολογική εκτίμηση και εκτίμηση ποιότητας νερού σε ποταμούς και υδροβιοτόπους
- Πρόγνωση επιπέδων ποιότητας νερού
- Μεταφορά ιζήματος και μακροχρόνια εκτίμηση αλλαγών στη μορφολογία ποταμών
- Μελέτες αποκατάστασης υδροβιοτόπων

Οι εφαρμογές του MIKE Hydro River που αναφέρονται παραπάνω είναι μέρος του πακέτου MIKE 11, με την αναβάθμιση του προηγούμενου πακέτου MIKE FLOOD.

Στην παρούσα διπλωματική σκοπός είναι η μοντελοποίηση επιφανειακής ροής, με σκοπό την προσομοίωση της στάθμης του υπό μελέτη ποταμού στο σημείο μέτρησης στάθμης. Καθίσταται



λοιπόν ξεκάθαρο ότι χρειάζεται το υδραυλικό module (River) για την 1-Δ προσομοίωση της στάθμης.

## Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση και περιγραφή περιοχής μελέτης

### 5.1: Περιγραφή περιοχής μελέτης – Ρέμα στην περιοχή του Σταλού

#### 5.1.1: Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής της περιοχής του Σταλού βρίσκεται έξι χιλιόμετρα δυτικά της πόλης των Χανίων, στην Βόρεια ακτή της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων στην Περιφέρεια Κρήτης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



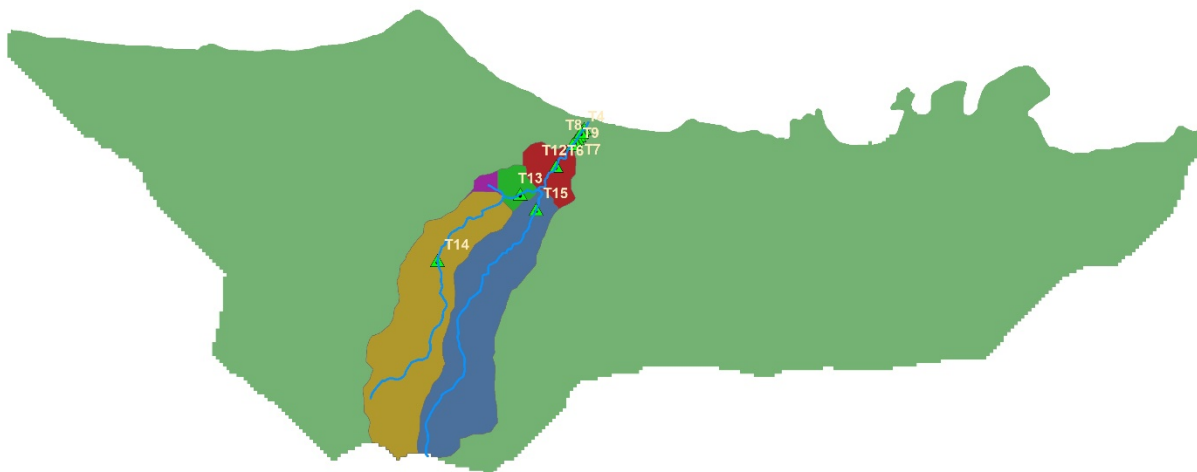
Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, με το υπό μελέτη ρέμα στον Σταλό Νέας Κυδωνίας

Η λεκάνη απορροής καταλαμβάνει έκταση 21.9 τετραγωνικά χιλιόμετρα, με περίμετρο 31.9 χιλιόμετρα, κι εκτείνεται σε κατεύθυνση Βορρά – Νότου από τα βόρεια παράλια του Νομού Χανίων, στον Κάτω Σταλό, έως τα νότια όρια του Άνω Σταλού, ενώ σε κατεύθυνση Δύση – Ανατολής από τον Πλατανιά έως το ρέμα του Κλαδισού. Το υπό μελέτη ρέμα βρίσκεται εντός

της λεκάνης απορροής, ξεκινώντας από 2 παρακλάδια στον Άνω Σταλό, που ενώνονται στα Νότια όρια του Κάτω Σταλού και καταλήγει στην παραλία του Κάτω Σταλού. Το ρέμα βρέθηκε να έχει 5 παρακλάδια, όπως ορίστηκαν από το λογισμικό ArcGIS και το Hydrology Toolbox, και κάθε ένα από αυτά είχε την δική του υπολεκάνη απορροής.



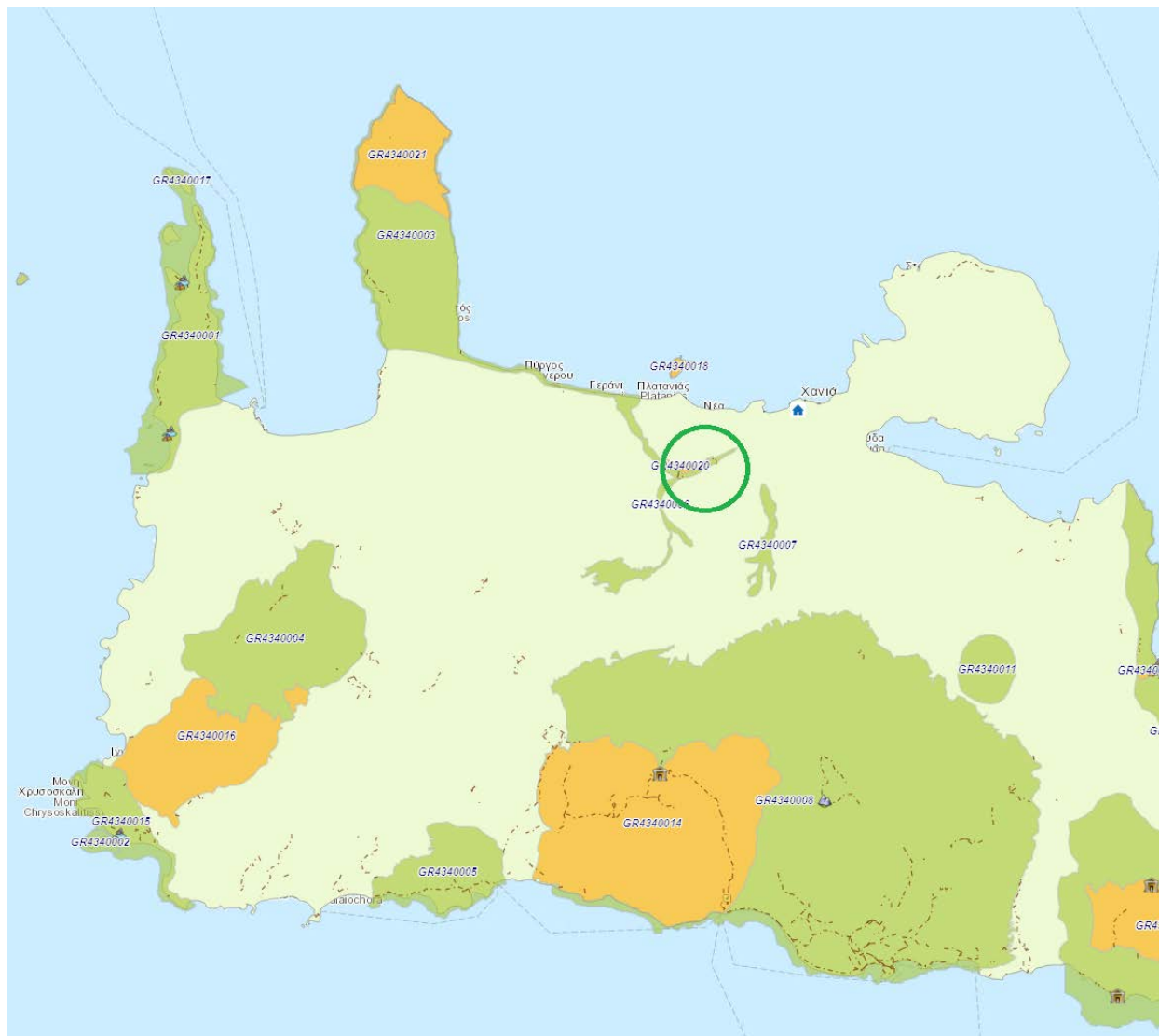
Εικόνα 7: Τοποθεσία της περιοχής μελέτης στη Βόρεια ακτή της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων



*Εικόνα 8: Ρέμα υπό μελέτη και υπολεκάνες των παρακλαδιών του ρέματος*

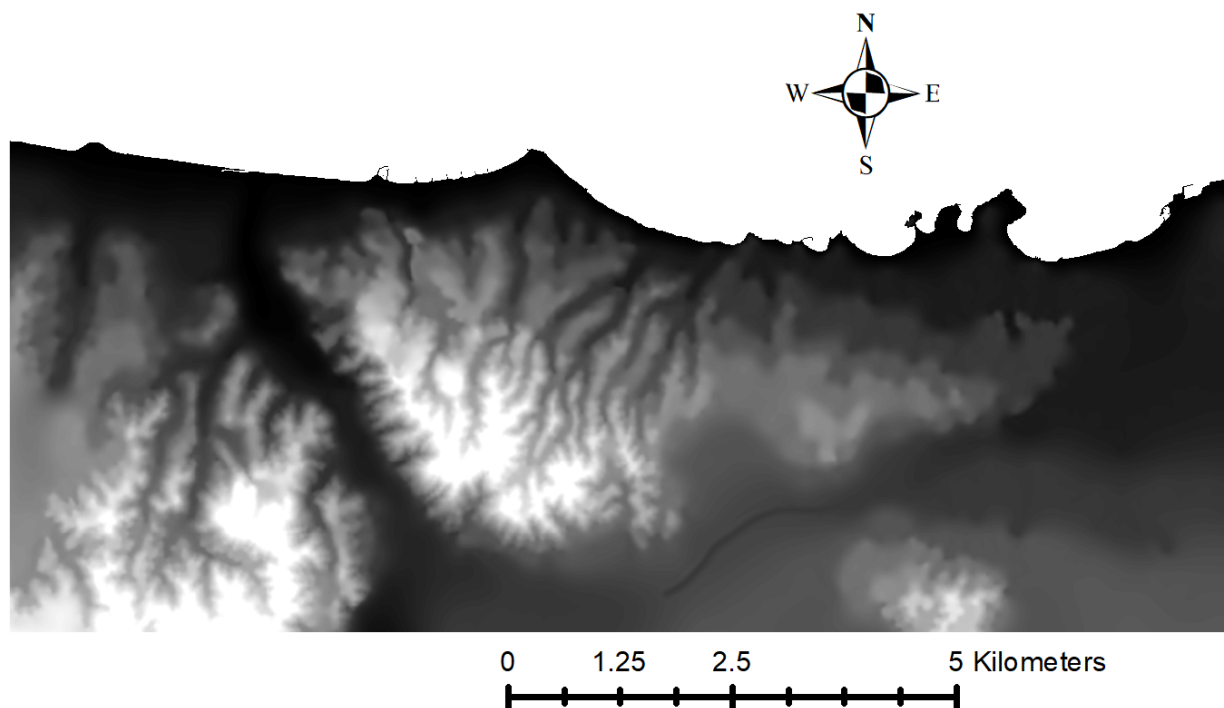
Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν περιοχές Natura 2000, στα ανάντη του ρέματος υπό μελέτη, όμως εκτός των ορίων μελέτης των επιμέρους υπολεκανών, όπως απεικονίζονται παρακάτω:



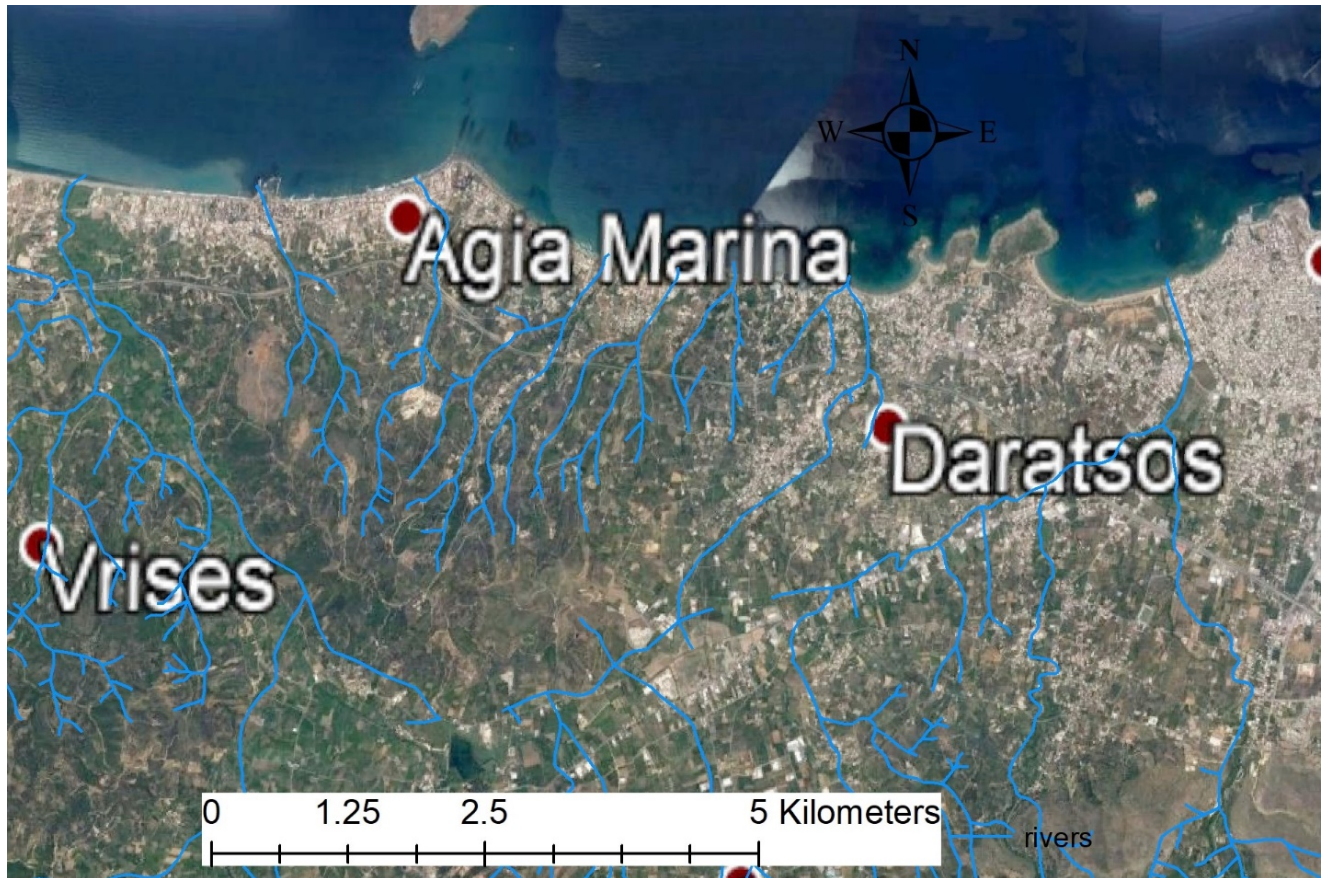


Εικόνα 9: Περιοχή Natura 2000 στην περιοχή μελέτης

Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής ποικίλει, με το μέγιστο υψόμετρο να φτάνει τα 265μ στα νότια της λεκάνης απορροής, και το ελάχιστο να βρίσκεται στα Βόρεια της περιοχής μελέτης, με υψόμετρο 0μ, στα παράλια του Κάτω Σταλού. Η βλάστηση είναι αραιή, ενώ το υδρογραφικό δίκτυο είναι σχετικά πυκνό, αλλά με μικρού μεγέθους ρέματα με εποχική ροή.



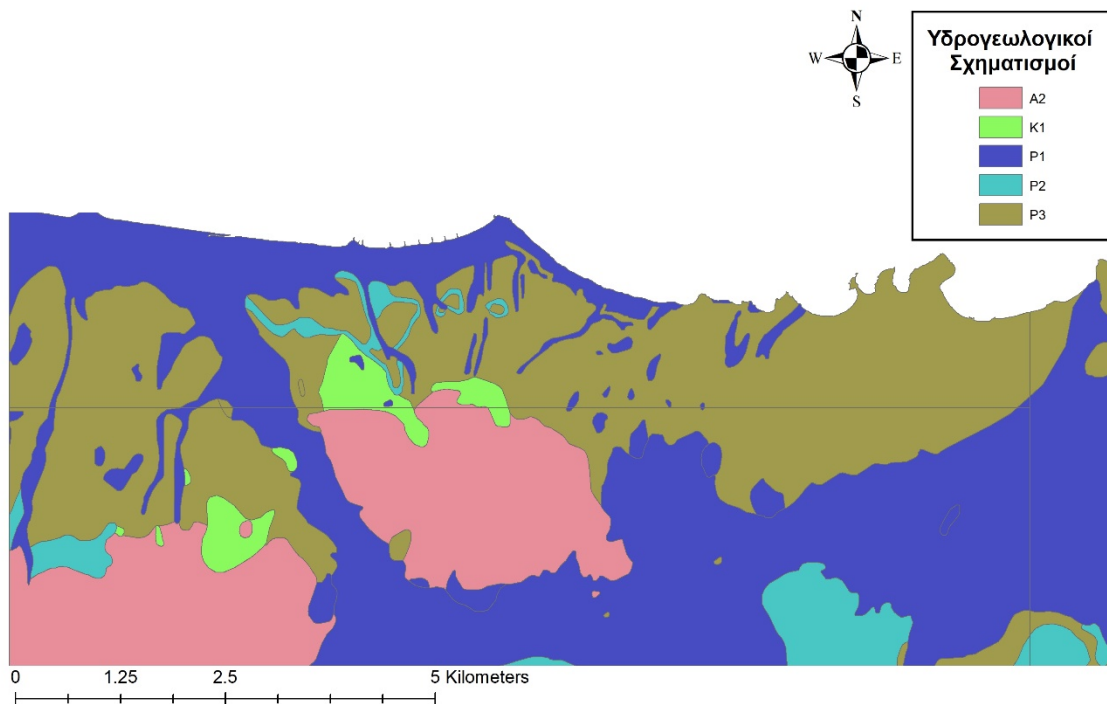
Εικόνα 10: Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου της περιοχής μελέτης (DEM - Digital Elevation Model)



Εικόνα 11: Ρέματα στην περιοχή μελέτης

#### 5.1.2: Γεωλογία

Στην περιοχή μελέτης οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι πορώδεις σχηματισμοί κυμαινόμενης υδροπερατότητας ως επί το πλείστον, με σημαντικές ποσότητες αδιαπέρατων γεωλογικών σχηματισμών, αλλά καρστικών πετρωμάτων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης

Η επεξήγηση των πετρωμάτων στο χάρτη ακολουθεί:

- A2: Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας.
- K1: Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.
- P1: Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες

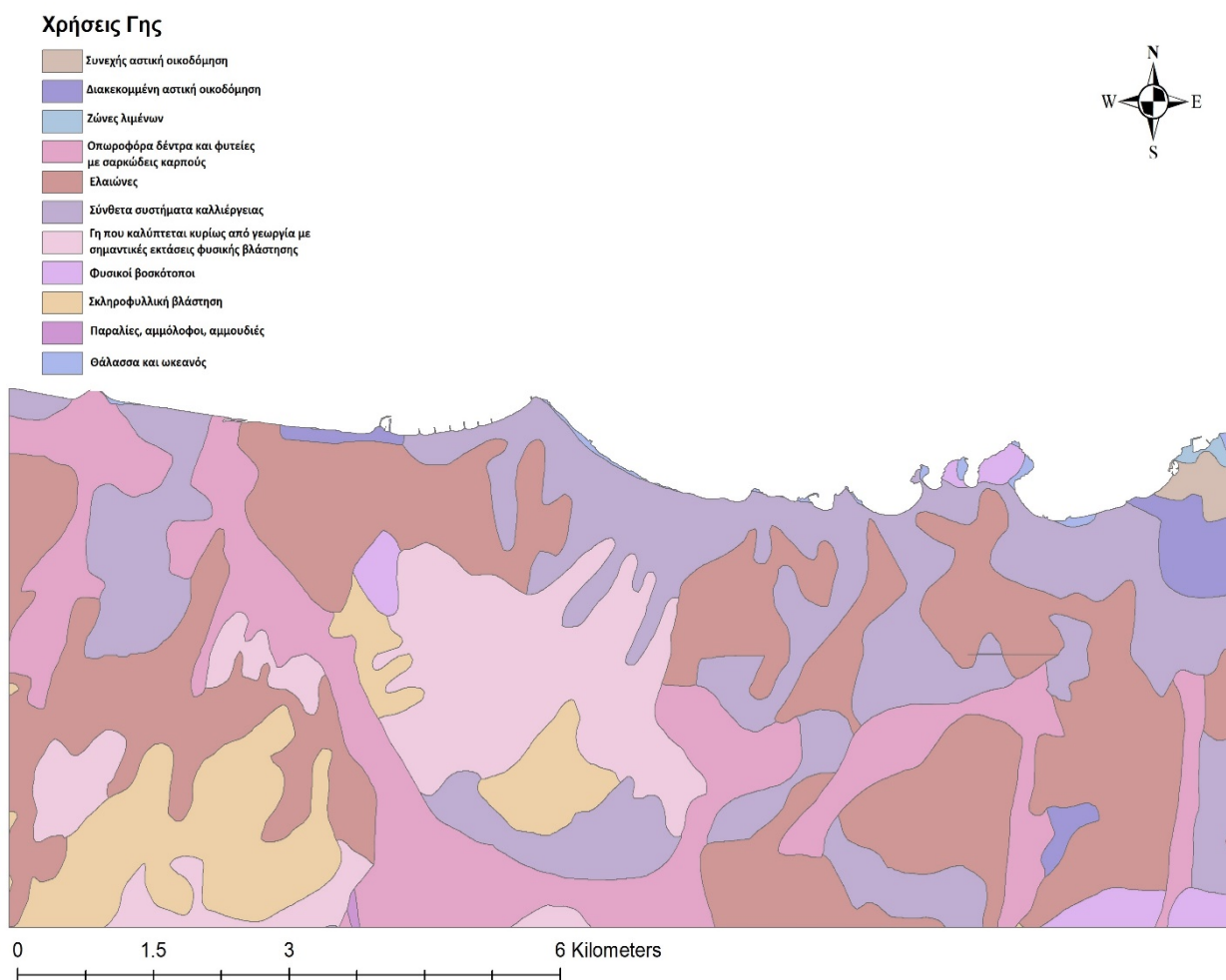


αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρινσης.

- P2: Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.
- P3: Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θεικών ιόντων.

#### 5.1.3: Χρήσεις Γης

Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης αποτελούνται κυρίως από ελαιώνες (32,8%), και εκτάσεις που καλλιεργούνται με σύνθετα συστήματα καλλιέργειας (23,6%). Σε μικρότερο ποσοστό η έκταση της περιοχής μελέτης καλύπτεται από οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς (17,5%), καθώς επίσης από καλλιεργημένα αγροτεμάχια με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (12,6%) και σκληροφυλλική βλάστηση (8,8%). Οι υπόλοιπες κατηγορίες εδαφοκάλυψης απαντώνται σε μικρότερα ποσοστά, συγκεκριμένα



Εικόνα 13: Χάρτης χρήσεων γης, σύμφωνα με τα τελευταία του Corine Land Cover, για την περιοχή μελέτης.

## Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση μεθοδολογίας

### 6.1: Μεθοδολογία χωρικής εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου με χρήση GIS

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η Οδηγία 2007/60/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης προβλέπει και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών με στόχο την βιωσιμότητα και καλή ποιότητα του νερού και του περιβάλλοντός του. Ένα σημαντικό σημείο της Οδηγίας είναι η αδυναμία υλοποίησης πλήρους αντιπλημμυρικής προστασίας, σε βαθμό που θα επιτρέψει την πρόβλεψη κι αποφυγή του συνόλου των πλημμυρικών γεγονότων. Η εφαρμογή της οδηγίας έγκειται στην υλοποίηση διαχειριστικών μέτρων και αξιολόγηση των επιπτώσεων σε ενδεχόμενα πλημμυρικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με τον Torterotot, για τη διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων και την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους, τα βιώσιμα πλάνα απαρτίζονται από 2 σημεία-κλειδιά:

- Ορθή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων
- Εκτίμηση της χωρικής έκτασης του πλημμυρικού κινδύνου
- Αποκατάσταση ζημιών μετά το πέρας του πλημμυρικού γεγονότος

Η ορθή στρατηγική διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων αφορά την εγκατάσταση σωστών υποδομών για την αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση του κινδύνου κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών φαινομένων. Στην δράση αυτή συμπεριλαμβάνονται τεχνικά έργα, που διασφαλίζουν την βέλτιστη απομείωση των όποιων επιπτώσεων από ένα πλημμυρικό γεγονός. Παραδείγματα τεχνικών έργων είναι φράγματα κατά μήκος της όχθης των ποταμών, έργα εκτροπής ροής ποταμών, και γενικότερα τεχνικά έργα που αποσκοπούν στη σταθεροποίηση της όχθης των ποταμών και ρεμάτων. Επιπροσθέτως, σημαντική κατηγορία είναι και τα έργα ενίσχυσης και απομείωσης της τρωτότητας των κατασκευών που βρίσκονται εντός της επικίνδυνης ζώνης. Επίσης, σημαντική είναι και η υλοποίηση ρυθμιστικών έργων, που αφορά κυρίως την υλοποίηση κανονισμών και διατάξεων για την αποτροπή στο μεγαλύτερο βαθμό των επιπτώσεων, με κυριότερο παράδειγμα διατάξεις για βέλτιστη πολεοδομική χωροταξία.

#### 6.1.1: Ορισμός και γενική περιγραφή του GIS

Η ανάγκη για αξιοπιστία και επεξεργασία των πληροφοριών οδήγησε το σύγχρονο άνθρωπο στη δημιουργία και ανάπτυξη εργαλείων που του επιτρέπουν να συλλέγει και να επεξεργάζεται αξιόπιστες πληροφορίες, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη ζωή του και το φυσικό περιβάλλον. Ένα σύστημα (ηλεκτρονικοί υπολογιστές και σχετικές περιφερειακές μονάδες) το οποίο διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για την καλύτερη δυνατή συλλογή, επεξεργασία και διαχείριση των πληροφοριών ονομάζεται Σύστημα Πληροφοριών. Όταν οι πληροφορίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με γεωγραφικές συντεταγμένες τότε χαρακτηρίζονται ως γεωγραφικές. Κατά επέκταση τα συστήματα πληροφοριών που διαχειρίζονται τις πληροφορίες αυτές (αυτό δεν αποκλείει το γεγονός να περιέχουν και μη γεωγραφικές πληροφορίες) ονομάζονται Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Ένας ευρύς ορισμός για τα ΓΣΠ δόθηκε από τον Goodchild το 1985 σύμφωνα με τον οποίο: Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης πληροφοριών σχετικών με ζητήματα γεωγραφικής φύσης. Από τον ορισμό αυτό γίνεται κατανοητό ότι τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών δεν είναι απλά ένα μέσο δημιουργίας χαρτών, διαγραμμάτων και πινάκων ποιοτικών δεδομένων, αλλά μία καινοτόμος τεχνολογία, η οποία ως κύριο σκοπό έχει την ανάλυση και τη μελέτη του τρισδιάστατου χώρου στον οποίο ζούμε, καθώς και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το φυσικό περιβάλλον και τον άνθρωπο.

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

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

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

#### 6.1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΓΣΠ (GIS)

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

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

- Οι διάφορες μορφές εξαγόμενων αποτελεσμάτων παράγονται πολύ γρήγορα, αποτελούνται από μεμονωμένα ή σύνθετα θέματα, για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση της βάσης δεδομένων και σε οποιαδήποτε κλίμακα.
- Η βάση δεδομένων μπορεί να ενημερώνεται εύκολα και επιτρέπει τον αποτελεσματικό εντοπισμό και ανάλυση των αλλαγών που έγιναν σε δύο ή περισσότερες περιόδους.
- Οι διάφορες μορφές ανάλυσης πραγματοποιούνται με πολύ μικρότερο κόστος και πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με κλασικές μεθόδους.
- Όλες οι αναλύσεις γίνονται με αντικειμενικό τρόπο και υπάρχει πλήρης αυτοματισμός στην παραγωγή αποτελεσμάτων.
- Υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού λογισμικών Τηλεπισκόπησης με λογισμικά GIS, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία ενημερωμένων κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο, βάσεων δεδομένων καθώς και την εισαγωγή, ανάλυση και εξαγωγή συγκεκριμένων δεδομένων (τοπογραφικά, υδρολογικά, εδαφολογικά κ.α.).
- Δυνατότητα σύνδεσης δεδομένων GPS (Global Positioning System) με GIS, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και διαδικτυακά συνδεδεμένα.
- Η παραγωγή χαρτών μέσω του GIS μπορεί να προσαρμοσθεί στις ιδιαίτερες ανάγκες ενός προβλήματος.

Εκτός όμως, από τα εμφανή πλεονεκτήματά τους, τα ΓΣΠ έχουν και κάποια μειονεκτήματα που σχετίζονται κυρίως με το κόστος αγοράς του λογισμικού και ανανέωσης της άδειας χρήσης, η εκτεταμένη εκπαίδευση που απαιτείται για αποτελεσματική εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους, η ασυμβατότητα δεδομένων μεταξύ διαφορετικών πακέτων λογισμικού και τύπων αρχείων και ο μεγάλος όγκος εργασίας για την ψηφιοποίηση και αποθήκευση δεδομένων από εκτυπωμένους χάρτες από υπηρεσίες και οργανισμούς.

Η εύρεση ενημερωμένων χαρτογραφικών υλικών, όπως χάρτες βλάστησης, κάλυψης γης, δημογραφικών πληροφοριών κλπ αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στην Ελλάδα για τους χρήστες των ΓΣΠ. Παρόλα αυτά, η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού έχει αρχίσει να παράγει ψηφιοποιημένα δεδομένα (χάρτες ισοϋψών, χρήσεων γης, γεωλογικούς χάρτες κ.α.) τα οποία αρχίζουν να είναι ευρέως διαθέσιμα στο κοινό, κι αυτό σε συνδυασμό με την πρόοδο στην

τεχνολογία διασύνδεσης και αποθήκευσης δεδομένων καθιστά την χωρική πληροφορία ολοένα και πιο εύκολα προσβάσιμη.

### 6.1.3: Υλοποίηση Χωρικής Εκτίμησης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας

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

Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω προσδιορίζονται οι επιμέρους παράγοντες που επηρεάζουν την συνολική πλημμυρική επικινδυνότητα στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, οι οποίοι είναι (Κουργιαλάς, 2010):

α) Υψόμετρο (Elevation)

β) Κλίση (Slope)

γ) Χρήσεις Γης (Land Use)

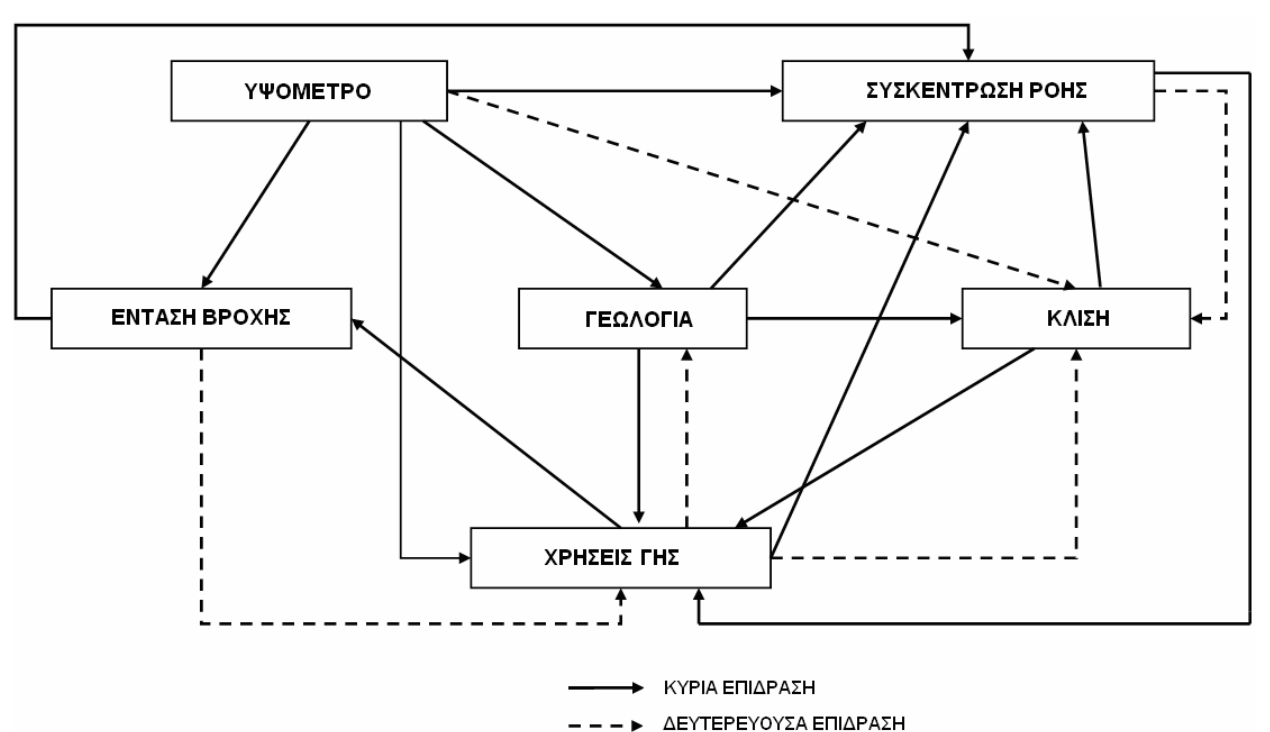
δ) Συγκέντρωση Ροής (Flow Accumulation)

ε) Γεωλογία (Geology)

στ) Ένταση Βροχόπτωσης (Rainfall Intensity)

Κάθε παράγοντας προσδιορίζεται σε χάρτη καννάβου (raster) για την μελετώμενη περιοχή.

Προκειμένου να καθοριστεί ο συντελεστής βαρύτητας (A) κάθε επιπέδου στο συγκεκριμένο παράγοντα, προτάθηκε μια κλίμακα τιμών διακύμανσης (points) από το 1-10, για το κάθε επίπεδο, αρχίζοντας με 10 points για την Πολύ Υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα (Πολύ





#### 6.1.4: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν:

**Γεωλογία περιοχής μελέτης:** Έχοντας διαθέσιμη γεωλογία για όλη την Κρήτη, εξάχθηκαν τα δεδομένα για την υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της υπολεκάνης είναι ταξινομημένοι στις παρακάτω κατηγορίες:

A2: Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας.

K1: Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

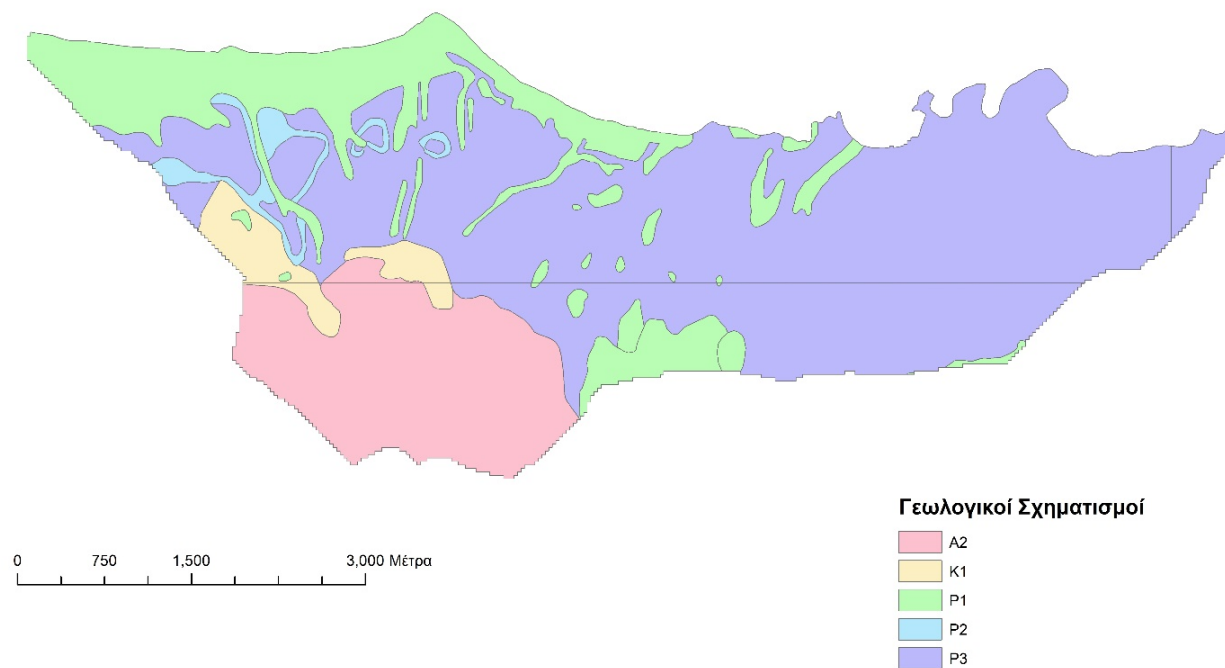
P1: Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.

P2: Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

P3: Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών

ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η περιοχή μελέτης και οι γεωλογικοί σχηματισμοί της.



*Εικόνα 15: Γεωλογικοί σχηματισμοί και κατηγοριοποίησή τους σύμφωνα με την υδροπερατότητά τους*

**Υψόμετρο:** Ο θεματικός χάρτης του υψομέτρου δημιουργήθηκε αρχικά από την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους (DEM – Digital Elevation Model) της περιοχής μελέτης. Το

μοντέλο αυτό αποτελεί και τη βάση για επόμενους θεματικούς χάρτες που δημιουργούνται στη συνέχεια.

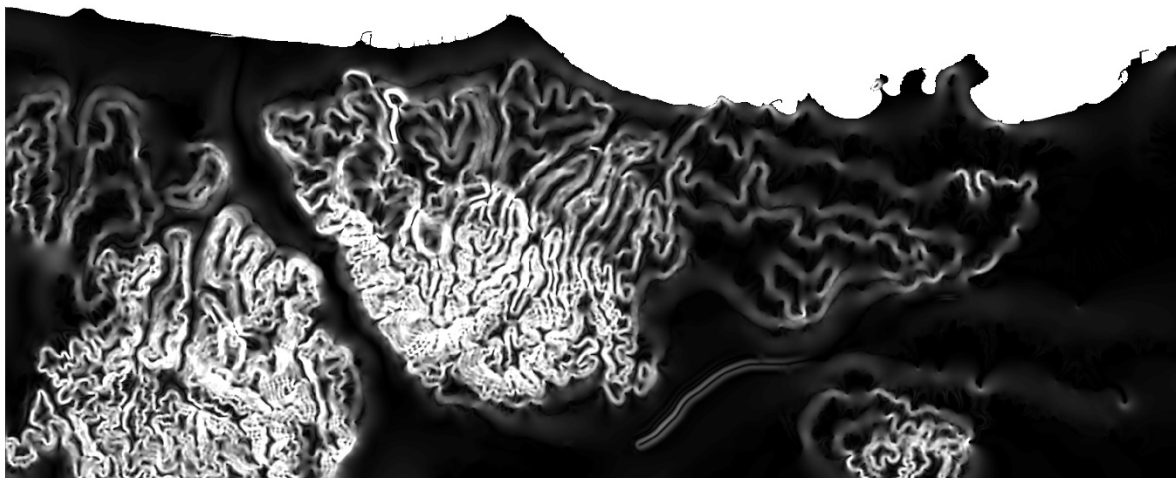
Το DEM δημιουργείται από ψηφιοποιημένους χάρτες ισοϋψών καμπύλων, οι οποίοι είναι της μορφής shapefile – polyline. Οι ισοϋψείς είναι σχεδιασμένες ανά 20 μέτρα, ενώ έχει συμπεριληφθεί και η ισοϋψής καμπύλη των 10μέτρων. Με την λειτουργία Topo to Raster του πακέτου Spatial Analyst tools δημιουργείται από τις ισοϋψείς καμπύλες το τρισδιάστατο ανάγλυφο εδάφους DEM. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η δημιουργία κελιών 5x5 μέτρων, με εμβαδόν κελιού 25m<sup>2</sup>.

**Βροχόπτωση:** Ο θεματικός χάρτης της έντασης βροχόπτωσης (rainfall intensity) κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας βροχομετρικά δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονταν στην περιοχή μελέτης. Καθώς κατά την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν υπήρχαν ακόμα δεδομένα βροχόπτωσης από τον νεοεγκατεστηθέντα μετεωρολογικό σταθμό, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από περιμετρικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, συγκεκριμένα από τον Πλατανιά, τα Χανιά και τον Αλικιανό. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν, βρισκόμενοι περιμετρικά της υπολεκάνης, καθώς επίσης και ο νέος μετεωρολογικός σταθμός και το σταθμήμετρο που εγκαταστάθηκαν.



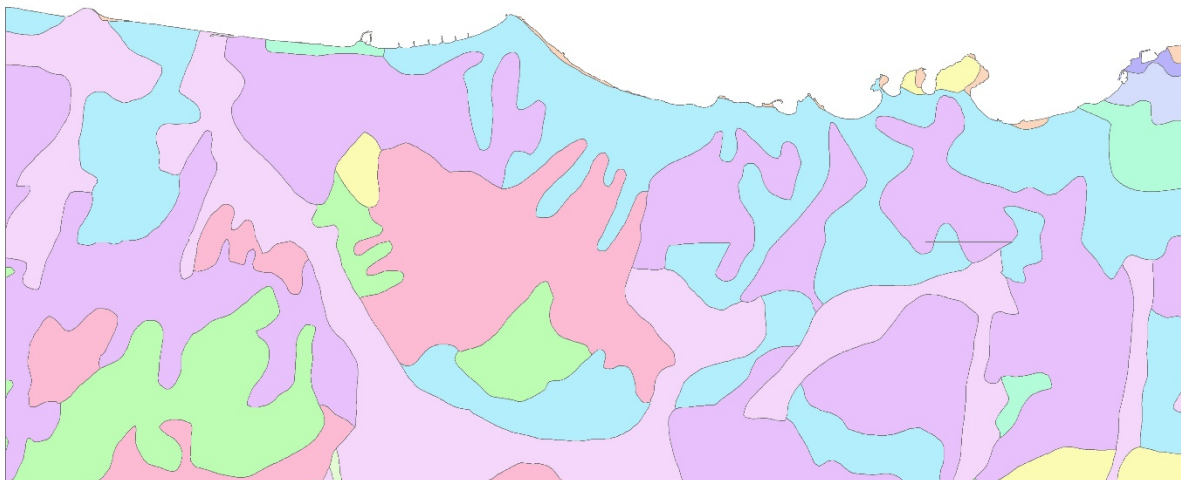
Εικόνα 16: Εγκατεστημένοι μετεωρολογικοί σταθμοί (κίτρινο) και νεοεγκατεστηθέντες σταθμοί μέτρησης στάθμης και βροχόπτωσης (πράσινο) στην περιοχή μελέτης.

**Κλίση (Slope):** Για τον θεματικό παράγοντα της κλίσης χρησιμοποιήθηκε το ανάγλυφο εδάφους, από το οποίο εξάχθηκε χάρτης κλίσεων τύπου raster. Συγκεκριμένα, έχοντας δημιουργήσει το τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους (DEM), έγινε χρήση της εντολής Slope, από την ομάδα εργαλείων Spatial Analyst tools -> Surface. Με την εντολή αυτή το λογισμικό εξάγει έναν κানাβο εικονοστοιχείων, με το καθένα από αυτά να περιέχει την πληροφορία της κλίσης, σε αριθμητική τιμή από 0 έως 90, που αντιστοιχεί στις μοίρες της γωνίας κλίσης του εδάφους στο συγκεκριμένο σημείο της περιοχής μελέτης.



*Εικόνα 17: Κλίση εδάφους στην περιοχή μελέτης: Μαύρο = 0 μοίρες, Άσπρο = 90 μοίρες*

**Χρήσεις Γης (Land Use):** Ο χάρτης χρήσεων γης βασίστηκε στα πιο πρόσφατα δεδομένα του Corine Land Cover, για την νήσο Κρήτη. Το αρχικό αρχείο κόπηκε στα όρια της περιοχής μελέτης και στη συνέχεια μετατράπηκε σε αρχείο raster, διαστάσεων 5 επί 5 μέτρων για κάθε εικονοστοιχείο.



*Εικόνα 18: Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης*

**Συνδυασμός Δεδομένων:** Έχοντας εξάγει τους θεματικούς χάρτες για την κάθε παράμετρο, οι τιμές των χαρτών κατηγοριοποιήθηκαν με βάση την συνεισφορά στην πλημμυρική επικινδυνότητα. Για τους χάρτες υψομέτρου, κλίσης, συσσώρευσης ροής και βροχής τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν με βάση την μέθοδο Natural Breaks (Jenks) σε 5 ομάδες, με βαθμούς 1, 2, 5, 8 και 10 για αντίστοιχη πλημμυρική επικινδυνότητα Πολύ Μικρή, Μικρή, Μέτρια, Υψηλή και Πολύ Υψηλή. Ο χάρτης χρήσεων γης μετατράπηκε όπως και οι υπόλοιποι σε χάρτη καννάβου raster, με κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης αναλόγως με τις επιπτώσεις τους στην πλημμυρική επικινδυνότητα. Ο σημαντικότερος παράγοντας ήταν κατά πόσο επηρεάζεται η εδαφική απορροφητικότητα, με την αστική δόμηση, οικοδομές και λοιπές καλυμμένες περιοχές να συνεισφέρουν με Πολύ Υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα, ενώ οι ακάλυπτες περιοχές με έντονη φυτοκάλυψη συνεισφέρουν Πολύ Χαμηλή πλημμυρική επικινδυνότητα.

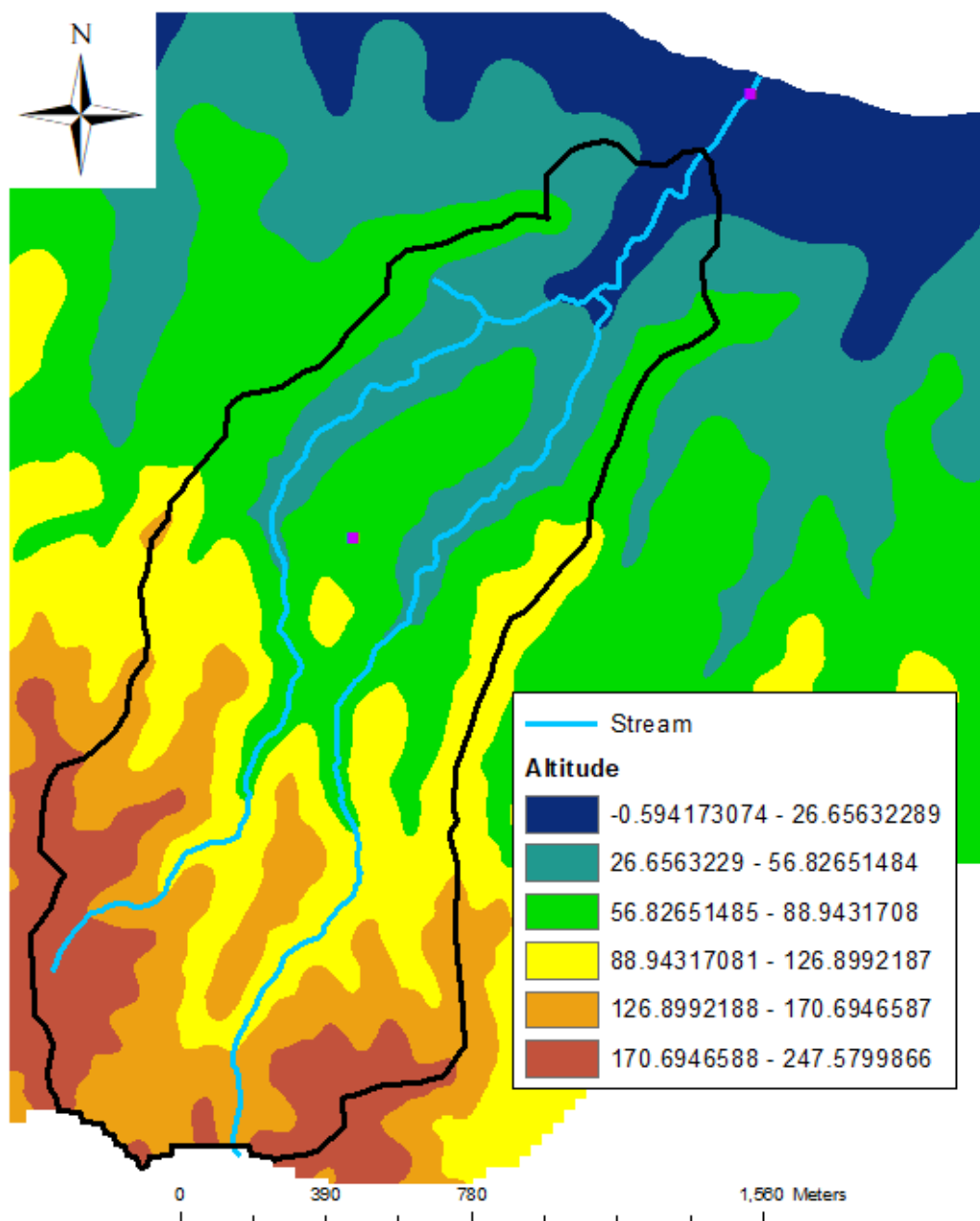


## 6.2: Παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης με το Mike HYDRO River

### 6.2.1: Συλλογή δεδομένων βροχόπτωσης και στάθμης

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, το οποίο ανέλαβε την μοντελοποίηση πλημμυρικών φαινομένων για την πιλοτική περιοχή του Κάτω Σταλού. Το λογισμικό MIKE HYDRO River επιλέχθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, καθώς πρόκειται για ένα εξελιγμένο λογισμικό μοντελοποίησης ροής επιφανειακών υδάτων. Παρέχει μια κατανοητή διεπαφή για εισαγωγή, επεξεργασία και παραμετροποίηση των δεδομένων εισόδου, ενώ παρέχει πολλαπλά εργαλεία μετέπειτα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων (post processing). Η άδεια χρήσης του λογισμικού παραχωρήθηκε στον συγγραφέα της παρούσας εργασίας δωρεάν από την DHI, δημιουργό και κάτοχο του προγράμματος, έπειτα από αίτηση προς αυτήν, και με την καθοδήγηση του κ. Ηλία Μουσσούλη, Προϊστάμενο της DHI για Ελλάδα και Κύπρο, τον οποίο κι ευχαριστώ πολύ για την βοήθεια και καθοδήγησή του.

Ως εκ τούτου, για την άντληση δεδομένων από την περιοχή μελέτης εγκρίθηκε η αγορά ενός σταθμού καταγραφής και μέτρησης στάθμης, καθώς κι ενός μετεωρολογικού σταθμού. Οι δύο σταθμοί έχουν τοποθετηθεί στα άκρα του υπό μελέτη ρέματος. Συγκεκριμένα ο Μετεωρολογικός σταθμός έχει τοποθετηθεί στα ανάντη της υπολεκάνης, στη δημοτική Βιβλιοθήκη του Άνω Σταλού, όπου καταγράφεται μεταξύ άλλων και η βροχόπτωση με λεπτομέρεια στο ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής. Ο σταθμός μέτρησης στάθμης έχει τοποθετηθεί στην εκβολή του ρέματος, στα κατόντη της υπολεκάνης, όπου καταλήγει ο υδάτινος όγκος του υπό μελέτη ρέματος κι εκβάλλει στη θάλασσα.



Εικόνα 19: Η τοποθεσία των δύο σταθμών μέτρησης στο ρέμα του Σταλού.





Εικόνα 20: Ο σταθμός μέτρησης στάθμης με Radar, στον Κάτω Σταλό

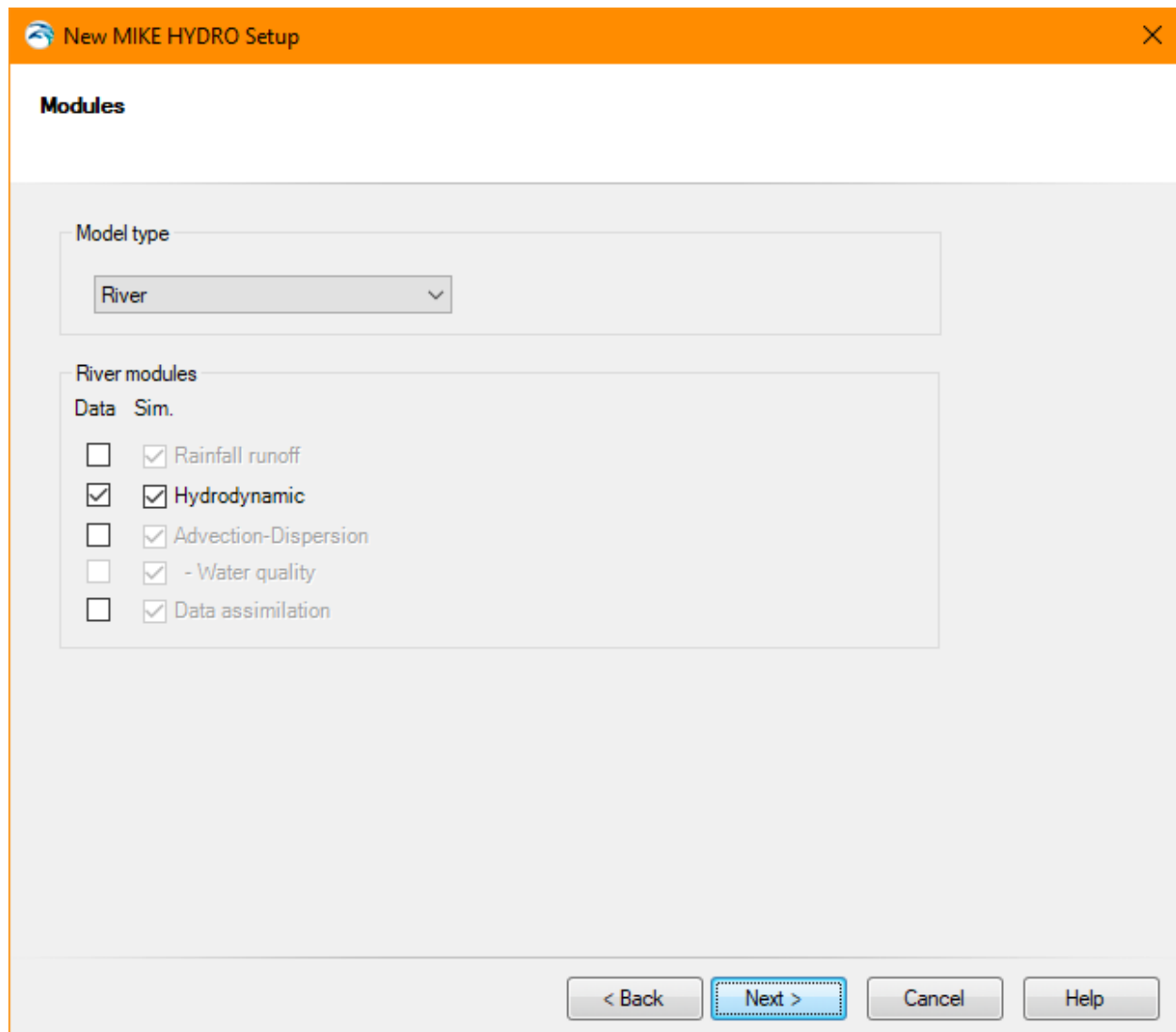


Εικόνα 21: Ο μετεωρολογικός σταθμός, εγκατεστημένος στη Δημοτική Βιβλιοθήκη του Άνω Σταλού

### 6.2.2: Κατασκευή Μοντέλου με το MIKE HYDRO River

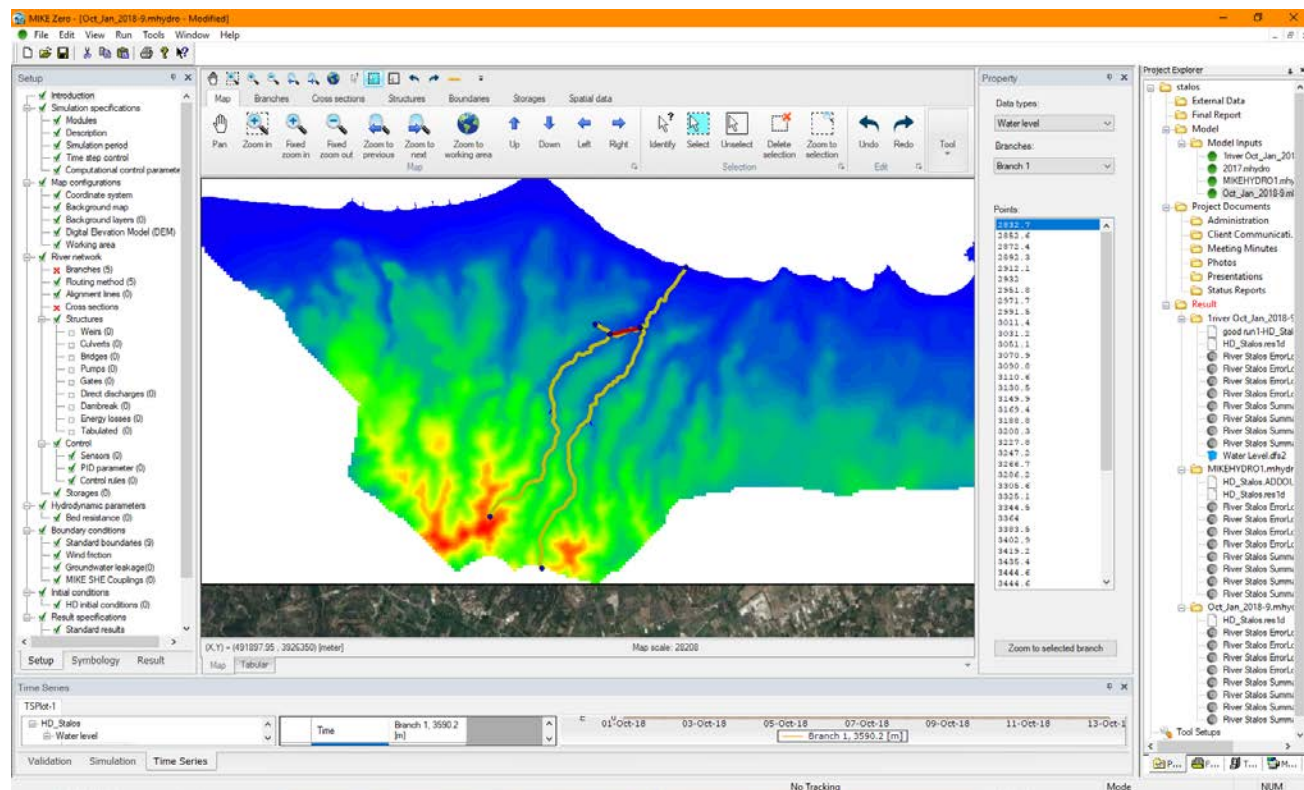
Προχωρώντας στην κατασκευή του μοντέλου, έγινε χρήση του frontend MIKE Zero, το οποίο είναι το πρόγραμμα που προετοιμάζει τα δεδομένα για τα επιμέρους modules του MIKE HYDRO, αλλά και για όλα τα πακέτα λογισμικού MIKE.

Ξεκινώντας το πρόγραμμα, επιλέγουμε File → New → New MIKE HYDRO model, για τη δημιουργία αρχείου setup του κατάλληλου μοντέλου. Με την επιλογή αυτή εκκινείται το παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή και παραμετροποίηση του μοντέλου Hydro.



Εικόνα 22: Δημιουργία νέου μοντέλου MIKE HYDRO River.

Φροντίζουμε να επιλεγθεί το River Module, και στη συνέχεια να είναι επιλεγμένο το Hydrodynamic. Έπειτα από την εισαγωγή των υπόλοιπων παραμέτρων, όπως το όνομα του αρχείου, εμφανίζεται το κυρίως παράθυρο του μοντέλου.



Εικόνα 23: Το κύριο παράθυρο εργασίας του MIKE HYDRO River.

Στο σημείο αυτό εμφανίζεται στα αριστερά το μενού για την εισαγωγή των παραμέτρων στο μοντέλο. Ξεκινώντας την παραμετροποίηση, εισάγεται η χρονική περίοδος της μοντελοποίησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του γεγονότος ότι ο σταθμός ήταν καινούριος και δεν υπήρχαν ακόμα δεδομένα, η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2018 έως 7 Ιανουαρίου 2019. Στην ημερομηνία που σταματάει η μοντελοποίηση υπήρξε κενό στις μετρήσεις, καθώς υπήρχαν προβλήματα με τον σταθμό μέτρησης στάθμης την συγκεκριμένη χρονική περίοδο και δεν αποθηκεύτηκαν δεδομένα.

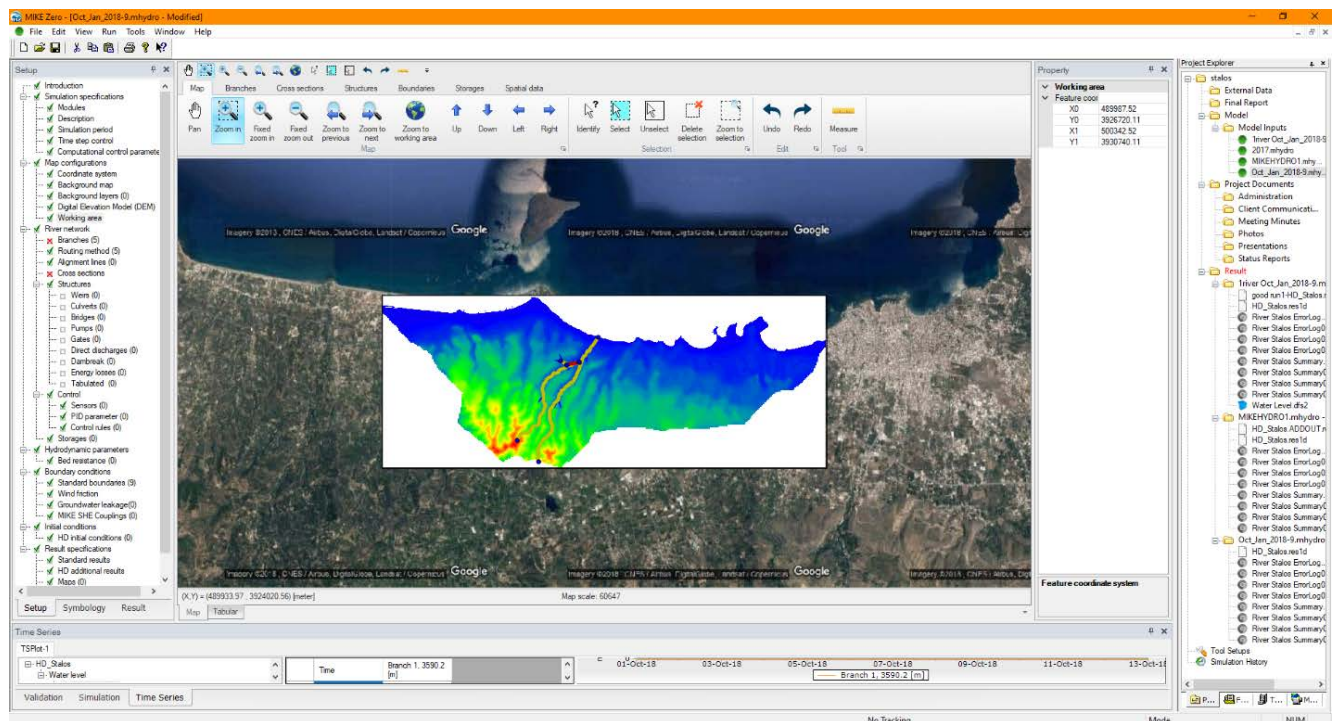
Στη συνέχεια επιλέγεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (Time Step Control). Το χρονικό βήμα επηρεάζει την ακρίβεια της προσομοίωσης, με μικρότερα χρονικά βήματα να οδηγούν σε μεγαλύτερη ανάλυση άρα και μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση. Ωστόσο, η επιλογή

μικρότερου χρονικού βήματος οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις για επεξεργαστική ισχύ, καθώς σε κάθε χρονικό βήμα πρέπει να υπολογίζονται οι εξισώσεις ροής σε όλα τα σημεία του κανάβου. Όμως, για την παρούσα μοντελοποίηση επιλέχθηκε μικρό χρονικό βήμα **30 δευτερολέπτων**, παρά την μεγάλη απαίτηση σε επεξεργαστική ισχύ, άρα και σε χρόνο για μοντελοποίηση. Ο λόγος για την επιλογή του μικρού χρονικού βήματος είναι ότι με μεγαλύτερα χρονικά βήματα το μοντέλο αποτύγχανε να εκτελεστεί, καθώς η χρονική υστέρηση μεταξύ των χρονικών σημείων οδηγούσε σε υπερχείλιση του ρέματος.

Προχωρώντας στην επόμενη ομάδα παραμέτρων, πραγματοποιούνται οι ρυθμίσεις για τον χάρτη του μοντέλου, στο group “Map Configurations”. Το πρώτο που πρέπει να εισαχθεί είναι το σύστημα συντεταγμένων, στην παρούσα περίπτωση εισάχθηκε το Greek Grid, καθώς τα αρχεία shapfile που χρησιμοποιήθηκαν και κατασκευάστηκαν στο ArcGIS βασίστηκαν σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων. Επιπλέον εισάχθηκε χάρτης παρασκηνίου μέσω του Google Maps, στην καρτέλα background map. Το σημαντικότερο δεδομένο είναι η εισαγωγή Ψηφιοποιημένου Μοντέλου Επιφανείας. Για το λογισμικό Mike HYDRO, απαιτείται η μετατροπή του ψηφιδωτού αρχείου Raster που δημιουργήθηκε στο ArcGIS σε μορφή συμβατή με το Mike HYDRO. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το Spatial Analyst Toolbox, έτσι ώστε τα σημεία του ψηφιδωτού αρχείου να μετατραπούν σε αρχείο .txt, που θα περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των σημείων σε x, y και z μορφή, χωρισμένα σε στήλες.

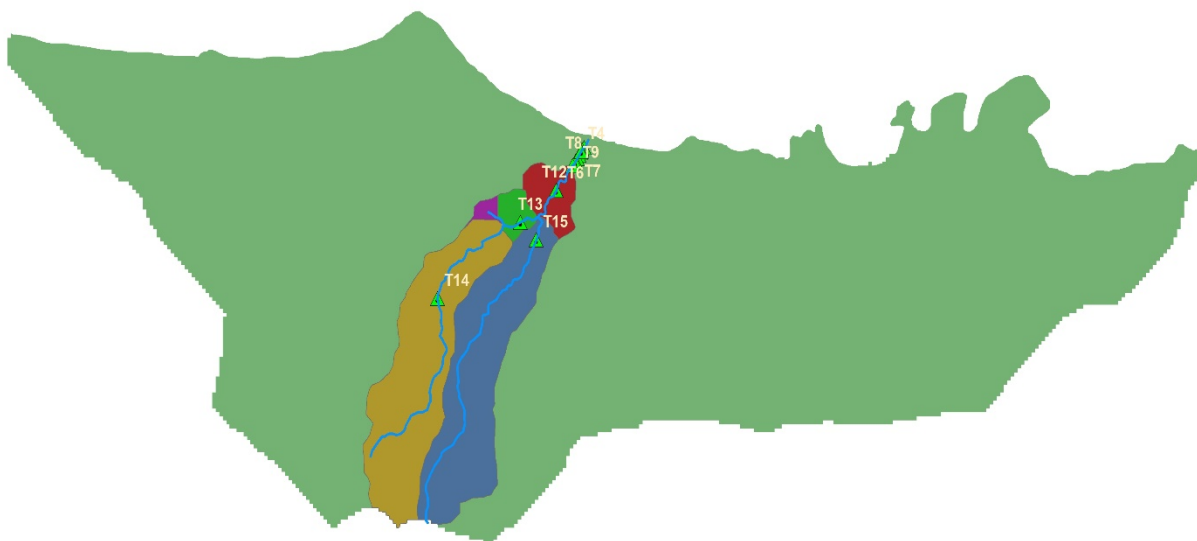






Εικόνα 25: Η περιοχή μελέτης, απεικονίζοντας το DEM της περιοχής, με χρωματική λεζάντα για το υψόμετρο.

Η επόμενη ενότητα είναι ο ορισμός του ποταμού υπό μελέτη, και των branches που το απαρτίζουν. Για τον ορισμό των branches, έπρεπε να βρεθεί ο αριθμός των υπολεκανών στην περιοχή μελέτης. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS και το εργαλείο Watershed του Spatial Analyst Toolbox, στην κατηγορία Hydrology.



Εικόνα 26: Υπολεκάνες απορροής για κάθε ένα παρακλάδι (branch) του υπό μελέτη ρέματος.

Τα παρακλάδια του ρέματος ορίστηκαν ως 5, ξεκινώντας την αρίθμηση από τα κατάντη του ρέματος. Κάθε παρακλάδι είχε την δική του λεκάνη απορροής. Για το Mike HYDRO αυτό σημαίνει ότι η βροχόπτωση που πέφτει στην κάθε υπολεκάνη καταλήγει σε ένα ποσοστό στο αντίστοιχο παρακλάδι του ρέματος.

		Name	Topo ID	Start Chainage	End Chainage	Flow Direction	Branch Type	Upstr. connect. type
► 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Branch 1	2018	2832.75	3647.16	Positive	Regular	Branch
2	<input type="checkbox"/>	Branch 2	2018	15.59	2502.13	Positive	Regular	Branch
3	<input type="checkbox"/>	Branch 3	2018	0	2832.75	Positive	Regular	Branch
4	<input type="checkbox"/>	Branch 4	2018	2321.74	2502.13	Positive	Regular	Branch
5	<input type="checkbox"/>	Branch 5	2018	2502.13	2832.75	Positive	Regular	Branch

Εικόνα 27: Τα 5 παρακλάδια του ρέματος, με τις αρχικές και τελικές συντεταγμένες μήκους (chainage).



Επόμενη παράμετρος είναι ο ορισμός της μεθόδου διαδρομής που θα χρησιμοποιηθεί στα επιμέρους παρακλάδια. Το λογισμικό Mike HYDRO River δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ μεθόδων Muskingum και Muskingum-Cunge, με την πρώτη μέθοδο να είναι η τελική επιλογή για την παρούσα μελέτη, καθώς η δεύτερη μέθοδος δεν επέτρεπε την εισαγωγή παράγοντα υστέρησης της ροής (Delay), κάτι που ήταν απαραίτητο, διότι η ροή στο ρέμα υπό μελέτη είναι σχεδόν αποκλειστικά λόγω βροχοπτώσης, άρα η υστέρηση είναι δεδομένη. Ο παράγοντας υστέρησης επιλέχθηκε να είναι 10, που βρέθηκε ύστερα από βαθμονόμηση και δοκιμές. Επιπλέον, για τον υπολογισμό της στάθμης (Water Level Method) επιλέχθηκε η μέθοδος Manning, καθώς ήταν και η προεπιλεγμένη μέθοδος, αλλά κι επίσης η εναλλακτική μέθοδος Rating Curve απαιτεί περαιτέρω μετρήσεις που δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Routing method (5)

Location

Branch name:

Branch 1

Chainage:

2832.75

ID:

Method 1

Flow routing method

Method:

Muskingum

Delay parameter:

10

Shape parameter:

0.2

Water level method

Method:

Manning

+

-

✕

		Branch	Chainage	ID	Flow routing method	Delay	Shape	Water level method
▶ 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Branch 1	2832.75	Method 1	Muskingum	10	0.2	Manning
2	<input type="checkbox"/>	Branch 2	15.59	Method 2	Muskingum	10	0.2	Manning
3	<input type="checkbox"/>	Branch 3	0	Method 3	Muskingum	10	0.2	Manning
4	<input type="checkbox"/>	Branch 4	2321.74	Method 4	Muskingum	10	0.2	Manning
5	<input type="checkbox"/>	Branch 5	2502.13	Method 5	Muskingum	10	0.2	Manning

Εικόνα 28: Εισαγωγή Routing Method για τα παρακλάδια του ρέματος.

Στη συνέχεια για τον χαρακτηρισμό του ποταμού, εισάγονται τομές του ρέματος. Στην παρούσα εργασία χρειάστηκε να παρθούν μετρήσεις τομών του ρέματος, καθώς πρόκειται για σχετικά μικρή κοίτη που δεν μπορεί να προσδιοριστεί με το DEM, άρα οι τομές λειτουργούν επιπρόσθετα για μεγαλύτερη ανάλυση του πεδίου.

Για τη λήξη των τομών, πραγματοποιήθηκε επιτόπια αυτοψία του ρέματος. Συνολικά λήφθηκαν 15 τομές του ρέματος σε όλα τα παρακλάδια του, καθώς η πρόσβαση στα ανάντη του ήταν αρκετά δύσκολη. Παρ' όλα αυτά, η μορφολογία στα ανάντη του ρέματος δεν διαφοροποιούνταν αρκετά ώστε να είναι απαραίτητη η λήψη περαιτέρω τομών. Οι τομές πάρθηκαν χρησιμοποιώντας GPS για τα σημεία εκκίνησης των τομών, και μετροταινία για καταγραφή των αποστάσεων τόσο μεταξύ των σημείων της εκάστοτε τομής, όσο και μεταξύ των διαφορετικών τομών.



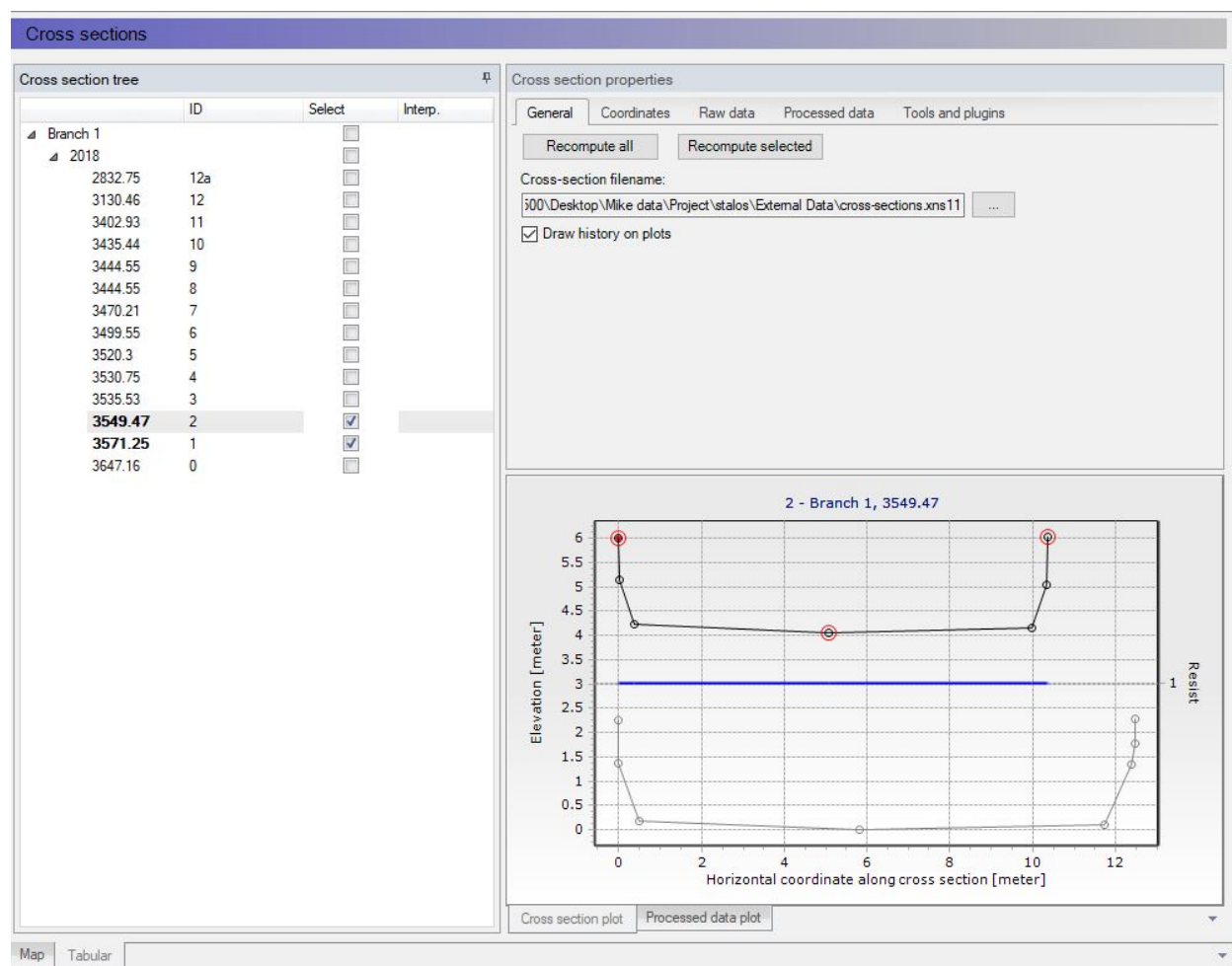
*Εικόνα 29: Το υπό μελέτη ρέμα με τις μετρηθείσες τομές*

Επόμενο σημαντικό βήμα είναι η εισαγωγή ψηφιοποιημένων τομών του ρέματος, που διαμορφώνουν το αποτύπωμά του. Πριν την εισαγωγή όμως, για την αποτύπωση των τομών

πραγματοποιήθηκε επιτόπου επίσκεψη στο πεδίο για καταγραφή των συντεταγμένων των αναγκαίων σημείων, ώστε να δημιουργηθούν οι απαραίτητες τομές.

Το ρέμα στο κατάντη τμήμα του είναι αρκετά προσβάσιμο, με μικρή κλίση πρανών και ομαλή κλίση πυθμένα, ενώ η μη-μόνιμη ροή επιτρέπει την διάβαση σε ημέρες που δεν ακολουθούν βροχοπτώση. Η καταγραφή των τομών πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο, πριν από την έναρξη της υγρής περιόδου του έτους. Για την καταγραφή χρησιμοποιήθηκε GPS, το οποίο έδινε τις ακριβείς συντεταγμένες του αρχικού σημείου της τομής. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι γωνίες και τα μήκη των πλευρών της τομής, και με γεωμετρία υπολογίζονταν τα επιμέρους σημεία που απαρτίζουν την κάθε τομή.

Συνολικά 15 τομές πάρθηκαν από το υπό μελέτη ρέμα, με τις περισσότερες να βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα του, καθώς είναι και το πιο στενό και επίφοβο για πλημμύρα κομμάτι. Επιπροσθέτως, το ρέμα είναι αρκετά δύσβατο προς τα ανάντη, με την πρόσβαση να είναι σχεδόν αδύνατη μετά το τελικό παρακλάδι, εκτός από ελάχιστα σημεία.



Εικόνα 30: Εισαγωγή των τομών στο MIKE HYDRO River

Επιπλέον στο Mike Hydro είναι αναγκαίο να εισαχθούν επιπλέον στοιχεία των τομών. Πρώτα προσδιορίζονται τα σημεία Markers, δηλαδή τα άκρα του ρέματος καθώς και το κεντρικό σημείο ροής (Markers 1,3 και 2 αντίστοιχα). Επίσης εισάγεται το υψόμετρο του κεντρικού σημείου ροής (datum) από την επιφάνεια της θάλασσας. Για λόγους συνάφειας με τα υπόλοιπα δεδομένα, το υψόμετρο πάρθηκε από το υψόμετρο των κεντρικών σημείων σύμφωνα με τα δεδομένα από το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM – Digital Elevation Model), μέσω του ArcGIS.

	Marker	S	Z	Resistance
▶ 1	1	0	1.932	1
2		0.015	1.082	1
3		0.386	0.164	1
4	2	5.083	0	1
5		9.982	0.086	1
6		10.342	0.976	1
7	3	10.35	1.976	1

Section type: Open

Datum: 4.063

Resistance Type: Relative resistance

Distribution: Uniform

Uniform: 1

Εικόνα 31: Εισαγωγή Markers στις τομές

Τα σημεία των τομών εκτός από το MIKE, εισάχθηκαν και στο ArcGIS για τον προσδιορισμό του datum από το DEM που δημιουργήθηκε στο λογισμικό. Εισάγοντας τις x και y συντεταγμένες των σημείων της τομής στο λογισμικό, τα σημεία αυτά εμφανίζονται στην κάθε τομή. Στο πεδίο S εμφανίζεται η οριζόντια απόσταση του κάθε σημείου από το πρώτο σημείο (Σημεία A), ενώ στο πεδίο Z εμφανίζεται η κάθετη απόσταση του κάθε σημείου από το χαμηλότερο σημείο της τομής (Marker 2). Επιπλέον, εισάγεται και η αντίσταση του ρέματος στην τομή. Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει διαφορετικές τιμές αντίστασης στον εκάστοτε ανοιχτό αγωγό νερού, καθώς και την κατανομή της αντίστασης αυτής. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η σχετική αντίσταση (Relative Resistance), με ομοιόμορφη κατανομή της σε όλο το πλάτος ροής στις τομές, καθώς η κοίτη είναι ομοιόμορφη, χωρίς σημαντική διαφοροποίηση κατά πλάτος.

Το τελευταίο τμήμα είναι η εισαγωγή οριακών συνθηκών (Boundary Conditions). Το λογισμικό MIKE HYDRO River επιτρέπει την εισαγωγή επιμέρους οριακών συνθηκών σε κάθε παρακλάδι του υπό μελέτη ρέματος, με διαφορετικές ιδιότητες στο καθένα. Η κάθε οριακή συνθήκη μπορεί να είναι είτε σταθερή ροή (τύπου 2), είτε σταθερή στάθμη (τύπου 1), ή και χρονικά μεταβαλλόμενη. Στην παρούσα μελέτη, καθώς δεν υπάρχει μόνιμη ροή, οι οριακές συνθήκες



που εισάχθηκαν ήταν χρονικά μεταβαλλόμενες, και προέκυψαν από την μετρούμενη βροχόπτωση, που εξάχθηκε από τον μετεωρολογικό σταθμό στα ανάντη του ρέματος.

Standard boundaries (5)

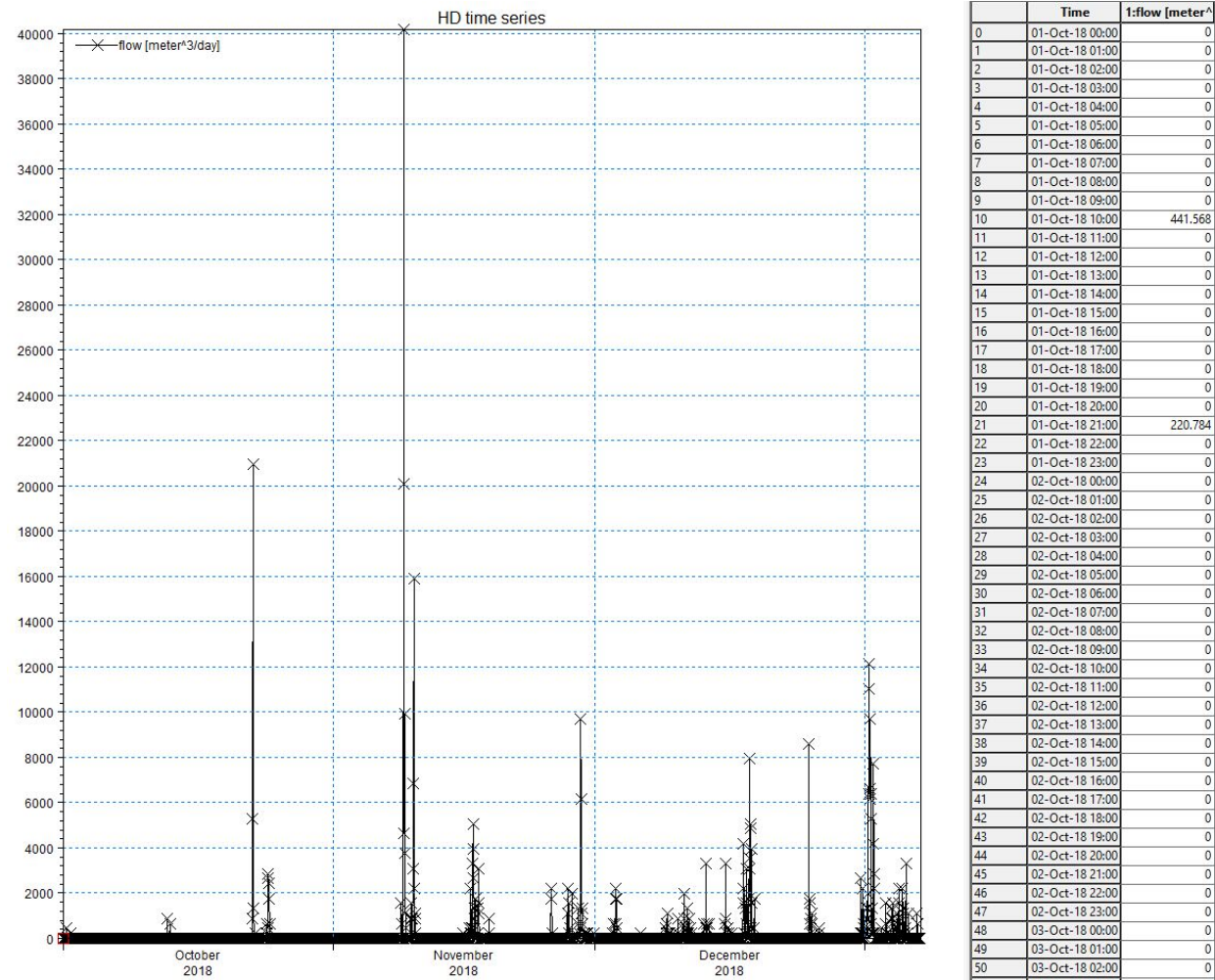
Boundary ID: Boundary 1 Type: Rainfall Location type: Distributed source Location Branch name: Branch 1 Upstr. chainage: 2832.75 Dwstr. chainage: 3647.16 Create open end boundaries

HD boundary Include boundary Input type: Time varying Scale: 0.5 File: C:\Users\GEL T1500\Desktop\Mike data\Project\stalos\Model\Modi Item: rain

	ID	Type	Location type	Branch name	Upstream chainage	Downstream chainage	Catchment name	Runoff flow type	Include HD	HD input type	HD scale
1	Boundary 1	Rainfall	Distributed so...	Branch 1	2832.75	3647.16		Total runoff	<input type="checkbox"/>	Time varying	0.5
2	Boundary 1out	Water level	Open	Branch 1	3647.16	3647.16		Total runoff	<input checked="" type="checkbox"/>	Constant	1
3	Boundary 2	Discharge	Point source	Branch 1	2832.8	2832.8		Total runoff	<input checked="" type="checkbox"/>	Time varying	0.2
4	Boundary 3	Discharge	Point source	Branch 1	2832.75	2832.75		Total runoff	<input checked="" type="checkbox"/>	Time varying	0.2
5	Boundary upstream	Discharge	Open	Branch 1	2832.75	2832.75		Total runoff	<input checked="" type="checkbox"/>	Constant	1

Εικόνα 32: Εισαγωγή οριακών συνθηκών (boundary conditions).

Οι οριακές συνθήκες στην παρούσα μελέτη αναπαριστούσαν την εισροή νερού στο ρέμα, η οποία μεταβαλλόταν χρονικά, και συγκεκριμένα ήταν οι οριακές συνθήκες 1, 3 και 4 στην εικόνα. Για τις αριθμητικές τιμές εισάχθηκε χρονοσειρά απορροής, που προήλθε από την επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων. Για aggregation και αναγωγή των χρονοσειρών στο κατάλληλο χρονικό βήμα χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν λογισμικό επεξεργασίας χρονοσειρών Hydrognomon (Υδρογνώμων), και μετά εισάχθηκε στο MIKE HYDRO River. Η τελική ροή που εισάχθηκε ήταν ποσοστό της βροχόπτωσης, καθώς ένα μέρος μόνο της βροχής καταλήγει ως επιφανειακή απορροή, και από αυτήν ένα μέρος τελικά καταλήγει στο ρέμα. Το ποσοστό αυτό ήταν και ο παράγοντας που βαθμονομήθηκε. Το MIKE HYDRO River επιτρέπει την εισαγωγή ροής ως χρονικά μεταβαλλόμενη οριακή συνθήκη, ξεχωριστά για κάθε παρακλάδι του ποταμού υπό μελέτη.



Εικόνα 33: Εισαγωγή χρονοσειράς ροής για το υπό μελέτη ρέμα στο MIKE HYDRO River, με χρονικά μεταβαλλόμενη ποσότητα βασισμένη στην βροχή.

Έχοντας εισάγει την ροή για κάθε παρακλάδι, τα δεδομένα δεν επεξεργάστηκαν. Όμως η κάθε οριακή συνθήκη μπορεί να ρυθμιστεί ως ποσοστό της αρχικά εισαγμένης τιμής, στον πίνακα οριακών συνθηκών, στο πεδίο HD Scale:

	Location type	Branch name	Upstream chainage	Downstream chainage	Catchment name	Runoff flow type	Include HD	HD input type	HD scale	HD value
	▼ Distributed so...	▼ Branch 1	▼ 2832.75	3647.16		▼ Total runoff	▼ <input type="checkbox"/>	Time varying	▼ 0.5	0
el	▼ Open	▼ Branch 1	▼ 3647.16	3647.16		▼ Total runoff	▼ <input checked="" type="checkbox"/>	Constant	▼ 1	0.1
3	▼ Point source	▼ Branch 1	▼ 2832.8	2832.8		▼ Total runoff	▼ <input checked="" type="checkbox"/>	Time varying	▼ 0.2	0
5	▼ Point source	▼ Branch 1	▼ 2832.75	2832.75		▼ Total runoff	▼ <input checked="" type="checkbox"/>	Time varying	▼ 0.2	0
3	▼ Open	▼ Branch 1	▼ 2832.75	2832.75		▼ Total runoff	▼ <input checked="" type="checkbox"/>	Constant	▼ 1	0.001

Εικόνα 34: Παραμετροποίηση ποσοστού τελικής τιμής οριακής συνθήκης στο MIKE HYDRO River.

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα μοντελοποίησης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας με χρήση ΓΣΠ και σταθμισμένης κάλυψης, καθώς και της μοντελοποίησης με το λογισμικό MIKE HYDRO River του ρέματος στον Σταλό Νέας Κυδωνίας Χανίων. Οι δύο μέθοδοι λειτουργούν συμπληρωματικά, με την μέθοδο ΓΣΠ να εκτιμά πλημμυρική επικινδυνότητα χωρικά και σε μεγάλη έκταση, ενώ η μοντελοποίηση του ρέματος έρχεται να συμπληρώσει και να επιβεβαιώσει την άνοδο της στάθμης των ρεμάτων σε συγκεκριμένα υπό εξέταση σημεία της περιοχής μελέτης.

### 7.1: Αποτελέσματα Χωρικής Εκτίμησης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας με χρήση ΓΣΠ (GIS).

Στη χωρική εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου έγινε χρήση του ArcGIS 10.5, για την επεξεργασία και τον συνδυασμό χαρτών επιμέρους παραγόντων της περιοχής μελέτης, κι εξαγωγή χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας ανά παράγοντα, αλλά και συνολικά.

#### 7.1.1: Πλημμυρική Επικινδυνότητα Επιμέρους παραγόντων

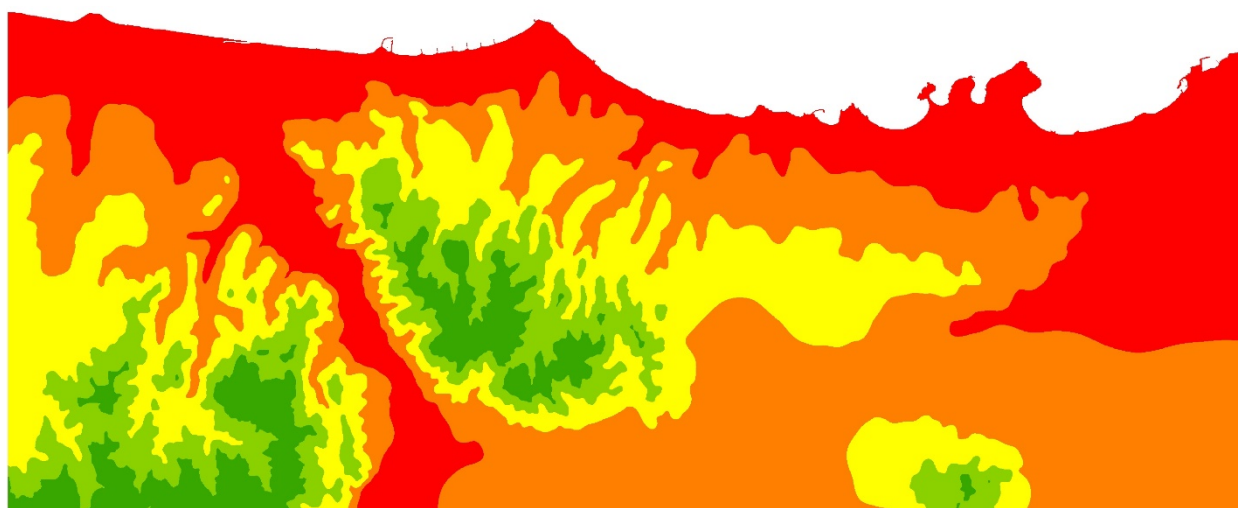
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες των 6 επιμέρους παραγόντων της χωρικής εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας. Η επικινδυνότητα κατηγοριοποιείται σε 5 κατηγορίες: Πολύ Χαμηλή, Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή και Πολύ Υψηλή.





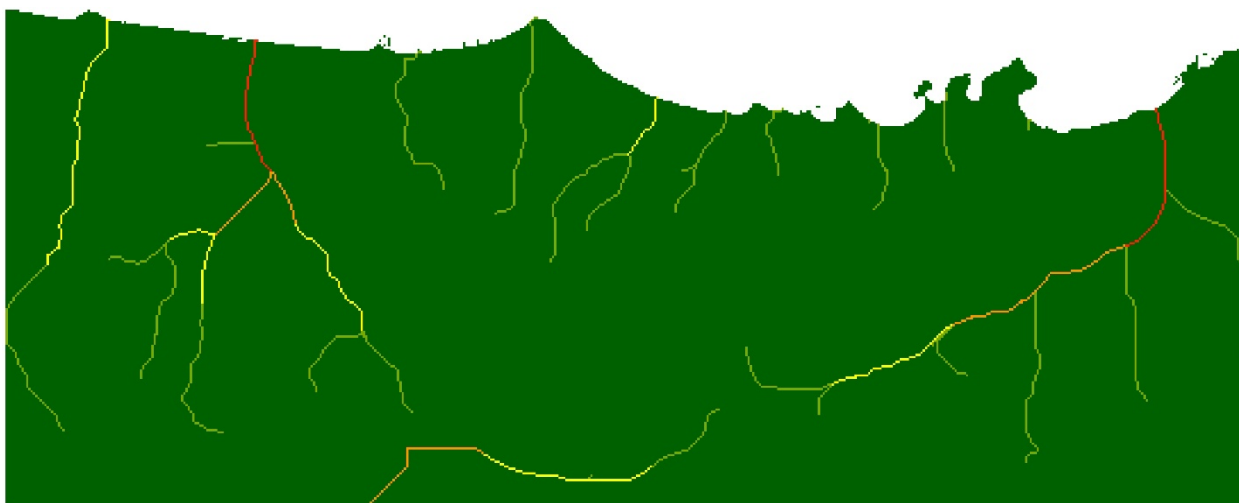
*Εικόνα 35: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Χρήσεων Γης*

Στον χάρτη χρήσεων γης η πλημμυρική επικινδυνότητα εμφανίζεται αυξημένη στην παράκτια περιοχή καθώς είναι περιοχή που έχει αρκετή αστικοποίηση και πυκνότητα κτισμάτων, αλλά και υδροβιοτόπων που είναι ήδη κορεσμένοι σε νερό.



*Εικόνα 36: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Υψομέτρου*

Ο χάρτης υψομέτρου καταδεικνύει τις παράκτιες περιοχές αλλά και τις κοιλάδες χαμηλού υψομέτρου ως περιοχές πολύ υψηλής πλημμυρικής επικινδυνότητας, με την επικινδυνότητα να μειώνεται όσο το υψόμετρο αυξάνεται, με τα ορεινά σημεία να παρουσιάζουν τη χαμηλότερη επικινδυνότητα.



*Εικόνα 37: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Συσσώρευσης Ροής*

Στον χάρτη συσσώρευσης ροής η πλημμυρική επικινδυνότητα είναι κατά κύριο λόγο χαμηλή, εκτός από τα σημεία που συσσωρεύεται η επιφανειακή απορροή λόγω της γεωμορφολογίας της περιοχής και έχουν δημιουργηθεί ποταμοί και ρέματα. Οι ποταμοί παρουσιάζουν την υψηλότερη πλημμυρική επικινδυνότητα, λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ροής που οδηγεί σε ροή νερού όλο το χρόνο, ενώ στα ρέματα εμφανίζεται μικρότερη -αλλά σχετικά υψηλή- επικινδυνότητα, καθώς η ροή είναι εποχική.



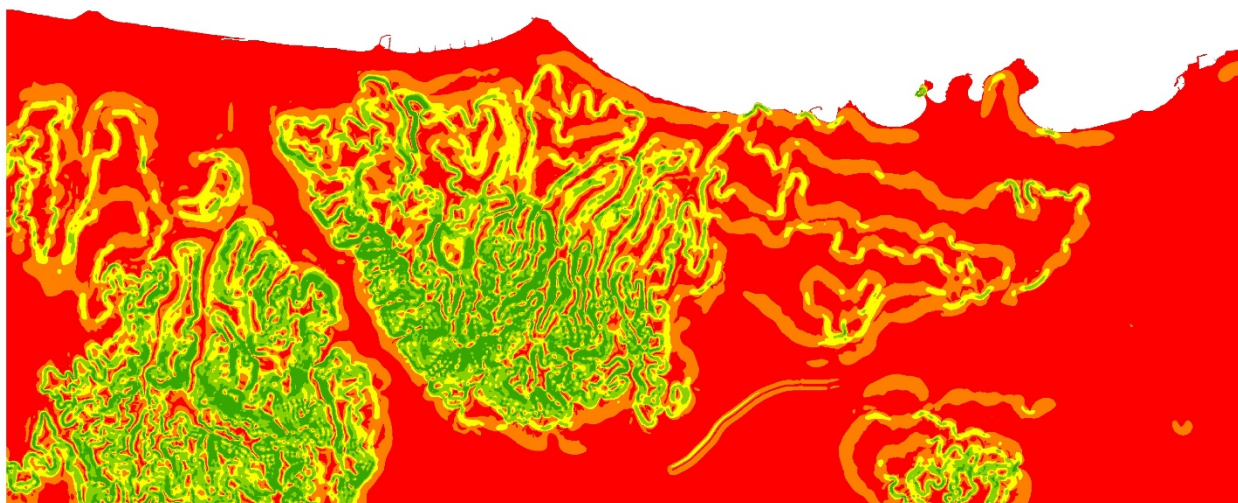
*Εικόνα 38: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Υδρογεωλογίας*

Η υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης οδηγεί σε πολύ αυξημένη επικινδυνότητα στις περιοχές με αδιαπέρατους σχηματισμούς, όπως στα ορεινά της περιοχής μελέτης, ενώ στα παράκτια τμήματα είναι αρκετά αυξημένη η επικινδυνότητα λόγω ύπαρξης πορωδών σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Αντιθέτως στις περιοχές με σχηματισμούς με υψηλότερη υδροπερατότητα η επικινδυνότητα είναι μειωμένη.



*Εικόνα 39: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Έντασης Βροχής*

Ο χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω έντασης βροχής δημιουργήθηκε με χρήση 3 σταθμών περιμετρικά της περιοχής μελέτης, και γι' αυτό παρατηρείται διαφοροποίηση της έντασης και κατά συνέπεια της πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω έντασης βροχής, με υψηλότερη στα νοτιοανατολικά όπου ο σταθμός του Αλικιανού είχε υψηλότερη καταγεγραμμένη βροχόπτωση, ενώ η χαμηλότερη επικινδυνότητα παρατηρείται στα βορειοδυτικά, με τον σταθμό του Πλατανιά να καταγράφει τη χαμηλότερη ένταση στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα.



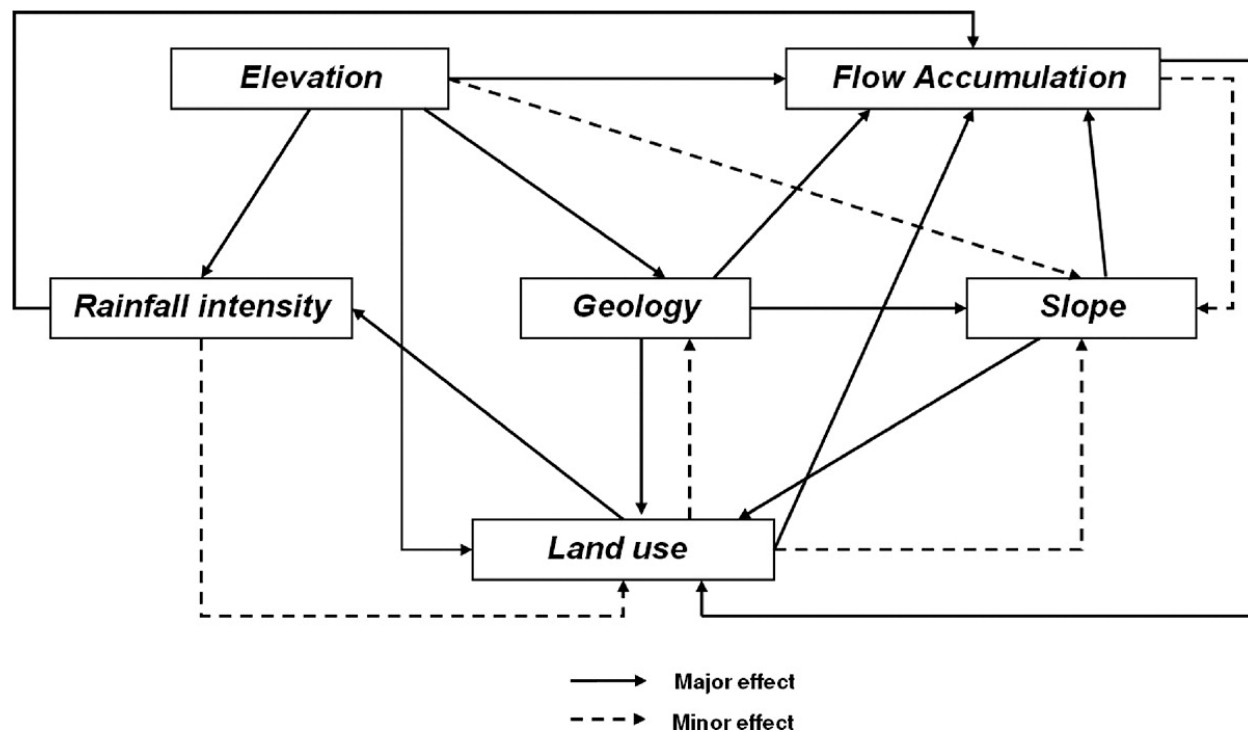
*Εικόνα 40: Πλημμυρική Επικινδυνότητα λόγω Κλίσης*

Όπως είναι αναμενόμενη, η πλημμυρική επικινδυνότητα λόγω κλίσης είναι αυξημένη στις περιοχές όπου η κλίση είναι χαμηλή (πεδινές περιοχές) ενώ μειώνεται στις ορεινές – απόκρημνες περιοχές.

Από τους παραπάνω χάρτες επιβεβαιώνεται ότι η πλημμυρική επικινδυνότητα είναι αυξημένη στις παραλιακές περιοχές χαμηλού υψομέτρου, στις περιοχές με μικρή έως καθόλου κλίσης και στις περιοχές όπου υπάρχει αστικοποίηση. Η αστικοποίηση συμβάλλει αρνητικά στην πλημμυρική επικινδυνότητα, καθώς οι εδαφικές εκτάσεις που είναι αστικοποιημένες εμποδίζουν την κατείσδυση του βρόχινου νερού στο υπέδαφος, αυξάνοντας κατά συνέπεια την επιφανειακή απορροή. Η μικρή κλίση στις πεδινές και παραθαλάσσιες περιοχές είναι επίσης αρνητικός παράγοντας για την πλημμυρική επικινδυνότητα, καθώς δεν διευκολύνει την ροή του νερού προκαλώντας συσσώρευση νερού στις περιοχές αυτές. Τέλος, υψηλότερη επικινδυνότητα εμφανίζεται στις περιοχές όπου το έδαφος είναι χαμηλότερης υδροπερατότητας, όπως πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς και κοκκώδεις μη προσχωματικούς σχηματισμούς χαμηλής έως μέτριας υδροπερατότητας, κυρίως στα ορεινά και κάποιες παραθαλάσσιες περιοχές.

### 7.1.2: Συνδυαστική χωρική πλημμυρική επικινδυνότητα

Από τους 6 επιμέρους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας συντέθηκε ο συνολικός χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας. Ο συνδυασμός πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της σταθμισμένης αλληλοεπικάλυψης των επιμέρους θεματικών χαρτών, για κάθε εικονοστοιχείο του καννάβου. Κάθε επιμέρους παράγοντας επηρεάζει άλλους παράγοντες, τόσο σε κύριο όσο και δευτερεύον επίπεδο, το οποίο σχηματικά απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 41: Σχηματική απεικόνιση αλληλεπίδρασης παραγόντων πλημμυρικής επικινδυνότητας.

Για κάθε παράγοντα μετρήθηκαν οι κύριες και οι δευτερεύουσες επιδράσεις του σε άλλους. Η κάθε κύρια επίδραση αξιολογήθηκε με 1 πόντο, και κάθε δευτερεύουσα με 0.5 πόντους. Το άθροισμα των πόντων κάθε παράγοντα δίνει το βάρος του παράγοντα επίδρασης, ως ποσοστό από το σύνολο των πόντων, και υπολογίστηκαν ως ακολούθως:

Πίνακας 3: Υπολογισμοί παραγόντων πλημμυρικής επικινδυνότητας

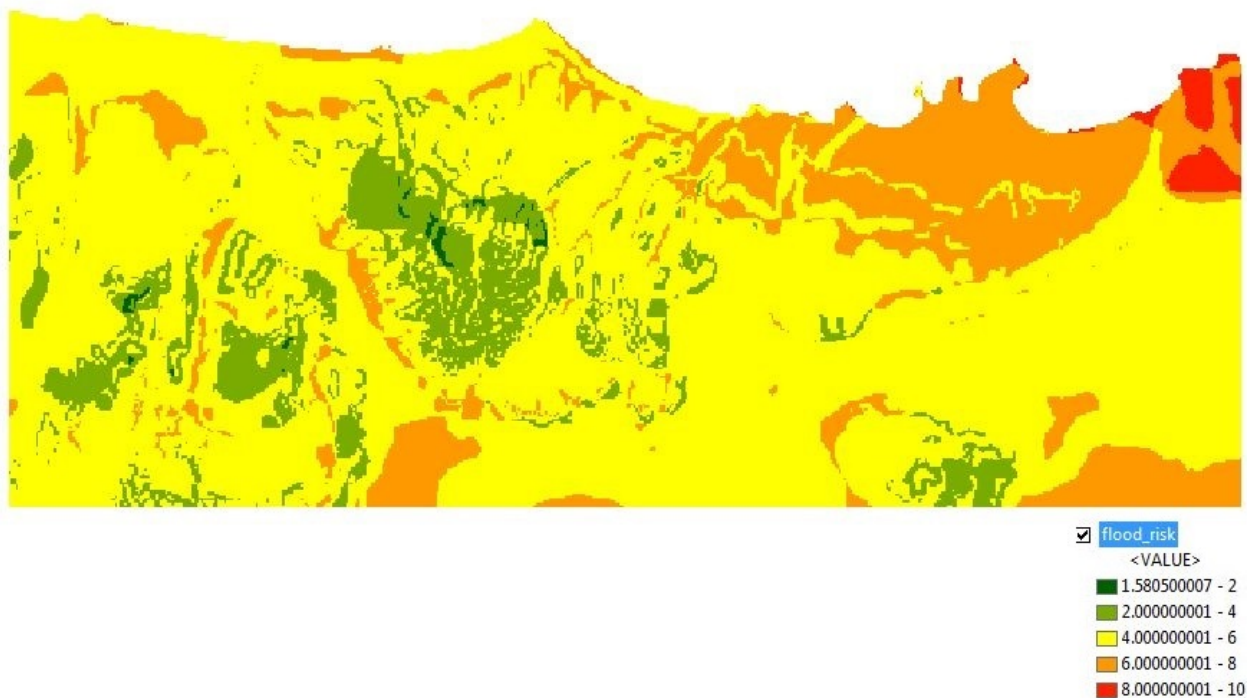
Factor	Domain of effect	Descriptive level (flood hazard)	Proposed weight of effect (a)	Rate (b)	Weighted rating (a × b)	Total weight	Percentage (%)
<b>Flow accumulation (pixels)</b>	459929.2 - 693976	Very high	10	1.5	15	39	9.68
	253097.1 - 459929.1	High	8		12		
	108858.9 - 253097.1	Moderate	5		7.5		
	24493 - 108858.9	Low	2		3		
	0 - 24493	Very low	1		1.5		
<b>Slope (degree)</b>	0 – 3.94	Very high	10	2	20	52	12.90
	3.94 - 10.16	High	8		16		
	10.16 - 17.8	Moderate	5		10		
	17.8 - 26.13	Low	2		4		
	26.13 - 52.9	Very low	1		2		
<b>Land use</b>	Zones seaward	Very high	10	3	30	78	19.35
	Shrub-brush-rangeland	High	8		24		
	Cropland and pasture	Moderate	5		15		
	Other agricultural land	Low	2		6		
	Mixed forest land	Very low	1		3		
<b>Rainfall intensity (Units MFI)</b>	99.8 - 103.3	Very high	10	1.5	15	39	9.68
	96.9 - 99.8	High	8		12		
	94.2 - 96.9	Moderate	5		7.5		
	91.1 - 94.2	Low	2		3		

	87.1 - 91.1	Very low	1		1.5		
<b>Geology</b>	A2	Very high	10	3	30	78	19.35
	P3	High	8		24		
	P2	Moderate	5		15		
	P1	Low	2		6		
	K1	Very low	1		3		
<b>Elevation (m)</b>	0–32.7	Very high	10	4.5	45	117	29.03
	32.7–67.1	High	8		36		
	67.1 - 108.8	Moderate	5		22.5		
	108.8 - 157.7	Low	2		9		
	158.7 - 265.1	Very low	1		4.5		
<b>SUM</b>						403	100

Ο παραπάνω πίνακας συγκεντρώνει τους 6 παράγοντες για την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας και ποσοτικοποιεί την επίδρασή τους στην συνολική πλημμυρική επικινδυνότητα. Η μεγαλύτερη επιρροή ασκείται από το υψόμετρο, με ποσοστό επίδρασης στην συνολική επικινδυνότητα 29.03%, ενώ αμέσως μικρότερη επιρροή ασκούν η γεωλογία και οι χρήσεις γης, με ποσοστό 19.35% και για τους 2 παράγοντες. Μικρότερη επιρροή ασκεί η κλίση του εδάφους με ποσοστό 12.9% ενώ η βροχόπτωση και η συγκέντρωση ροής έχουν το μικρότερο ποσοστό επίδρασης, με 9.68%.

Με τα παραπάνω δεδομένα, και την χρήση του raster calculator στο λογισμικό ArcMap έγινε υπολογισμός του χάρτη συνολικής πλημμυρικής επικινδυνότητας με την αλληλοεπικάλυψη των επιμέρους θεματικών χαρτών:





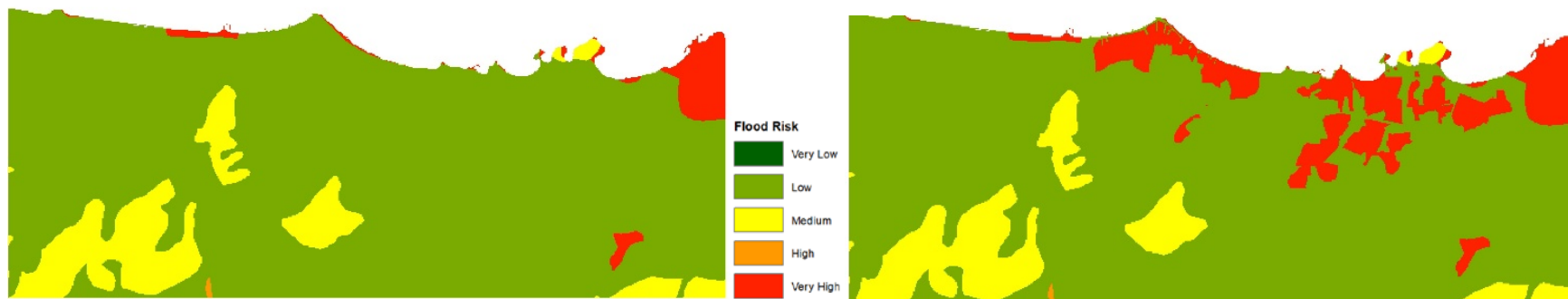
Εικόνα 42: Συνολική πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης.

Πράγματι από τον τελικό χάρτη επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη αυξημένη πλημμυρική επικινδυνότητα

#### 7.1.3: Εξέταση μελλοντικής πλημμυρικής επικινδυνότητας

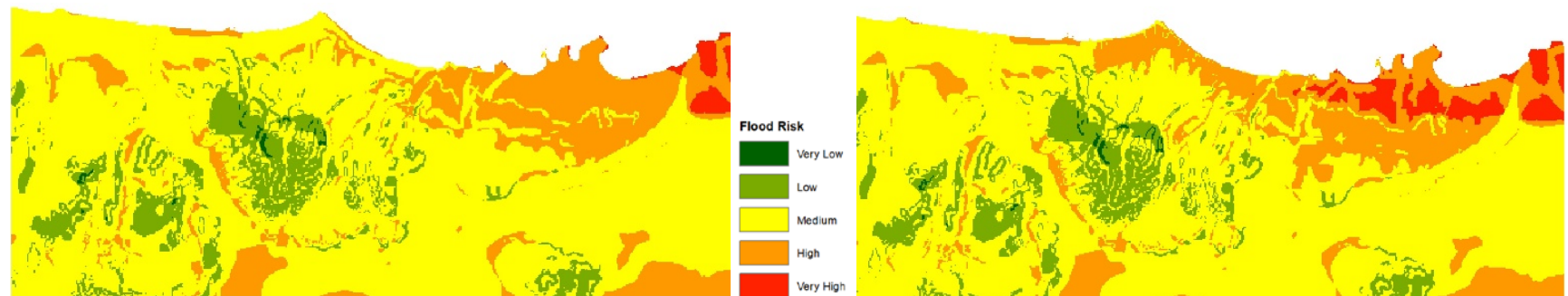
Επιπρόσθετα από την υπάρχουσα πλημμυρική επικινδυνότητα εξετάστηκε ο μελλοντικός πλημμυρικός κίνδυνος. Ο Δήμος Χανίων έχει ήδη υλοποιήσει και ψηφίσει τη Β' φάση του πολεοδομικού σχεδίου, το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα μελέτη καθώς γίνεται αλλαγή στις χρήσεις γης. Πιο συγκεκριμένα προστίθενται περιοχές αστικής κάλυψης, με συνέπεια την αύξηση των περιοχών χαμηλής υδροπερατότητας, άρα κατά συνέπεια την αύξηση της επιφανειακής απορροής. Με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε προηγουμένως χρησιμοποιώντας ΓΣΠ για την χωρική εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας έγινε εξαγωγή νέου θεματικού χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω χρήσεων γης, καθώς και συνολικού χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας:





Εικόνα 43: Σύγκριση πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω χρήσεων γης: Τρέχουσα (Αριστερά) και μελλοντική (Δεξιά).

Παρατηρείται αυξημένη πλημμυρική επικινδυνότητα λόγω χρήσεων γης στα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης, στην παράκτια περιοχή κυρίως, όπου αναμένεται να ενταχθούν οι περιοχές στο πολεοδομικό σχέδιο, δημιουργώντας αστικοποιημένες περιοχές που εμποδίζουν την κατείσδυση του νερού στον υπόγειο υδροφόρο.



Εικόνα 44: Σύγκριση συνολικής πλημμυρικής επικινδυνότητας: Τρέχουσα (Αριστερά) και μελλοντική (Δεξιά).

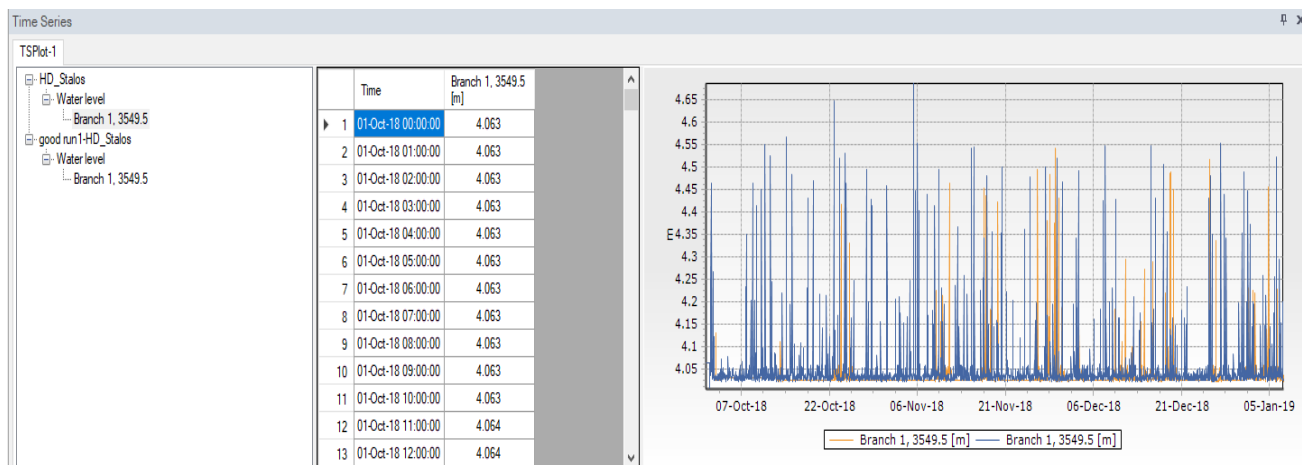
Πράγματι παρά την μερική επιρροή των χρήσεων γης στην συνολική επικινδυνότητα, η αλλαγή στο πολεοδομικό σχέδιο της περιοχής με την εισαγωγή περαιτέρω αστικοποιημένων περιοχών οδηγεί στην αύξηση της έκτασης των περιοχών που εντάσσονται στην κατηγορία της «Πολύ Υψηλής» πλημμυρικής επικινδυνότητας, ενώ οι περιοχές «Υψηλής» επικινδυνότητας αυξάνονται δραματικά, εκτεινόμενες περαιτέρω δυτικά όπως φαίνεται στον χάρτη δεξιά. Ενώ προηγουμένως μόνο η περιοχή του Κλαδισού εμφάνιζε πολύ υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα, με το νέο πολεοδομικό σχέδιο να προκαλεί «Πολύ Υψηλή» πλημμυρική επικινδυνότητα και στην περιοχή των Αγίων Αποστόλων.

Είναι ξεκάθαρο ότι η επέκταση του πολεοδομικού σχεδίου θα προκαλέσει αύξηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης, ειδικότερα στο παραλιακό τμήμα της περιοχής μελέτης. Χωρίς την πρόβλεψη για επαρκή αντιπλημμυρικά έργα είναι δεδομένη η αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων στην περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως μόνο η εδαφοκάλυψη έχει ληφθεί υπόψη, και όχι τα όποια προτεινόμενα αντιπλημμυρικά έργα.

## 7.2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με το λογισμικό MIKE HYDRO River

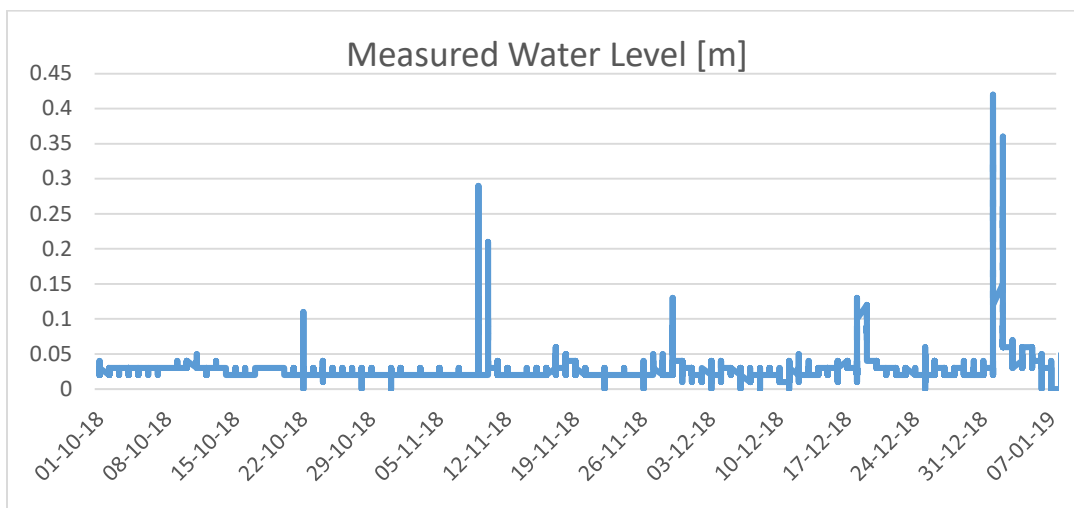
Για την μοντελοποίηση ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκε η βροχόπτωση από τον εγκατεστημένο μετεωρολογικό σταθμό στον Άνω Σταλό, με δεδομένα βροχόπτωσης ανά 10 λεπτά, για την περίοδο Οκτωβρίου 2018 έως 7 Ιανουαρίου 2019. Η βροχόπτωση μετατράπηκε σε επιφανειακή απορροή, ως ποσοστό της συνολικής ποσότητας νερού που έπεσε στην επιφάνεια των υπολεκανών, με την τελική ποσότητα να προσδιορίζεται έπειτα από βαθμονομήσεις. Ο έλεγχος της εγκυρότητας του μοντέλου, και άρα το σημείο ελέγχου, πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας την στάθμη του ρέματος στην εκροή με τα εξαγόμενα δεδομένα για το σημείο αυτό από το μοντέλο.

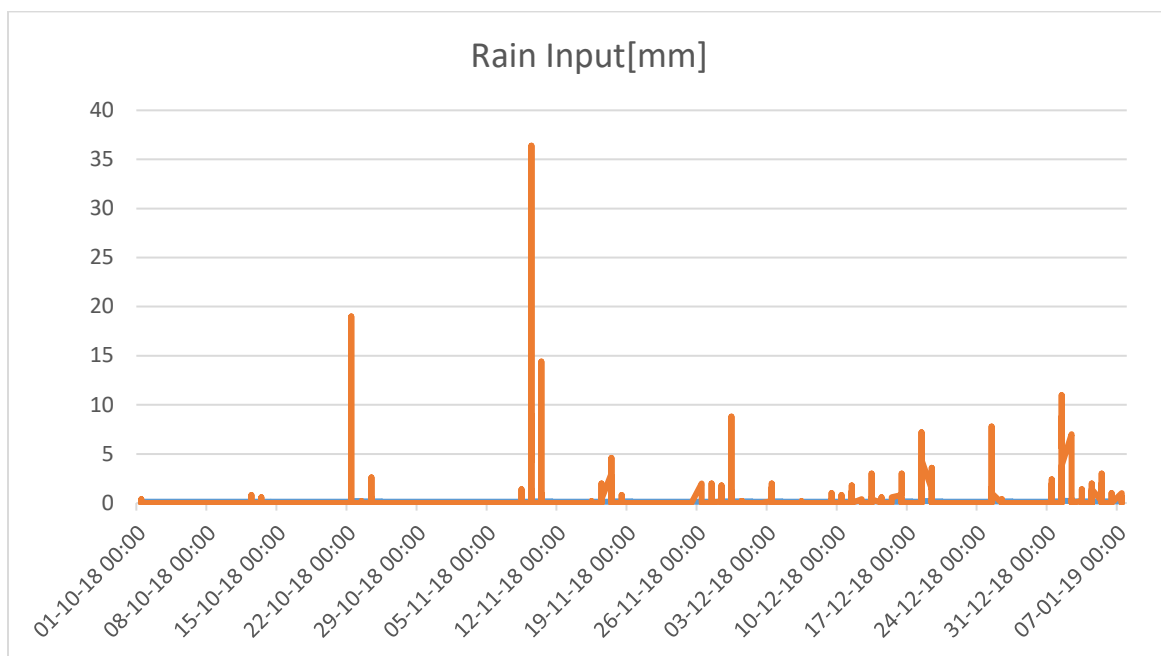
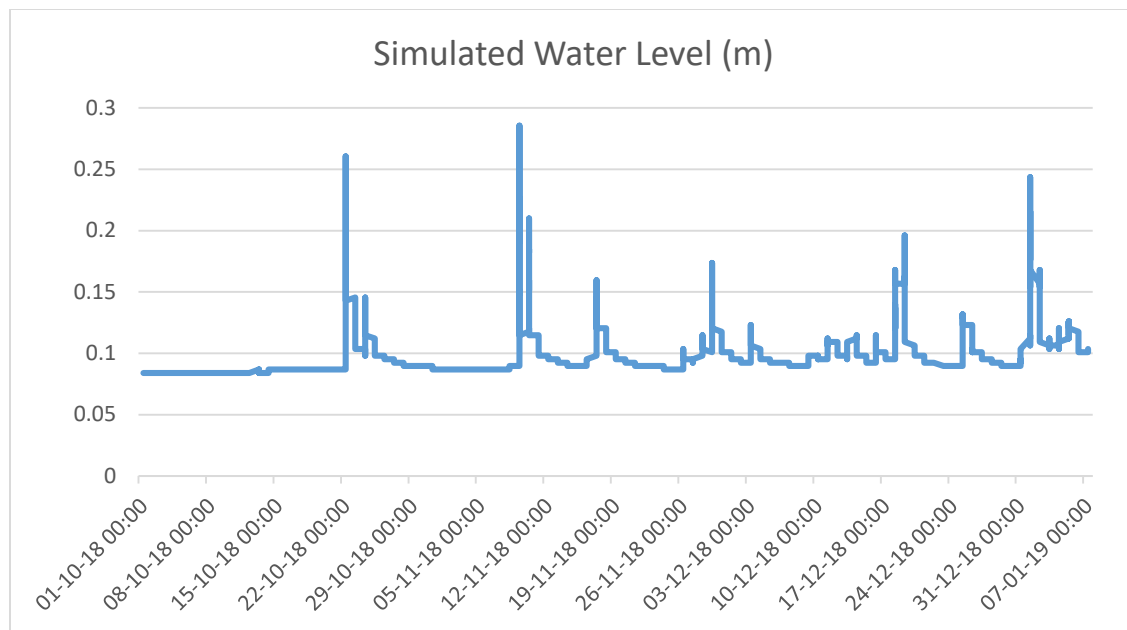
Μετά την εκτέλεση του μοντέλου, το λογισμικό εξάγει τα αποτελέσματα με συνοδευτικό γράφημα.



Εικόνα 45: Εξαγόμενα αποτελέσματα από το μοντέλο MIKE HYDRO River

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα εξαγόμενα δεδομένα για το σημείο 3549.5 του ρέματος, το οποίο είναι ακριβώς στο σημείο που έχει τοποθετηθεί το σταθμήμετρο, ώστε να υπάρχει ακριβής σύγκριση των δεδομένων του σταθμού με τα εξαγόμενα από το μοντέλο δεδομένα στάθμης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο εξαγει αποτελέσματα για όλα τα σημεία ελέγχου, ειδικά τα σημεία που έχουν εισαχθεί οι τομές, όμως καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα στάθμης για τα σημεία αυτά δεν λήφθηκε υπόψιν η στάθμη που εξάχθηκε από το λογισμικό στα σημεία αυτά. Μπορεί λοιπόν να υπάρχει περαιτέρω απόκλιση των αποτελεσμάτων εκτός του σημείου ελέγχου, όμως δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί στην παρούσα περίπτωση.

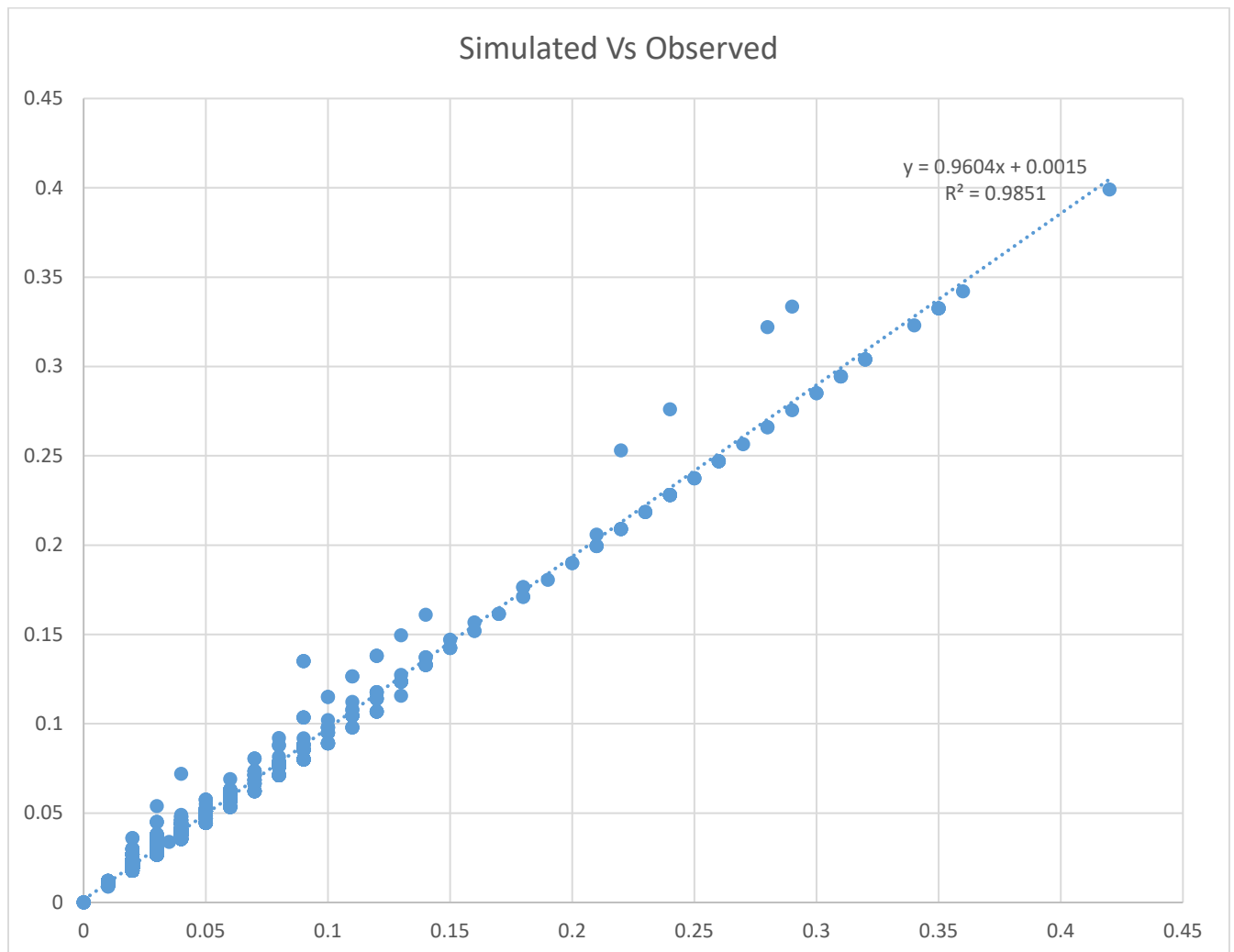




Εικόνα 46: Μετρήσεις στάθμης (Πάνω) από το τοποθετημένο σταθμήμετρο, σε σύγκριση με τα εξαγόμενα από το μοντέλο δεδομένα (Μέση) και η βροχή αντίστοιχα (κάτω) για την περίοδο της μοντελοποίησης.

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η στάθμη που μετρήθηκε στην περίοδο μοντελοποίησης και η μοντελοποιημένη στάθμη. Η συμπεριφορά της καμπύλης μοντελοποίησης ακολουθεί εκείνη των πραγματικών μετρημένων δεδομένων. Επίσης, η ένταση της βροχής συνδέεται με την αύξηση της στάθμης, καθώς οι μεγαλύτερες στάθμες τόσο στο μοντέλο όσο και στην

πραγματικότητα είναι την ίδια χρονική περίοδο (με μια αναμενόμενη μικρή υστέρηση) με τα συμβάντα υψηλής βροχόπτωσης.



Εικόνα 47: Σύγκριση θεωρητικών με πραγματικές τιμές.

Από τα δεδομένα της μοντελοποίησης επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα του μοντέλου, καθώς υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία τους με τα πραγματικά δεδομένα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στο σημείο μέτρησης της στάθμης η μέγιστη μετρούμενη στάθμη δεν υπερβαίνει τα 0.45μ, η οποία είναι αρκετά χαμηλότερη από το βάθος του ρέματος στο σημείο, που ανέρχεται στα 1,89μ από το κέντρο του ρέματος έως το χαμηλότερο σημείο της γέφυρας που έχει τοποθετηθεί το σταθμήμετρο στα κατάντη. Συμπερασματικά η στάθμη του ρέματος -ακόμα και στην πιο ραγδαία βροχόπτωση της περιόδου- δεν υπερβαίνει το μέγιστο βάθος και δεν οδηγεί σε

κατάκλυση της περιοχής από νερό, τουλάχιστον όχι εξαιτίας της υπερβολικής ροής νερού στο ρέμα. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η σημασία του σωστού πολεοδομικού σχεδιασμού και την σημασία έγκυρης μελέτης και υλοποίησης αντιπλημμυρικών έργων, με ιδιαίτερη έμφαση στις περιοχές υψηλότερου κινδύνου, όπως αυτές επισημαίνονται με την μέθοδο χωρικής εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας με χρήση ΓΣΠ (GIS).

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

### 8.1: Χωρική εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με τη χρήση ΓΣΠ

Η χρήση λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ή GIS επιτρέπει μέσω της μεθόδου αυτής στο χρήστη να προσδιορίζει χωρικά τις ζώνες πλημμυρικής επικινδυνότητας, με χρήση δεδομένων ευρέως διαθέσιμων. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σε μεγάλο αριθμό δημόσιων και ιδιωτών να εκτιμήσουν -έστω και σε έναν προκαταρκτικό βαθμό- την πλημμυρική επικινδυνότητα μιας περιοχής ενδιαφέροντος, και να προσδιορίσουν τον παράγοντα ή τους παράγοντες που είναι η αιτία για το όποιο επίπεδο επικινδυνότητας. Κατόπιν, η χρήση των ΓΣΠ (GIS) γίνεται ολοένα πιο διαδεδομένη, και πλέον υπάρχουν πλατφόρμες ΓΣΠ ανοιχτού κώδικα που είναι εντελώς δωρεάν και συνοδεύονται από εκτεταμένη υποστήριξη και οδηγούς χρήσης, διευκολύνοντας τη μετάβαση σε αυτές. Τα απαραίτητα δεδομένα, όπως οι χάρτες υψομέτρου, χρήσεων γης, βροχομετρία και γεωλογία είναι εύκολα προσβάσιμα, δίνοντας ευχέρεια στον κάθε ενδιαφερόμενο φορέα να πραγματοποιήσει την παραπάνω διεργασία.

Στην παρούσα εργασία η χωρική εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου πραγματοποιήθηκε για την περιοχή του Σταλού Νέας Κυδωνίας Χανίων, με επικέντρωση στο ρέμα του Σταλού και τις παρακείμενες σε αυτό περιοχές. Η περιοχή μελέτης αν και παραθαλάσσια στα βόρεια, είναι αρκετά ορεινή στο κεντρικό και νότιο τμήμα της, που οδηγεί σε μικρότερο πλημμυρικό κίνδυνο, ο οποίος από παλαιότερα πλημμυρικά συμβάντα φαίνεται να επικεντρώνεται στην πεδινή και παραθαλάσσια περιοχή. Πράγματι με την χωρική εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου οι παραθαλάσσιες περιοχές παρουσίασαν τον μεγαλύτερο βαθμό πλημμυρικού κινδύνου από την ευρύτερη περιοχή υπό εξέταση, καθώς οι παράγοντες του χαμηλού υψομέτρου, της χαμηλής κλίσης αλλά και των επικίνδυνων πλημμυρικά χρήσεων γης ήταν ιδιαίτερα αυξημένοι στα σημεία αυτά.

## 8.2: Μοντελοποίηση με το λογισμικό MIKE HYDRO River

Ο σκοπός της υλοποίησης μοντελοποίησης ροής με το λογισμικό MIKE HYDRO River ήταν η λεπτομερέστερη εξέταση της επιρροής της βροχής στην στάθμη του υπό εξέταση ρέματος. Το ρέμα που μοντελοποιήθηκε ήταν στο κέντρο της περιοχής μελέτης και επιλέχθηκε διότι εγκαταστάθηκε σταθμός καταγραφής στάθμης του στα κατάντη, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα άμεσης παρατήρησης και καταγραφής των μετρήσεων και συσχετισμού τους με την βροχόπτωση. Επίσης, στα ανάντη της περιοχής μελέτης εγκαταστάθηκε μετεωρολογικός σταθμός, δίνοντας ακριβή εικόνα της βροχόπτωσης στα ανάντη του ρέματος.

Η μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε ήταν μονοδιάστατη, το οποίο σημαίνει ότι προσομοιώθηκε η μεταβολή της στάθμης του ρέματος συναρτήσει του χρόνου, με δεδομένα εισόδου την βροχόπτωση. Η βροχόπτωση με τη σειρά της δεν είναι δυνατόν να εισαχθεί στο MIKE HYDRO River αυτούσια, αλλά αντ' αυτού δημιουργούνται οι επιμέρους υπολεκάνες για το κάθε παρακλάδι, και η βροχόπτωση που καταλήγει σε αυτές τις υπολεκάνες είναι η βάση για την βαθμονόμηση.

Γενικότερα η μοντελοποίηση ήταν μια ιδιαίτερα δύσκολη διεργασία, καθώς το λογισμικό δεν παρέχει βοηθήματα για την εύκολη διαχείριση των δεδομένων, καθιστώντας αναγκαία τον επαναλαμβανόμενο υπολογισμό των δεδομένων εισόδου μέσω εξωτερικού λογισμικού. Επίσης το λογισμικό παρουσίασε σφάλματα στην χωρική απεικόνιση, καθώς υπήρχε απόκλιση της θέσης του ποταμού με την δορυφορική εικόνα παρασκηνίου, το οποίο ήταν σφάλμα του λογισμικού που δεν επηρέασε τελικά το τελικό αποτέλεσμα αλλά δυσχέρανε την επιβεβαίωση της ορθότητας τοποθέτησης του ρέματος και των τομών.

Το μοντέλο κατά την εξαγωγή αποτελεσμάτων παρουσίαζε πολύ συχνά σφάλματα, ειδικότερα όσον αφορά την υπερβολικά μεγάλη στάθμη του ποταμού σε κάποια σημεία, που ξεπερνούσε το βάθος ροής πολλαπλάσιες φορές. Ο εντοπισμός του εκάστοτε αίτιου του σφάλματος ήταν χρονοβόρος και πολλές φορές η διόρθωσή του αλλοίωνε αρκετά τα αποτελέσματα, που σήμαινε την πραγματοποίηση πολλών δοκιμών ώστε να μπορέσει η προσομοίωση να αποφέρει λογικά



αρχικά αποτελέσματα. Ένα επιπλέον στοιχείο που δυσχέρανε την διαδικασία ήταν το μεγάλο χρονικό διάστημα που χρειαζόταν για την εκτέλεση της προσομοίωσης, που ξεπερνούσε τις 4 με 5 ώρες, αναλόγως του χρονικού βήματος και των δεδομένων εισόδου, καθώς μια πιο αναλυτική χρονοσειρά δυσχέραινε το υπολογιστικό φορτίο.

Ολοκληρώνοντας την μοντελοποίηση, το μοντέλο αν κι έδειξε άνοδο της στάθμης σε έντονα βροχοπτώτικά φαινόμενα με μεγάλη διάρκεια, ποτέ η στάθμη δεν ξεπέρασε το 25% του βάθους ροής, που επαληθεύεται και από τις καταγεγραμμένες μετρήσεις για τις ίδιες χρονικές στιγμές. Συμπερασματικά, τα όποια πλημμυρικά φαινόμενα της περιοχής που έχουν παρατηρηθεί εγγύς του κατώτερου τμήματος του ρέματος δεν οφείλονται σε υπερχειλίση του, αλλά από υπερβολική επιφανειακή απορροή που δεν διοχετεύεται στο υπό μελέτη ρέμα αλλά και στα υπόλοιπα ρέματα της περιοχής. Το κυριότερο αίτιο της συσσώρευσης επιφανειακής απορροής είναι πρωτίστως η αστικοποίηση της περιοχής, χωρίς την υλοποίηση επαρκών αντιπλημμυρικών έργων για την διοχέτευση των όμβριων υδάτων. Αν και υπάρχουν παρεμβάσεις στην κοίτη του ρέματος, όπως η εκτροπή της και η εισχώρηση κτισμάτων και οικοπέδων, δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα στα κατάντη του ρέματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε προσομοίωση συμεταφοράς φερτών υλικών, γεγονός που είναι αρκετά σημαντικό καθώς υπάρχει σημαντική ποσότητα φερτών υλικών που εναποτίθεται κάθε χρόνο στις ακτές, και σε ορισμένες περιπτώσεις όπως τον Μάρτιο του 2019 υπήρξαν πολύ έντονες βροχοπτώσεις που οδήγησαν στην απόθεση ασυνήθιστα μεγάλων ποσοτήτων φερτών υλικών. Τέτοιες ποσότητες φερτών υλικών μπορεί να οδηγήσουν σε μερική ή και πλήρη απόφραξη του ρέματος, οδηγώντας το νερό να συσσωρευτεί και να διοχετευτεί κάθετα, στις κτισμένες περιοχές.

Η χρησιμότητα της μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκε έγκειται στην διαπίστωση του γεγονότος ότι δεν είναι η υπερχειλίση του ρέματος επίπτωση σφοδρών βροχοπτώσεων, και οι όποιες πλημμύρες των παρακείμενων περιοχών δεν οφείλονται σε αυτήν, αλλά σε ανεπαρκή έργα διαχείρισης όμβριων υδάτων. Περαιτέρω, δίνεται πλέον ένα χρήσιμο εργαλείο για την διαπίστωση των όποιων επιπτώσεων μπορεί να έχει μια ενδεχόμενη αλλαγή στην κοίτη του ρέματος στην πλημμυρική δραστηριότητα της περιοχής. Επιπρόσθετα εντείνεται η έλλειψη επαρκών αντιπλημμυρικών μέτρων όχι τόσο για την υπερχειλίση αλλά για τη διαχείριση και

σωστή διοχέτευση των όμβριων υδάτων που δεν κατεισδύουν στον υπόγειο υδροφόρα λόγω αστικοποίησης της περιοχής.

### 8.3: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εστίασε στην υπάρχουσα κατάσταση της περιοχής του Κάτω Σταλού Νέας Κυδωνίας, εκτιμώντας τόσο χωρικά την συνολική πλημμυρική επικινδυνότητα όσο και την ανά παράγοντα επικινδυνότητα, αλλά και την συμπεριφορά ενός εκ των ρεμάτων της περιοχής με πραγματικά συλλεχθέντα δεδομένα βροχόπτωσης και κατά πόσο η στάθμη υπερβαίνει το μέγιστο ύψος του ρέματος. Αν και η μοντελοποίηση δεν έδειξε υπερβολική αύξηση της στάθμης που επιβεβαιώθηκε από τα πραγματικά δεδομένα, η πλημμυρική επικινδυνότητα της περιοχής είναι εμφανής, και αναμένεται να ενταθεί με την υλοποίηση της υπό ένταξη Β' Φάσης Πολεοδομικού Σχεδίου του Δήμου Χανίων, που προβλέπει μεταξύ άλλων την αυξημένη έκταση αστικοποιημένων εκτάσεων. Καθίσταται λοιπόν αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της προτεινόμενης διαρρύθμισης από πλημμυρικής άποψης, και η ένταξη εκτενέστερων αντιπλημμυρικών μέτρων τόσο στο ήδη υλοποιημένο πολεοδομικό σχέδιο αλλά και στην προτεινόμενη μελλοντική επέκταση.

Ένα σημαντικό επιπρόσθετο σημείο για μελλοντική έρευνα στην περιοχή μελέτης είναι και η ένταξη κλιματικών σεναρίων για βραχεία, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα κλιματικά σενάρια. Η κλιματική αλλαγή είναι ευρέως αποδεδειγμένη όπως και οι επιπτώσεις της στην ποσότητα της βροχής και της σφοδρότητας και συχνότητας των σφοδρών καιρικών φαινομένων. Οι αυξημένες και συχνότερες – σφοδρότερες βροχοπτώσεις αναμένεται να έχουν εκθετικά δυσμενέστερες επιπτώσεις στα πλημμυρικά φαινόμενα, καθώς αυξημένη ποσότητα νερού θα ξεπεράσει την ικανότητα των υπάρχοντων αντιπλημμυρικών έργων να απομακρύνουν το νερό αυτό, και τα πεδία πλημμύρας (flood planes) θα επεκταθούν και σε περιοχές που δεν είχαν επηρεαστεί προηγουμένως.

Τέλος, για την μοντελοποίηση ένα πρόσθετο στοιχείο για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι και η προσθήκη μοντέλου 2 διαστάσεων, για αναλυτικότερη μοντελοποίηση της έκτασης του πλημμυρικού πεδίου (flood plane), αλλά και η χρήση λογισμικού που μοντελοποιεί αστικές δομές, όπως το MIKE Urban, της DHI, βασισμένο σε παρόμοιο κώδικα με το χρησιμοποιούμενο στην παρούσα διπλωματική εργασία λογισμικό. Επιπλέον, θα μπορούσε να ενσωματωθούν σενάρια για προβλεπόμενες κατασκευές στο flood plane που ενδεχομένως να επηρέαζαν την πλημμυρική ροή και την έκταση, πιο συγκεκριμένα η μοντελοποίηση ενδεχόμενων κατασκευών και κατά πόσο θα επηρεάσουν την έκταση και τη σφοδρότητα της πλημμύρας (ειδικότερα τις υλικές ζημιές) σε ενδεχόμενα σενάρια πλημμύρας.

## Βιβλιογραφία

- Κουργιαλάς, Ν. (2010), "Ολοκληρωμένη διαχείριση - πρόβλεψη & αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων σε σύνθετες γεωμορφολογικά περιοχές με χρήση μαθηματικών μοντέλων και GIS", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς.
- Τσουχλαράκη, Α. (2010), "Μαθαίνοντας τα GIS στην πράξη" - 1η έκδ. - Θεσσαλονίκη : Δίσιγμα.
- Borah, D. K., and Bera M. (2003), "SWAT model background and application reviews." American Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada.
- Bouwen, B. and Taillieu, T., (2004), "Multi-party collaboration as social learning for interdependence: developing relational knowing for sustainable natural resource management." Journal of Community and Applied Social Psychology, 14(3): 137-153.
- Few, R., Ahern, M. Matthies, F. and Kovats, S. (2004), "Floods, Health and Climate Change: A Strategic Review", Tyndall Centre for Climate Change Research, Working paper 63.
- Green, C.H., Parker, D.J., Tunstall, S.M., (2000), "Assessment of Flood Control and Management Options" Thematic Review IV.4 prepared as an input to the World Commission on Dams, Cape Town, [www.dams.org](http://www.dams.org).
- Hoyois, P. and Guha-Sapir, D. (2003), "Three decades of floods in Europe: a preliminary analysis of EMDAT data", WHO collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Catholique University of Louvain.

- Menne, B. and Murray, V. (2013), "Floods in the WHO European Region: Health effects and their prevention", World Health Organization, Regional Office for Europe.
- Migliaccio, K. W., Srivastava, P. (2007) "Hydrologic components of watershed-scale models." Transactions of the ASABE 50.5: 1695-1703.
- Kourgialas, Nektarios N. & Karatzas, George P. (2011) "Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study", Hydrological Sciences Journal, 56:2, 212-225, DOI: 10.1080/02626667.2011.555836
- Lyu, H., Wang, G., Shen, J., Lu, L. and Wang, G. (2016), "Analysis and GIS Mapping of Flooding Hazards on 10 May 2016, Guangzhou, China", Water Journal, 2016, 8, 447.
- Shaban, A., Khawlie, M., Bou, Kheir. R., Abdallah, C., 2001. Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon-eastern Mediterranean. Bull Eng Geol Env, 60:93-101.
- Torterotot, J. P., (1993), "Le coût des dommages dûs aux inondations: Estimation et analyse des incertitudes", CERGRENE, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 634 pp.
- Winter, T.C. (1999), "Relation of Streams, Lakes and Wetlands to Groundwater Flow Systems", Hydrogeology Journal 7, 28-45.