



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Εφαρμογή στο Σαρανταπόταμο Ελευσίνας

Τουτζιάρη Μαγδαληνή

Επιβλέπων: Μαμάσης Νίκος, Λέκτορας ΕΜΠ

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη &
Τεχνολογία
Υδατικών Πόρων»

Αθήνα, Μάρτιος 2012

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ**
Εφαρμογή στο Σαρανταπόταμο Ελευσίνας

Τουτζιάρη Μαγδαληνή

Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, Α.Π.Θ.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Επιβλέπων: Μαμάσης Νίκος, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μου ανατέθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, λέκτορα ΕΜΠ κ. Νίκο Μαμάση, για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και τη συμβολή του με καίριες επισημάνσεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό και μέλος της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ, κ. Αντώνη Κουκουβίνο, για το ενδιαφέρον του, τη συμπαράσταση του και την αμέριστη βοήθεια του σε πρακτικά, κομβικά σημεία της εργασίας. Θα ήταν παράλειψη από μέρους μου αν δεν αναφερθώ στον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, ο οποίος με την ανεξάντλητη ευγένεια του, ήταν πρόθυμος να συνεργαστεί και να προτείνει λύσεις σε οποιαδήποτε δυσκολία παρουσιαζόταν. Τέλος, το υδραυλικό μέρος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας διεκπεραιώθηκε ομαλά, χάρη στην πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του υποψήφιου Διδάκτορα, Παναγιώτη Δημητριάδη, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για το χρόνο που αφιέρωσε στο στάδιο αυτό της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένεια μου για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια σε οποιοδήποτε προσωπικό μου εγχείρημα, καθώς και τα μέλη του «Ελληνικού Ινστιτούτου Υδρολογίας», Βάσω Παγάνα και Μαρίνα Μαθιουδάκη, για τις ατελείωτες μεν, επικοινωνητικές και ευχάριστες δε, ώρες που περάσαμε κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας. Οφείλω να παραδεχθώ ότι, ο κύκλος αυτός των σπουδών κλείνει με τις καλύτερες εντυπώσεις από τον τρόπο συνεργασίας, προσέγγισης και βοήθειας από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τουτζιάρη Μαγδαληνή,

Αθήνα, Μάρτιος 2012.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα	iii
Περίληψη	xi
Extended Abstract	xiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	1
1.1.1. Γενικά.....	1
1.1.2. Πλημμύρες: τι συμβαίνει στην Ελλάδα.....	4
1.1.3. Το θεσμικό πλαίσιο για τις πλημμύρες.....	6
1.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	9
1.2.1 ΤΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-HMS.....	12
1.3. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	14
2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	15
2.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2. ΦΥΣΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	16
3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	21
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ HEC-GEOHMS.....	23
3.2.1. Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους.....	23
3.2.2. Προετοιμασία αρχείων εισόδου για εισαγωγή στο HEC-HMS.....	27
3.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	31
3.3.1. Το μοντέλο λεκάνης απορροής (BASIN MODEL).....	31
3.3.1.1. Το πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής.....	32
3.3.1.2 Υπολογισμός του αριθμού καμπύλης απορροής CN.....	34
3.3.1.3. Το πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής.....	39
3.3.1.4. Το πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής.....	43

3.3.1.5. Το πρότυπο διόδευσης πλημμύρας.....	44
3.3.2. Το μετεωρολογικό μοντέλο (METEOROLOGIC MODEL).....	44
3.3.3. Το αρχείο προσομοιώσεων (CONTROL SPECIFICATIONS).....	47
3.3.4. Το αρχείο υπολογισμών-Αποτελέσματα.....	47
3.3.5. Διερεύνηση των υδρολογικών παραμέτρων-Αποτελέσματα.....	49
4. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ	53
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
4.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-GeoRAS.....	55
4.2.1 Η κύρια γραμμή ροής ποταμού (stream centerline).....	56
4.2.2 Οι όχθες (bank lines).....	57
4.2.3. Οι κύριες διευθύνσεις ροής (Flow path centerlines).....	58
4.2.4 Οι διατομές (Cross section cut lines).....	58
4.2.5 Οι χρήσεις γης (Landuse Areas).....	61
4.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-RAS.....	62
4.4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-RAS.....	64
4.5. ΟΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	66
4.5.1. Προετοιμασία γεωμετρικού και υδρολογικού αρχείου για τους υπολογισμούς.....	66
4.5.2. Το θεωρητικό υπόβαθρο των υπολογισμών.....	67
4.5.3. Τα αποτελέσματα στις διατομές μελέτης.....	71
4.5.4. Τα αποτελέσματα στις διατομές μελέτης με τις νέες παροχές αιχμής.....	73
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ HEC ME ΠΑΡΑΤΗΡΗΜΕΝΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	77
5.1.ΓΕΝΙΚΑ.....	77
5.2. Η ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	77
5.2.1. Η μέθοδος πολυγώνων Thiessen.....	78
5.2.2. Αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης.....	81
5.3. Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	83
5.3.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	83

6. ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	87
6.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	87
6.2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ.....	89
6.3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.....	89
6.4. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΤΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.....	90
ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ, ΧΑΡΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΕΙΚΟΝΕΣ

<i>Εικόνα 1.1. Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα.....</i>	<i>5</i>
<i>Εικόνα 2.1. Η περιοχή του Θριάσιου πεδίου.....</i>	<i>15</i>
<i>Εικόνα 3.1. Οι θέσεις των σταθμών μέτρησης στην περιοχή μελέτης.....</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 3.2. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής πριν την εφαρμογή της εντολής Generate Project.....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 3.3. Η περιοχή μελέτης όπως έχει οριστεί με την εφαρμογή της εντολής Generate Project.....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 3.4. Η τελική μορφή των υπολεκανών και του υδρογραφικού δικτύου μελέτης..</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 3.5. Πίνακας ιδιοτήτων των υπολεκανών.....</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 3.6. Το μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS.....</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 3.7. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των υπολεκανών.....</i>	<i>32</i>
<i>Εικόνα 3.8. Ο πίνακας ιδιοτήτων της υπολεκάνης 17 με τους αντίστοιχους αριθμούς CN.....</i>	<i>38</i>
<i>Εικόνα 3.9. Οι αριθμοί CN και τα ποσοστά αδιαπέρατης επιφάνειας σε κάθε υπολεκάνη.....</i>	<i>39</i>
<i>Εικόνα 3.10. Οι τιμές του μοναδιαίου υδρογραφήματος μιας τυχαίας λεκάνης (W140) σε περιβάλλον HEC-HMS.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 3.11. Το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης W140.....</i>	<i>43</i>

<i>Εικόνα 3.12. Οι γενικές ρυθμίσεις των χρονοσειρών βροχόπτωσης πριν την εισαγωγή τους στο HEC-HMS.....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 3.13. Χρονικός καθορισμός επεισοδίου βροχής.....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 3.14. Το υετογράφημα σχεδιασμού για τη λεκάνη απορροής 14 (T=20 έτη)....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 3.15. Το αρχείο προσομοίωσης πριν τους υπολογισμούς.....</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 3.16. Υδρογράφημα ανάντη θέσης μέτρησης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 3.17. Υδρογράφημα θέσης μέτρησης λίγο πριν την έξοδο της λεκάνης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 3.18. Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h ανάντη υπολεκάνης W150 και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 3.19. Συγκεντρωτικός πίνακας της αντίστοιχης υπολεκάνης απορροής.....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 3.20. Πρότυπο υπολογισμού διόδου πλημμύρας.....</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 3.21. Υδρογράφημα ανάντη θέσης μέτρησης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 3.22. Υδρογράφημα θέσης μέτρησης λίγο πριν την έξοδο της λεκάνης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 3.23. Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h ανάντη υπολεκάνης και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 3.24. Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h κατάντη υπολεκάνης και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 4.1. Η εργαλειοθήκη του HEC-GeoRAS.....</i>	<i>55</i>
<i>Εικόνα 4.2. Το μενού για τη ψηφιοποίηση των θεματικών επιπέδων.....</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 4.3. Η ψηφιοποιημένη κύρια γραμμή ροής του ποταμού.....</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 4.4. Η ονομασία της κύριας γραμμής ροής του ποταμού.....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.5. Οι κύριες γραμμές των οχθών.....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.6. Ορισμός απόστασης και μήκους των διατομών.....</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4.7. Το θεματικό επίπεδο των διατομών.....</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4.8. Μια τυχαία διατομή της κύριας κοίτης του ποταμού μελέτης.....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4.9. Οι χρήσεις γης κατά μήκος του ποταμού.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4.10. Απόδοση τιμών συντελεστών Manning σύμφωνα με τις χρήσεις γης.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4.11. Το κεντρικό μενού του προγράμματος HEC-RAS.....</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 4.12. Η διατομή στο σταθμό μέτρησης στην περιοχή Οινόη.....</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 4.13. Το σημείο όπου οι διατομές υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία.....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4.14. Μια τυχαία διατομή μετά από επεξεργασία.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4.15. Η διατομή στο σταθμηγράφο στην περιοχή Μαγούλα.....</i>	<i>64</i>

<i>Εικόνα 4.16. Υδρολογικά δεδομένα σε συνθήκες μόνιμης ροής.....</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4.17. Ορισμός οριακών συνθηκών για μόνιμη ροή.....</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 4.18. Πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της εξίσωσης ενέργειας της διατομής.....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 4.19. Το νέο υδρολογικό αρχείο.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 5.1. Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας.....</i>	<i>78</i>
<i>Εικόνα 5.2. Τα πολύγωνα Thiessen για την περιοχή μελέτης.....</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 5.3. Το παρατηρημένο υετογράφημα σε μια τυχαία υπολεκάνη (14).....</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 5.4. Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 06/02/12-10/02/12 ανάντη υπολεκάνης.....</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 5.5. Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 06/02/12-10/02/12 κατάντη υπολεκάνης.....</i>	<i>82</i>
<i>Εικόνα 5.6. Το προσομοιωμένο και το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα για την κατάντη θέση μέτρησης.....</i>	<i>82</i>
<i>Εικόνα 5.7. Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιωμένου και παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος για τη θέση μέτρησης.....</i>	<i>83</i>
<i>Εικόνα 6.1. Εξαγωγή προσομοιωμένου αρχείου από το HEC-RAS στο HEC-GeoRAS.....</i>	<i>87</i>
<i>Εικόνα 6.2. Συμπλήρωση των απαραίτητων στοιχείων για την ανάλυση του προφίλ T=20 έτη.....</i>	<i>88</i>
<i>Εικόνα 6.3. Οι πιεζομετρικές επιφάνειες για περίοδο επαναφοράς T=20 έτη.....</i>	<i>89</i>
<i>Εικόνα 6.4. Τα βάθη και η έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=20 έτη.....</i>	<i>90</i>
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	
<i>Διάγραμμα 4.1. Τα βασικά μεγέθη της εξίσωσης ενέργειας.....</i>	<i>68</i>
<i>Διάγραμμα 4.2. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=20, T=100 και T=1000 έτη.....</i>	<i>72</i>
<i>Διάγραμμα 4.3. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=20, T=100 και T=1000 έτη.....</i>	<i>72</i>
<i>Διάγραμμα 4.4. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=20, T=100 και T=1000 έτη.....</i>	<i>74</i>
<i>Διάγραμμα 4.5. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=20, T=100 και T=1000 έτη.....</i>	<i>75</i>
<i>Διάγραμμα 5.1. Η διατομή στη θέση Οινόη, για παρατηρημένο επεισόδιο βροχής (06/02/12-11/02/12).....</i>	<i>84</i>

Διάγραμμα 5.2. Η διατομή στη θέση Μαγούλα, για παρατηρημένο επεισόδιο βροχής (06/02/12-11/02/12).....	84
Διάγραμμα 6.1. Συγκριτική παρουσίαση κατακλυζόμενων περιοχών.....	90

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1. Κατηγορίες πλημμύρων, αιτίες πρόκλησης και επιπτώσεις.....	2
Πίνακας 1.2. Το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.....	8-9
Πίνακας 1.3. Κατηγορίες μοντέλων ανάλογα με τη μαθηματική δομή.....	11
Πίνακας 2.1. Κατηγορίες εδαφών στην περιοχή μελέτης με κριτήριο την υδατοπερατότητα.....	19
Πίνακας 2.2. Οι γενικευμένες χρήσεις γης με τα αντίστοιχα ποσοστά έκτασης που καταλαμβάνουν.....	19
Πίνακας 3.1. Γενικευμένη κατηγοριοποίηση χρήσεων γης.....	35
Πίνακας 3.2. Κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης για τον υπολογισμό του αριθμού CN στη λεκάνη μελέτης.....	36
Πίνακας 3.3. Κατάταξη εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητα τους.....	36
Πίνακας 3.4. Εύρος τιμών καμπύλης απορροής CN για κάθε χρήση γης και τύπο εδάφους.....	37
Πίνακας 3.5. Αριθμοί καμπύλη απορροής για κάθε χρήση γης και τύπο εδάφους που χρησιμοποιούνται στην εργασία.....	37
Πίνακας 3.6. Οι υπολογισμοί για την κατάρτιση του νετογράμματος σχεδιασμού για μια τυχαία λεκάνη απορροής (I7) με $T=20$ έτη.....	45
Πίνακας 4.1. Παρουσίαση πιο συχνών σφαλμάτων κατά τους υδραυλικούς υπολογισμούς.....	67
Πίνακας 4.2. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Οινόη) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.....	73
Πίνακας 4.3. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Μαγούλα) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.....	73
Πίνακας 4.4. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Οινόη) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς με το νέο υδρολογικό αρχείο.....	75
Πίνακας 4.5. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Μαγούλα) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς με το νέο υδρολογικό αρχείο.....	75
Πίνακας 5.1. Οι συντελεστές Thiessen για κάθε σταθμό.....	80
Πίνακας 5.2. Οι συντελεστές Thiessen για κάθε υπολεκάνη.....	80
Πίνακας 6.1. Εμβαδά κατακλυζόμενων περιοχών.....	90

ΧΑΡΤΕΣ

<i>Χάρτης 1.1. Οι μεγαλύτερες πλημμύρες που έλαβαν χώρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1998-2002.....</i>	<i>3</i>
<i>Χάρτης 1.2. Συχνότητα πλημμυρικών φαινομένων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1998-2002</i>	<i>4</i>
<i>Χάρτης 1.3. Ποσοστά μέσου ετήσιου ύψους βροχής σε μια μέρα, ανά την Ελλάδα.....</i>	<i>5</i>
<i>Χάρτης 2.1. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου.....</i>	<i>17</i>
<i>Χάρτης 2.2. Κλίσεις εδάφους της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου.....</i>	<i>17</i>
<i>Χάρτης 2.3. Κατάταξη εδαφών ως προς την περατότητα.....</i>	<i>18</i>
<i>Χάρτης 2.4. Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης σε γενικευμένες κατηγορίες.....</i>	<i>18</i>
<i>Χάρτης 3.1. Οι χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης.....</i>	<i>35</i>
<i>Χάρτης 6.1. Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>91</i>
<i>Χάρτης 6.2. Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου επαναφοράς 100 έτη.....</i>	<i>92</i>
<i>Χάρτης 6.3. Πιεζομετρικός χάρτης περιόδου επαναφοράς 1000 έτη.....</i>	<i>93</i>
<i>Χάρτης 6.4. Πιεζομετρικός χάρτης παρατηρημένου επεισοδίου βροχόπτωσης.....</i>	<i>94</i>
<i>Χάρτης 6.5. Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς 20 έτη.....</i>	<i>95</i>
<i>Χάρτης 6.6. Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....</i>	<i>96</i>
<i>Χάρτης 6.7. Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς 1000 έτη.....</i>	<i>97</i>
<i>Χάρτης 6.8. Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για παρατηρημένο επεισόδιο βροχής.....</i>	<i>98</i>

ΣΧΗΜΑΤΑ

<i>Σχήμα 3.1. Σχεδιάγραμμα διαδικασίας προεπεξεργασίας δεδομένων στο HEC-GeoHMS και της υδρολογικής προσομοίωσης στο HEC-HMS.....</i>	<i>22</i>
<i>Σχήμα 3.2. Σειρά εντολών της προεπεξεργασίας του μοντέλου εδάφους.....</i>	<i>24</i>
<i>Σχήμα 3.3. Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής.....</i>	<i>25</i>
<i>Σχήμα 3.4. Κάναβος διευθύνσεων απορροής.....</i>	<i>25</i>
<i>Σχήμα 3.5. Κάναβος πλήθους φατνίων απορροής.....</i>	<i>26</i>
<i>Σχήμα 4.1. Σχεδιάγραμμα πορείας εργασιών για την υδραυλική προσομοίωση και τη σύνθεση χαρτών.....</i>	<i>54</i>
<i>Σχήμα 4.2. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφορά K για όλη τη διατομή.....</i>	<i>68</i>

Σχήμα 4.3. Υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής.....69

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται, η διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης λεκάνης απορροής ποταμού, της μετέπειτα υδραυλικής προσομοίωσης τμήματος υδατορεύματος και τελικά η εξαγωγή χαρτών πιεζομετρικών βαθών και χαρτών πολυγώνων πλημμυρικής κατάκλυσης.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS και το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS, σχεδιασμένα από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού. Το πρώτο εφαρμόζεται για την προσομοίωση των διεργασιών βροχόπτωσης-απορροής σε λεκάνες απορροής, ενώ το δεύτερο επιτρέπει τη μονοδιάστατη ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων ή τεχνητών συστημάτων. Η προεπεξεργασία των δεδομένων επιτυγχάνεται με το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGis και συγκεκριμένα με τις επεκτάσεις αυτού HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS.

Αρχικά, επιλέχθηκε η περιοχή μελέτης, ήτοι 200 km², της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου στην Ελευσίνα για την υδρολογική προσομοίωση και περίπου 20 km του βόρειου κλάδου του ποταμού για την υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η συλλογή πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, οι χάρτες χρήσεων γης και ο γεωλογικός χάρτης. Ακολούθησε η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης, για τρεις περιόδους επαναφοράς T=20, 100, 1000 έτη, και ενός παρατηρημένου επεισοδίου βροχής (06/02/12-10/02/12). Αρχικά, λόγω έλλειψης βροχομετρικών δεδομένων, έγινε προσεγγιστική εκτίμηση του υδρολογικού καθεστώτος μέσω όμβριων καμπυλών που ισχύουν για την περιοχή. Η υδρολογική προσομοίωση έδωσε ως τελικά εξαγόμενα, πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης και για κάθε περίοδο επαναφοράς τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού. Η υδραυλική προσομοίωση της ροής κατά μήκος του ποταμού σε συνθήκες μόνιμης ροής εξάγει τελικά τις γραμμές ενέργειας και τα πιεζομετρικά βάθη για κάθε περίοδο επαναφοράς και για την παρατηρημένη βροχόπτωση.

Τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής δίνουν τις πιεζομετρικές επιφάνειες οι οποίες συγκρινόμενες με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υπολογίζουν τα βάθη του νερού. Η χαρτογράφηση της πλημμύρας πραγματοποιείται σε περιβάλλον ArcGis (HEC-GeoRAS), με τη σχεδίαση των πιεζομετρικών επιφανειών και τελικά τον ορισμό των πολυγώνων πλημμυρικής κατάκλυσης. Παρατηρούνται μικρές

διαφορές στις εκτάσεις των πλημμυρικών πεδίων για τις τρεις περιόδους επαναφοράς και για το παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης (έως 1 km²).

Η εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας που πραγματεύεται η εν λόγω εργασία αποτελεί ουσιαστικό κομμάτι εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης των πλημμυρών πραγματοποιείται με την εκπόνηση χαρτών κινδύνων πλημμύρας όπου περιγράφονται οι δυσμενείς επιπτώσεις πλημμύρας, μια πιθανή μετέπειτα εξέλιξη της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Floods are a natural phenomenon that is often characterized as extreme, due to the serious material damage and human losses. A flood can simply be defined as the temporary covering by water of land not normally covered by water. Floods are normally caused by climatic processes, while their evolution depends mainly on geomorphologic factors, such as soil stability and permeability, vegetation cover, as well as the geometrical characteristics of the river basin.

Scope

In this postgraduate thesis, entitled as, “Implementation of a methodological framework for mapping flood inundation in Sarantapotamos river basin”, the process of hydrological river basin simulation, the hydraulic simulation of a stream section and finally the export of piezometric flood depth maps and flood depth polygon maps are examined.

The study was accomplished through the use of the software developed by the Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army Corps of Engineers, specifically the hydrological model HEC-HMS and hydraulic model HEC-RAS. The first, applied to simulate rain-runoff processes in river basins, while the second allows the one-dimensional analysis and simulation of natural water courses or artificial systems. The preprocessing of the data obtained with the geographical information system ArcGis and specifically with ArcGis extensions, HEC-GeoHMS and HEC-GeoRAS.

Thesis outline

The thesis is structured in chapters as follows:

Chapter 1 Introduction

- Floods-Generally.
- Current conditions in Greece.
- The institutional framework for floods.
- Hydrologic models- HEC-HMS.
- Thesis scope and brief description of the methodology followed.

Chapter 2 Case study

- Presentation of the case study.
- Geographical information.
- Digital elevation model, slopes, land use map, soil type map.

Chapter 3 Hydrologic simulation of river basin

- Data preprocessing, through the use of HEC-GeoHMS, for the determination of basin topology and hydrographic network and finally the computation of topographical and hydrological characteristics.
- Hydrologic simulation, through the use of HEC-HMS, for the computation of design floods for several return periods and observed rainfall event.
- Scientific background of the methodology followed.
- Hydrologic simulation results.

Chapter 4 Hydraulic simulation of Sarantapotamos river

- Creation of geometry file and determination of river geometry through the use of HEC-GeoRAS.
- Import of hydrologic file to HEC-RAS, from the hydrologic model HEC-HMS (peak outflows).
- Hydraulic open channel flow simulation in steady flow conditions, through the use of HEC-RAS, for the computation of piezometric surface and energy gradients.
- Scientific background of the methodology followed.
- Hydraulic simulation results.
- Exportation of simulation results to HEC-GeoRAS for the digital mapping of water surface and floodplain delineation for each return period and the observed rain event.
- Water surface maps for each return period and the observed rainfall event.
- Floodplain delineation maps for each return period and the observed rainfall event.

Chapter 5 Application through the use of HEC with observed rainfall event.

- Conversion of point precipitation to surface precipitation through the Thiessen polygon method.
- Hydrologic simulation of river basin, through the use of HEC-HMS.
- Hydrologic simulation results.
- Hydraulic simulation of Sarantapotamos river through the use of HEC-RAS.
- Hydraulic simulation results.

Chapter 6 Conclusions

- Evaluation of the study and recommendations for further research.

Case study

The case study of the developed methodology is a part of Sarantapotamos river basin, in Eleysina, Greece, covering an area of 200 km². For this region, the collected raw

data consisted of the digital elevation model, as well as the land use and soil type maps. Due to lack of rainfall data, for the hydrologic inputs, we initially used reliable rainfall data in the estimation of rainfall intensity curves, as adapted to data from adjacent basins. The hydraulic simulation is run on 20 km along Sarantapotamos river in steady flow analysis.

Hydrologic simulation

The hydrologic simulation was designed and run through the use of HEC-HMS, with the collaboration of HEC-GeoHMS, which is a hydrologic add-in tool in the ArcGis platform.

The input files required, are the basin model file, which is constructed in HEC-GeoHMS software, and the meteorologic model file. Initially, we selected the methods for the computation of rainfall losses and direct runoff. Specifically, the SCS method was applied for the computation of rainfall losses and the user specified unit hydrograph (a variation of the British Hydrological Institute method) was applied for the calculation of the direct runoff. The channel flow routing is used for specific cases by lag time and the baseflow component is omitted on purpose, due to lack of data.

The meteorologic model file consists of rainfall events which derived from the estimated rainfall intensity curves, corresponding to the return periods $T=20$ yrs, $T=100$ yrs, $T=1000$ yrs, applied in each subbasin of the case study. The simulation was run for this design storms as well as, for the observed rainfall event. The output of the procedure is a package of flood hydrographs for each subbasin and each return period (like the one shown in fig.1).

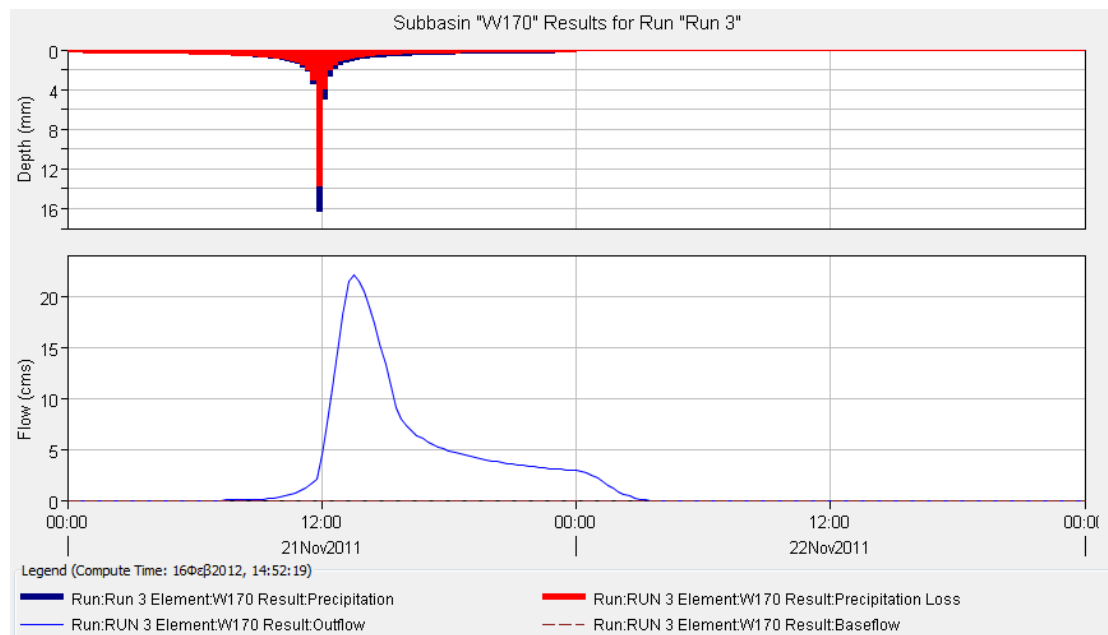


Figure 1. Rainfall hyetograph and direct runoff hydrograph for a 24-hour rainfall event corresponding to 20-years return period to an upstream river basin.

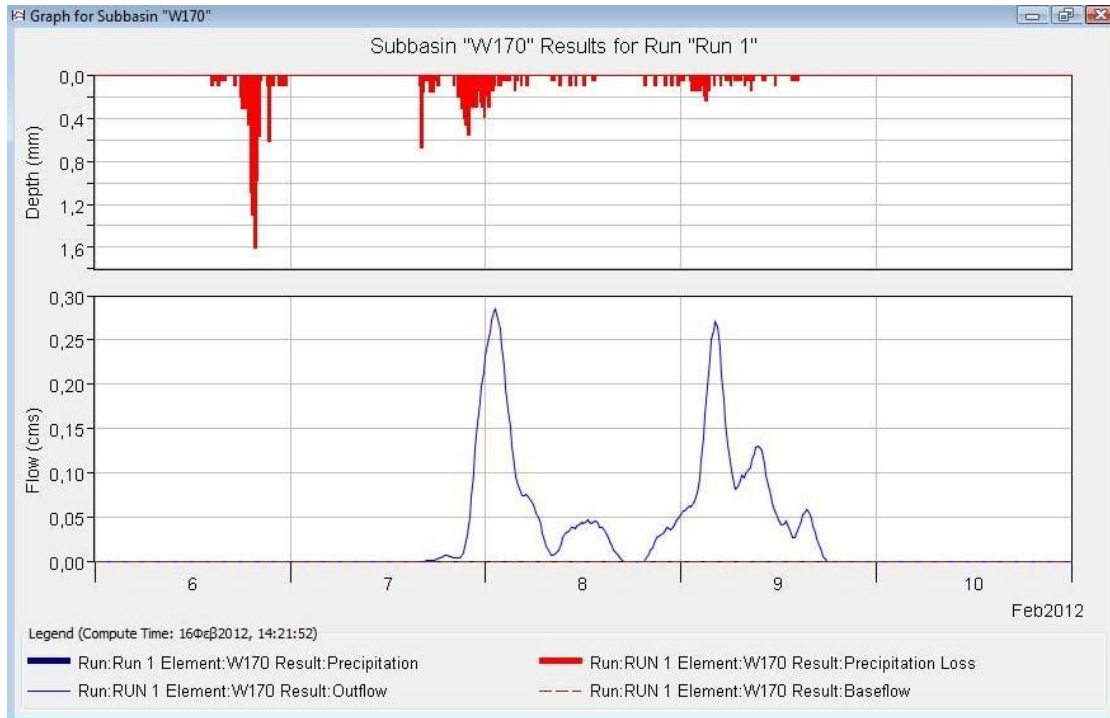


Figure 2. Rainfall hyetograph and direct runoff hydrograph for an observed rainfall event (06/02/12-10/02/12) to an upstream river basin.

Hydraulic simulation

The hydraulic simulation of 20 km along Sarantapotamos river was designed and run for the selected return periods through the use of HEC-RAS, with the collaboration of HEC GeoRAS, an add-in to ArcGis.

Firstly, a geometric file is created in HEC GeoRAS, which includes the basic layers of the geometry of river, i.e. stream centreline, banks, cross sections etc. After the accomplishment of the first step, the geometric file is imported in HEC-RAS program and the hydrologic file is created. This file includes the peak discharges as they are computed in HEC-HMS. The river was simulated in steady flow conditions and the relevant boundary conditions, as set up according to the data.

The whole computational procedure is based on the resolution of the energy balance equation between successive river cross-sections. Particularly, the calculations result in the determination of the piezometric depth, the mean kinetic energy and the energy gradient for every cross-section. In the following chart is presented a river cross section to a downstream position for a 20 year flood, 100 year flood and 1000 year flood.

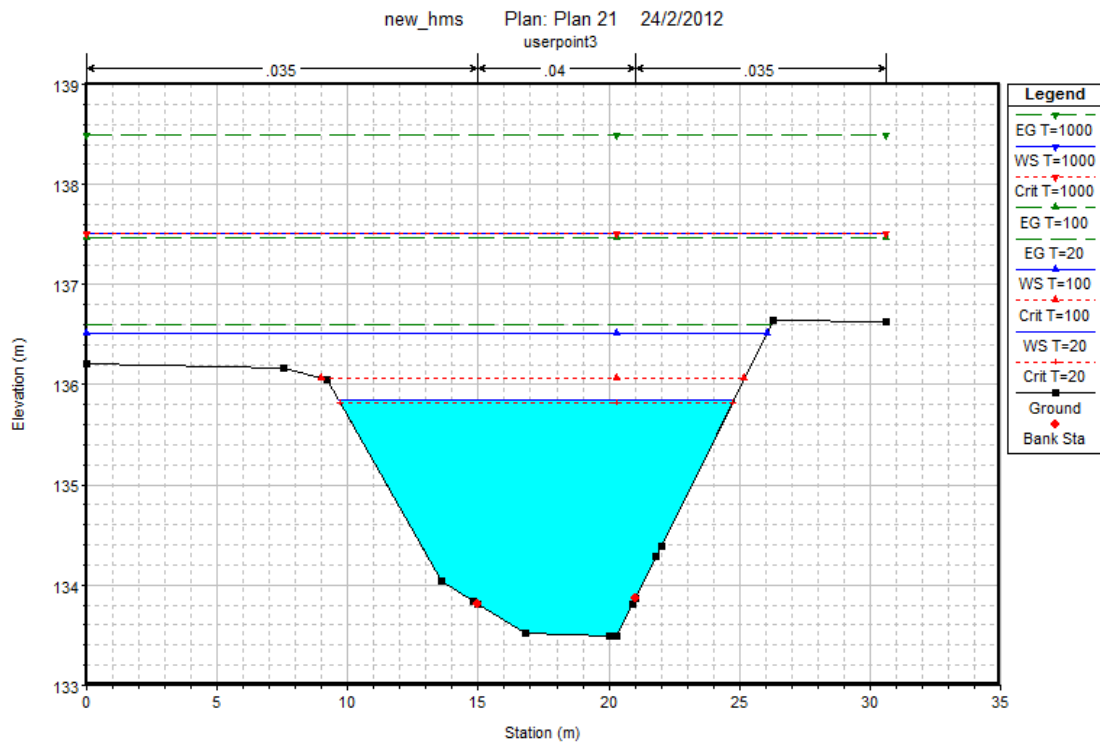


Chart 1. A downstream river cross section for flood events for the three return periods (20 years, 100 years, 1000 years)

Digital mapping

The results of hydrologic and hydraulic simulation are imported in HEC GeoRAS and they include all the necessary information for the creation of flood maps.

The software compares the grid cell values of the digital elevation model (i.e. topographical elevations) with the corresponding values of piezometric surface (i.e. water surface elevations). Consequently, the software constructs a three dimensional model of water surface profiles from the river cross section and the piezometric depth on each cross section. In points where the elevation of the piezometric surface is higher than the ground elevation, the difference between two heights is calculated, which represents the corresponding water depth at the position. The output product is a new grid surface, which depicts the water depths in the whole area of the river basin. A floodplain inundation map for a 100 year flood event is presented in the end of this document.

The comparison between the inundated areas between the three different flood events leads to the conclusion that there is a little correlation between the increase in peak discharge flows with the corresponding increase in the floodplain area. Listed in a comparative chart, are the areas of floodplain for these cases.

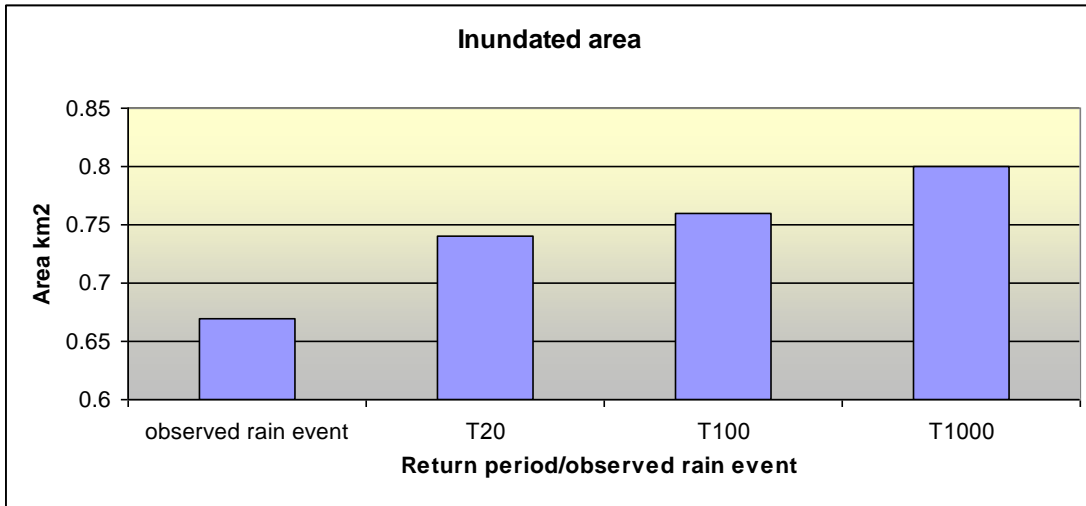


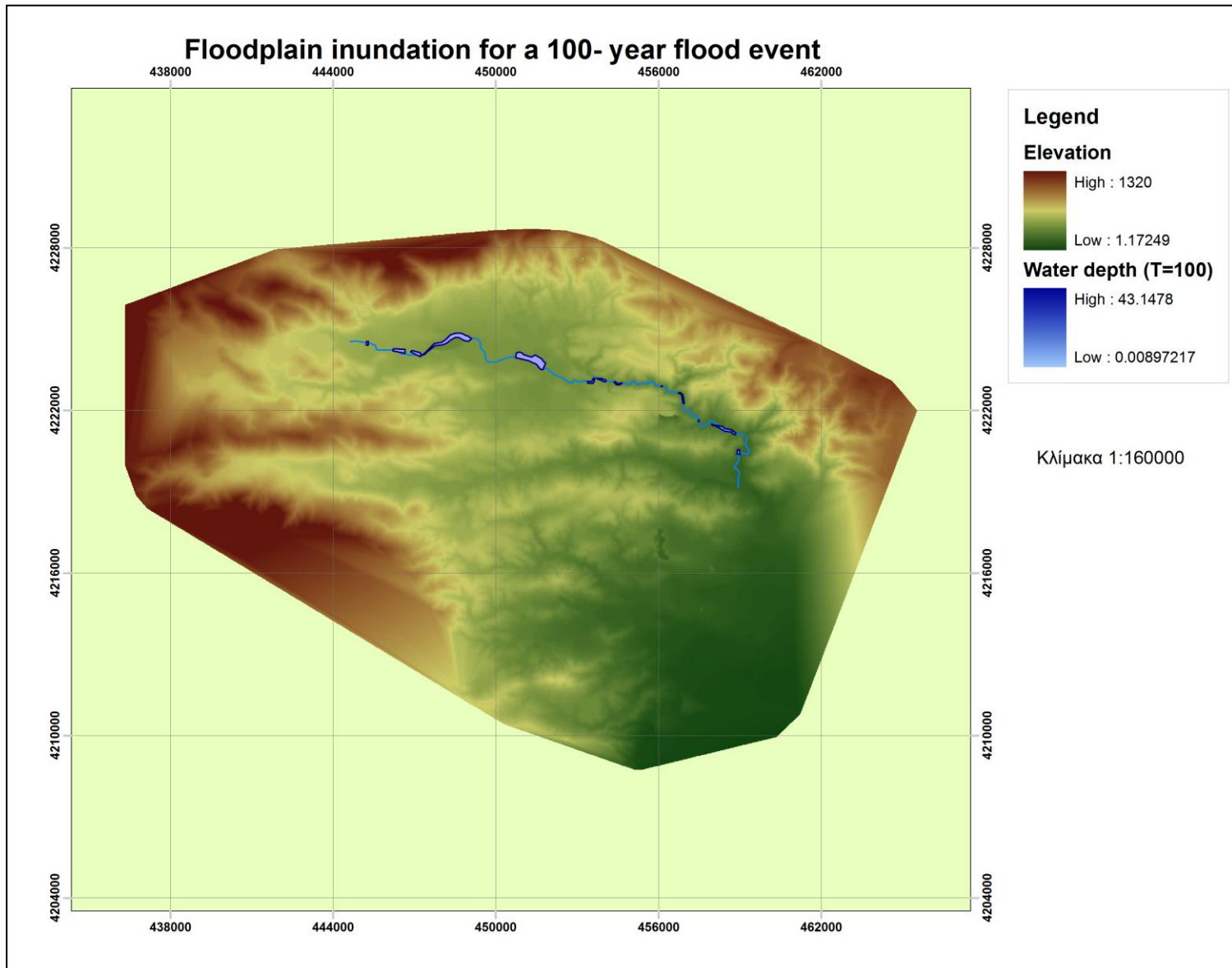
Chart 2. Comparative presentation of inundated areas.

Evaluation of the study

Floods are among the most crucial problems in the field of natural disasters management. The floodplain delineation of a basin for several flood events is of vital importance, specifically in regions where human activities, like agriculture, farming and industry flourish.

The flood hazard mapping that addresses this thesis is an essential part of the Directive 2007/60/EC on the management of flood risk. The integrated approach to the evaluation of flood affected by the flood risk mapping, which describe the adverse flood effects.

Another plan of evaluation of this thesis could be the examination of the other methods for computation of rainfall losses and direct runoff which provides the HEC-HMS program.



Map 1. Floodplain inundation for a 100 year flood event

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

1.1.1. Γενικά

Οι πλημμύρες αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο που συχνά χαρακτηρίζεται ως ακραίο εξαιτίας των σοβαρών υλικών ζημιών και των ανθρώπινων απωλειών.

Ένας από τους πιο δόκιμους ορισμούς για την πλημμύρα είναι ο εξής: «η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό» (άρθρο 2, Οδηγία 2007/60/ΕΚ).

Οι πλημμύρες θεωρούνται ως η δεύτερη πιο συχνή αιτία καταστροφών μετά τις δασικές πυρκαγιές. Οι βασικές αιτίες των πλημμυρών είναι (Λέκκας, 2009):

- Τοπικές, παρατεταμένες βροχοπτώσεις
- Τήξη χιονιού (εποχιακές πλημμύρες)
- Θραύση φράγματος
- Υπερχείλιση ποταμού
- Εισροή της θάλασσας (παλιρροιακά κύματα, τσουνάμι)

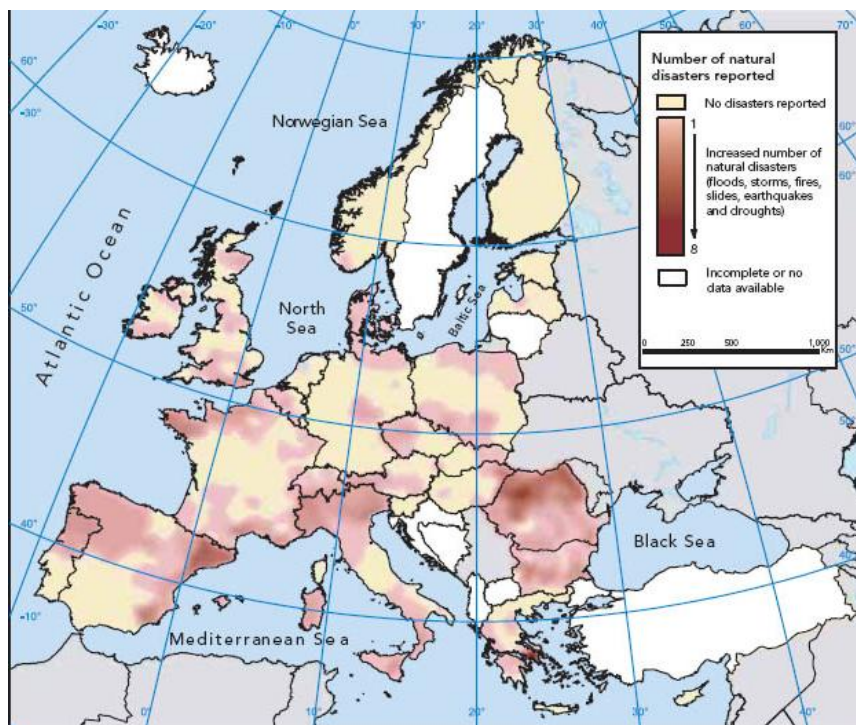
Η κατάταξη των πλημμυρών σε κατηγορίες δεν είναι εύκολη υπόθεση εξαιτίας των πολυποίκιλων αιτιών που μπορούν να τις προκαλέσουν και των παραγόντων, που επηρεάζουν την εξέλιξη τους, όπως είναι ο τόπος και η διάρκεια τους. Ανάλογα λοιπόν με το χώρο που λαμβάνουν χώρα, τις αιτίες πρόκλησης τους και τις επιπτώσεις τους διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες.

Πίνακας 1.1. Κατηγορίες πλημμυρών, αιτίες πρόκλησης και επιπτώσεις (Πηγή: EXCIMAP, 2007).

Τύπος πλημμύρας	Αιτίες πλημμύρας	Επιπτώσεις πλημμύρας	Σχετικές παράμετροι
Πλημμύρα ποταμών	Έντονη βροχόπτωση ή λιώσιμο χιονιού Απόφραξη λόγω πάγου Κατάρρευση αναχωμάτων ή άλλων έργων προστασίας	Στάσιμα νερά ή νερά σε ροή εκτός της κύριας κοίτης του ποταμού	Έκταση (σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισης) Βάθος νερού Ταχύτητα νερού Διάδοση πλημμύρας
Παράκτια πλημμύρα	Πλημμύρα λόγω καταιγίδας Τσουνάμι Παλιρροϊκό κύμα	Στάσιμα νερά ή νερά σε ροή πίσω από την ακτογραμμή Υφαλμύριση αγροτικών εκτάσεων	Ομοίως με παραπάνω
Ορεινοί χείμαρροι	Ξαφνική καταιγίδα Υπερχείλιση λίμνης Ασταθής κλίση του υδροκρίτη Ροή φερτών υλών	Πρόσχωση περιοχών με νερό και ιζήματα Διάβρωση κατά μήκος της κύριας κοίτης του ποταμού	Ομοίως με παραπάνω Εναπόθεση ιζημάτων
Στιγμιαίες πλημμύρες στη Μεσόγειο από εφήμερα ρέματα	Ξαφνική καταιγίδα	Πρόσχωση περιοχών με νερό και ιζήματα Διάβρωση κατά μήκος της κύριας κοίτης του ποταμού	Ομοίως με παραπάνω
Πλημμύρα υπόγειων υδροφορέων	Υψηλή στάθμη νερού σε παρακείμενα υδάτινα σώματα	Στάσιμα νερά στην πλημμυρική κοίτη (μεγάλη διάρκεια πλημμύρας)	Έκταση (σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισης) Βάθος νερού
Πλημμύρα σε λίμνη	Σταδιακή αύξηση της στάθμης ανάλογα με την εισερχόμενη παροχή	Στάσιμα νερά πίσω από την ακτογραμμή	Ομοίως με παραπάνω

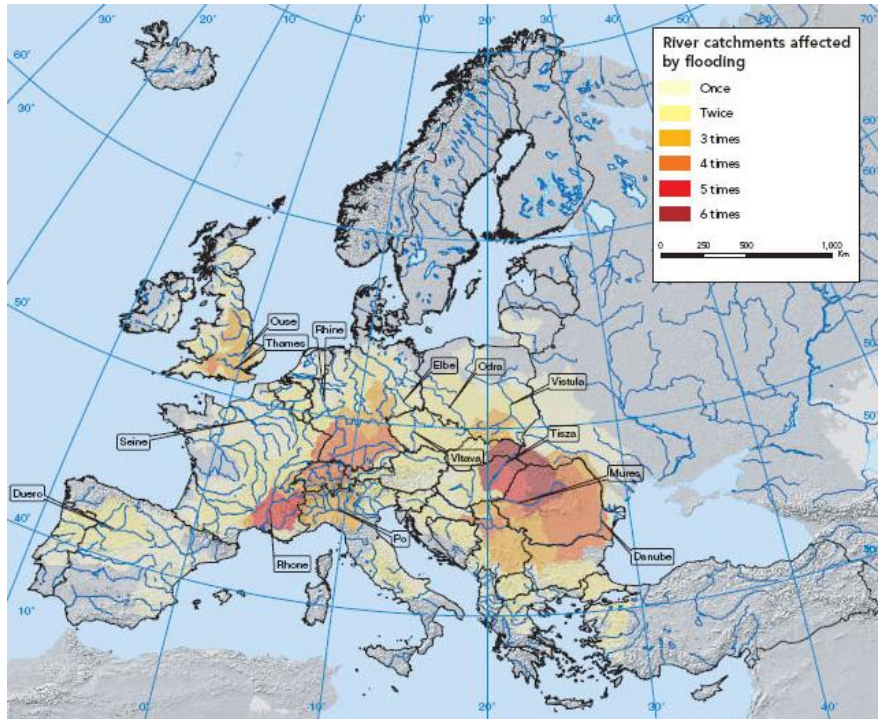
Όσον αφορά στις επιπτώσεις των πλημμυρών, σημαντικές είναι οι ζημιές που προκαλούν τόσο σε οικονομικό επίπεδο, όσο και σε απώλειες ζωών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, μεταξύ του 1998 και 2002 σημειώθηκαν στην Ευρώπη περισσότερες από 100 μεγάλες, ζημιογόνες πλημμύρες, συμπεριλαμβανομένων των καταστρεπτικών πλημμυρών στον Έλβα και στο Δούναβη το 2002. Από το 1998, οι πλημμύρες αυτές έχουν επιφέρει το θάνατο 700 ανθρώπων, την αναγκαστική μετακίνηση σχεδόν μισού εκατομμυρίου ατόμων και τουλάχιστον 25 δισεκατομμύρια ευρώ σε οικονομικές απώλειες. Επιπλέον, ο αριθμός των ανθρώπων που έχει επηρεαστεί από τις πλημμύρες αγγίζει το 1,5% του πληθυσμού της Ευρώπης (EEA, 2003).

Σύμφωνα με το *Χάρτη 1.1.*, οι χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης είναι αυτές που υπέστησαν τα περισσότερα πλημμυρικά φαινόμενα στο χρονικό διάστημα 1998-2002.



Χάρτης 1.1. Οι μεγαλύτερες πλημμύρες που έλαβαν χώρα στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1998-2002 (Πηγή: EEA, 2003)

Στο *Χάρτη 1.2.* απεικονίζεται η συχνότητα πλημμυρικών επεισοδίων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1998-2002.

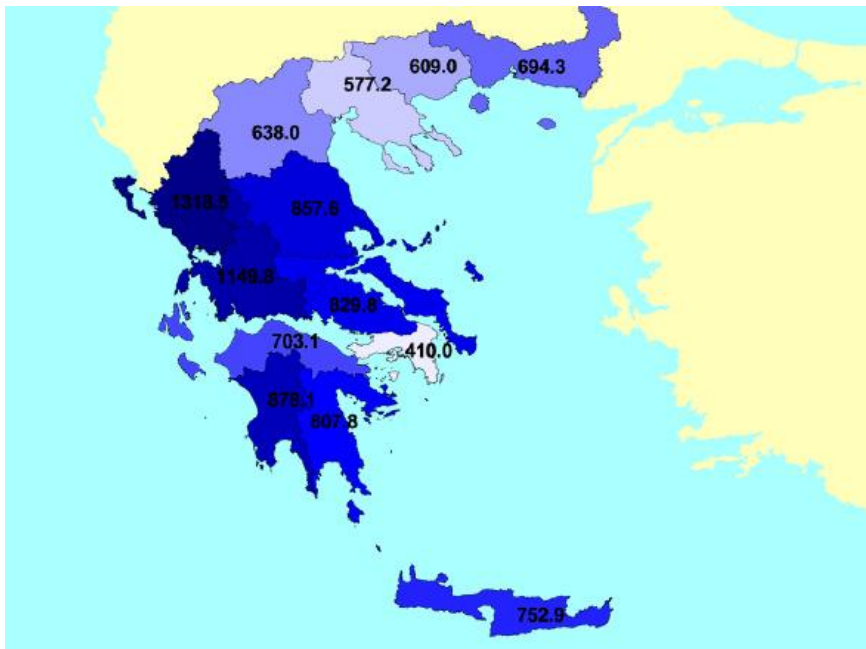


Χάρτης 1.2. Συχνότητα πλημμυρικών φαινομένων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1998-2002 (Πηγή: EEA, 2003).

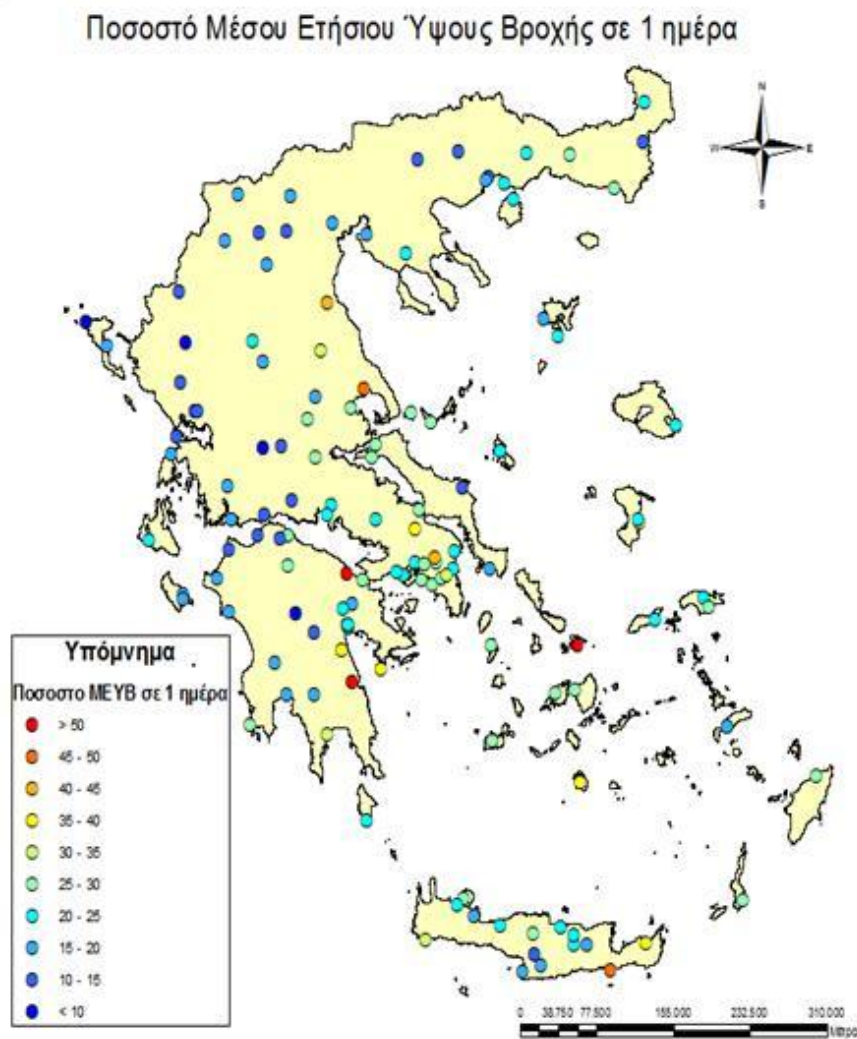
1.1.2. Πλημμύρες: τι συμβαίνει στην Ελλάδα

Η εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στην Ελλάδα είναι κυρίως απόρροια της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας (Ράμπιας, 2007). Σε αυτήν την κατεύθυνση η οροσειρά της Πίνδου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και αποτελεί ένα «υδρολογικό σύνορο», μιας και η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800 mm ενώ στα Ανατολικά το αντίστοιχο μέγεθος είναι περίπου 400 mm. Στην *Εικόνα 1.1.*, παρατίθενται οι μέσες υπερετιήσιες βροχοπτώσεις ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα για το διάστημα 1960-1990.

Ωστόσο, η παρατήρηση σχετικά με την ανομοιομορφία των βροχοπτώσεων δεν συμβαδίζει και με την αντίστοιχη εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στο ανατολικό και δυτικό μέρος της χώρας. Συνεπώς, παρότι οι βροχοπτώσεις στα δυτικά είναι κατά περίπου τρεις φορές μεγαλύτερες απ' ό,τι στα ανατολικά, οι πλημμυρικές απορροές στα ανατολικά είναι κατά πολύ συχνότερες (Γκιόκας, 2009). Αυτό συμβαίνει, όπως αποδεικνύεται και στο *Χάρτη 1.3.*, από τα ποσοστά μέσου ετήσιου βροχομετρικού ύψους σε μια ημέρα. Συγκεκριμένα, συναντώνται μεγαλύτερα ημερήσια ύψη βροχής στα ανατολικά (βλ. Αττική) από ότι στα δυτικά, γεγονός που εξηγεί τη συχνότητα των πλημμυρικών απορροών στα μέρη αυτά. Εξάλλου, η πλημμύρα, ως επί το πλείστο προκαλείται από μεγάλα ύψη βροχής σε μικρό χρόνο.



Εικόνα 1.1. Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα (Πηγή: <http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>).



Χάρτης 1.3. Ποσοστά μέσου ετήσιου ύψους βροχής σε μια μέρα, ανά την Ελλάδα (Πηγή: Φαρμακάκη, 2012).

1.1.3. Το θεσμικό πλαίσιο για τις πλημμύρες

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου του 2007, την Οδηγία 2007/60/EK για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η οδηγία τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου του 2007.

Ο σκοπός της οδηγίας είναι, η θέσπιση ενός πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των δυσμενών συνεπειών της, στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στην οικονομική ανάπτυξη (άρθρο 1, 2007/60/EK).

Οι βασικοί άξονες διαχείρισης του κινδύνου πλημμύρας σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία είναι:

- Η πρόληψη.
- Η προστασία.
- Η ετοιμότητα.
- Η αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.
- Η αποκατάσταση και η εξαγωγή διδαγμάτων.

Τα βήματα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK περιλαμβάνουν αρχικά την *προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας*. Στη συνέχεια ακολουθεί η κατάρτιση *χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας* (flood hazard) και *χαρτών κινδύνων πλημμύρας* (flood risk), πάντα σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Τέλος, εκπονούνται *σχέδια διαχείρισης* για κάθε λεκάνη απορροής.

Στο πρώτο στάδιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK, στην *προκαταρκτική αξιολόγηση*, τα Κράτη Μέλη υποχρεούνται να προσδιορίσουν τις περιοχές που είναι επιρρεπείς στην εμφάνιση πλημμυρικών συμβάντων, ώστε να προκαταλάβουν τις δυσμενείς επιπτώσεις τους (άρθρο 4-5, παρ.1). Ουσιαστικά, καταγράφονται τα περιγραφικά δεδομένα ιστορικών πλημμυρών με τις αντίστοιχες συνέπειες τους και γίνεται μια αξιολόγηση δυνητικών αρνητικών συνεπειών μελλοντικών πλημμυρών, με βάση στοιχεία όπως η τοπογραφία, η θέση και τα όρια των υδατορευμάτων, τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων αντιπλημμυρικών έργων, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυνητικές εξελίξεις (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011).

Όσον αφορά στην εκπόνηση χαρτών επικινδυνότητας και κινδύνων πλημμύρας, οι πρώτοι καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια (άρθρο 6, παρ.3):

- Πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων.
- Πλημμύρες μέσης πιθανότητας με πιθανή περίοδο επαναφοράς ≥ 100 χρόνια.

- Πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση.

Για κάθε τέτοιο σενάριο θα πρέπει να παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

- Η έκταση της πλημμύρας.
- Το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση.
- Η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων ανάλογα με την περίπτωση.

Οι *χάρτες κινδύνων πλημμύρας* περιγράφουν τις δυσμενείς επιπτώσεις των πλημμυρών που συνδέονται με τα σενάρια της παραπάνω παραγράφου. Οι επιπτώσεις αυτές εκφράζονται ως εξής (άρθρο 6, παρ. 5):

- Ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν.
- Τύπος οικονομικής δραστηριότητας της περιοχής που πιθανώς να πληγεί.
- Εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και οι προστατευόμενες περιοχές που ενδέχεται να πληγούν.
- Άλλες πληροφορίες για ενέργειες που κρίνονται από τα Κράτη Μέλη ότι θα προκαλέσουν πιθανή φθορά στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η επισήμανση των περιοχών που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων, πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες πηγές ρύπανσης.

Στο τελικό στάδιο εφαρμογής της οδηγίας εκπονούνται τα *σχέδια διαχείρισης* για κάθε λεκάνη απορροής. Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας συντάσσονται από τα Κράτη Μέλη, με βάση τους *χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας* και τους *χάρτες κινδύνων πλημμύρας*, για τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν δυνητικοί, σοβαροί κίνδυνοι εμφάνισης πλημμύρας. Ουσιαστικά, περιλαμβάνονται μέτρα για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων, όπως είναι ο περιορισμός των δυσάρεστων, επιζήμιων αποτελεσμάτων που έχουν οι πλημμύρες στην ανθρώπινη υγεία, στην πολιτιστική κληρονομιά, στο περιβάλλον και στην οικονομική δραστηριότητα (άρθρο 7, παρ.2). Σημειώνεται επίσης, ότι τα Κράτη Μέλη οφείλουν να εκπονήσουν και να δημοσιεύσουν τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας έως τις 22 Δεκεμβρίου του 2015, στη συνέχεια επανεξετάζονται και ενημερώνονται το αργότερο μέχρι το 2021, και μετά ανά εξαετία.

Ενδεικτικά παρατίθεται το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ:

Πίνακας 1.2. Το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.

α/α	Διαδικασία	Ημερομηνία
1	Έναρξη ισχύος της Οδηγίας (άρθρο 18)	26/11/2007
2	Συμμόρφωση των Κρατών Μελών με την Οδηγία (άρθρο 17)	26/11/2009
3	Θέσπιση τεχνικών υποδειγμάτων (άρθρο 11) για: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Την προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας (άρθρο 4, παρ.4) ▪ Τους χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και τους χάρτες κινδύνων πλημμύρας (άρθρο 6, παρ.8) ▪ Τα σχέδια των κινδύνων πλημμύρας (άρθρο 7,παρ.5) 	22/12/2009 22/12/2011 22/12/2013
4	Διοικητικές ρυθμίσεις (άρθρο 3)	26/05/2010
5	Προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας (άρθρα 4 και 5)	22/12/2011
6	Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας (άρθρο 6)	22/12/2013
7	Σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας (άρθρα 7 και 8)	22/12/2015
8	Ενημέρωση του κοινού και διαβούλευση (άρθρο 9) και Οδηγία 2000/60/ΕΚ (άρθρο 14): <ul style="list-style-type: none"> ▪ Χρονοδιάγραμμα και πρόγραμμα εργασιών (άρθρο 14, παρ.1α) ▪ Ενδιάμεση επισκόπηση των σημαντικών ζητημάτων διαχείρισης των υδάτων (άρθρο 14, παρ. 1β) ▪ Αντίγραφο του προσχεδίου διαχείρισης λεκάνης απορροής (άρθρο 14, παρ.1γ) 	22/12/2012 22/12/2013 22/12/2014
9	Χρήση των υφιστάμενων εργαλείων (άρθρο 13)	22/12/2010

Πίνακας 1.2.(συνέχεια) Το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.

α/α	Διαδικασία	Ημερομηνία
10	Καταληκτικές ημερομηνίες της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Σχέδια διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Δημοσίευση ✓ Αναθεώρηση και ενημέρωση ▪ Αναθεώρηση της ανάλυσης του άρθρου 5 	22/12/2009 22/12/2015 22/12/2013
11	Επανεξέταση και επικαιροποίηση (εφόσον χρειάζεται) προκαταρκτικής αξιολόγησης κινδύνου πλημμύρας-πιθανή επίδραση κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμύρων (άρθρο 14, παρ. 1 και 4)	22/12/2018 και στη συνέχεια ανά εξαετία
12	Επανεξέταση και επικαιροποίηση (εφόσον χρειάζεται) χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας- πιθανή επίδραση κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμύρων (άρθρο 14, παρ. 2 και 4)	22/12/2019 και στη συνέχεια ανά εξαετία
13	Επανεξέταση και επικαιροποίηση (εφόσον χρειάζεται) των χαρτών κινδύνων πλημμύρας και των σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων του μέρους Β του Παραρτήματος- πιθανή επίδραση κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμύρων (άρθρο 14, παρ. 3 και 4)	22/12/2021 και στη συνέχεια ανά εξαετία

1.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Γενικά, τα μοντέλα είναι αλγόριθμοι που αναπαριστούν τη συμπεριφορά και την απόκριση ενός φυσικού συστήματος. Περιλαμβάνουν τα γνωστά στοιχεία (παράμετροι) και τα άγνωστα στοιχεία που πρέπει να προσδιοριστούν (μεταβλητές σχεδιασμού).

Ως υδρολογικό μοντέλο θεωρείται ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που σκοπό έχουν την αναπαράσταση διαφόρων υδρολογικών διεργασιών σε κατάλληλη χρονική και χωρική κλίμακα, έχοντας δεδομένα πεδίου (υδρολογικά,

γεωμορφολογικά κ.τ.λ.) και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς (Ευστρατιάδης, 2008).

Η μαθηματική αναπαράσταση ενός υδρολογικού μοντέλου θα μπορούσε να ήταν η εξής:

$$y = h(s_0, x, \theta)$$

Όπου s_0 οι αρχικές οριακές συνθήκες του φυσικού συστήματος,

x οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή φορτίσεις (βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή κ.α.),

y οι μεταβλητές εξόδου, ή αποκρίσεις του μοντέλου (επιφανειακή και υπόγεια απορροή, διαφυγές κ.α.),

θ τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, παράμετροι εξαρτώμενοι από ιδιότητες πεδίου.

Τα δεδομένα εισόδου (μεταβλητές) σε ένα μοντέλο δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών και αναπαριστούν διεργασίες σε συγκεκριμένη θέση ή περιοχή μιας λεκάνης. Πιθανά λάθη στις μετρήσεις αλλά και ελλιπείς πληροφορίες οδηγούν σε μοντελοποιήσεις είτε για τη συμπλήρωση στοιχείων είτε για μελλοντικές προβλέψεις.

Τα υδρολογικά μοντέλα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με:

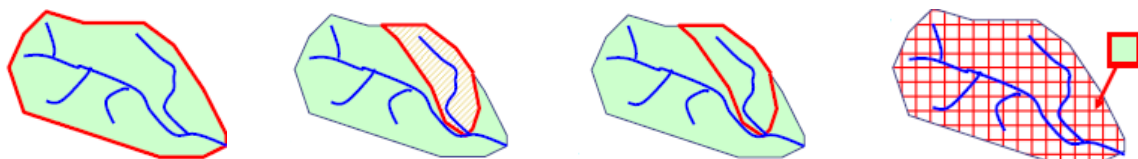
- το πεδίο εφαρμογής τους
- τη χωρική τους κλίμακα
- τη μαθηματική τους δομή
- τη χρονική τους διακριτότητα.

Το πεδίο εφαρμογής:

Τα πεδία εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι τα εξής (Ευστρατιάδης, 2008):

- Εκτίμηση επιφανειακού και υπόγειου υδατικού δυναμικού.
- Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών (πλημμυρογραφήματα, παροχές αιχμής κ.α.).
- Εκτίμηση επιπτώσεων εξαιτίας αλλαγών στις χρήσεις γης, στα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (αστικοποίηση, αποψίλωση, διευθετήσεις ποταμών).
- Πρόγνωση υδρολογικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο.

Η χωρική κλίμακα:



1. Αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά (lumped): Κοινές φορτίσεις, κοινές παράμετροι για όλη τη λεκάνη απορροής.
2. Ημικατανεμημένα (semi-distributed): Διαφορετικές φορτίσεις και παράμετροι ανά χωρική ενότητα.
3. Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped): Διαφορετικές φορτίσεις αλλά κοινές παράμετροι ανά χωρική ενότητα.
4. Κατανεμημένα (distributed): Κατάτμηση σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες.

Η μαθηματική δομή:

Πίνακας 1.3. Κατηγορίες μοντέλων ανάλογα με τη μαθηματική δομή (Πηγή: Ευστρατιάδης, 2008).

	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
Μοντέλα φυσικής βάσης	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνον σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά μοντέλα	Παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των "μακροσκοπικών" χαρακτηριστικών της λεκάνης
Στατιστικά-Στοχαστικά μοντέλα	Σχέσεις που αναπαράγουν τη στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη στατιστική συνέπεια
Μοντέλα μαύρου κουτιού	Διαδοχικοί μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος	Απολύτως καμία

Η χρονική διακριτότητα:

Η χρονική διακριτότητα είναι άμεσα εξαρτώμενη από το σκοπό του μοντέλου. Για παράδειγμα, σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

1.2.1. ΤΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-HMS

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο που σχεδιάστηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού για την προσομοίωση των διεργασιών βροχόπτωσης-απορροής σε λεκάνες απορροής με δενδροειδή μορφή. Εφαρμόζεται τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες απορροής όσο και σε μικρές αστικές ή ημιαστικές λεκάνες. Τα υδρογραφήματα που παράγονται από το μοντέλο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες:

- Διαθεσιμότητας υδατικών πόρων.
- Συνέπειες μελλοντικής αστικοποίησης λεκάνης απορροής.
- Πρόγνωσης πλημμυρών.
- Σχεδιασμούς αντιμετώπισης καταστροφών από πλημμύρες.
- Διευθέτηση περιοχής κατάκλυσης πλημμύρας.
- Σχεδιασμός υπερχειλιστών φραγμάτων.

Στο πρόγραμμα αυτό, ένα μοντέλο λεκάνης κατασκευάζεται με το διαχωρισμό του υδρολογικού κύκλου σε επιμέρους μέρη με δυνατότητα επεξεργασίας του καθενός χωριστά. Κάθε συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου αναπαρίσταται με ένα μαθηματικό μοντέλο. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετές οι επιλογές του χρήστη για την προσομοίωση της κάθε συνιστώσας. Η επιλογή για την εφαρμογή της πιο κατάλληλης μεθόδου, είναι απόρροια της γνώσης του φυσικού συστήματος, των στόχων της υδρολογικής μελέτης καθώς και της κρίσης και της εμπειρίας του ερευνητή (Fleming and Scharffenberg, 2010).

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει μία βάση δεδομένων, η οποία δέχεται δεδομένα εισόδου και εξάγει αποτελέσματα με χρήση διάφορων ενσωματωμένων εργαλείων. Στην παρούσα εργασία, δίνονται συγκεκριμένα επεισόδια βροχής για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς ($T=20$, $T=100$, $T=1000$) στην περιοχή μελέτης με τελικά εξαγόμενα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού.

Τα βασικά μέρη είναι το μοντέλο λεκάνης απορροής όπως έχει σχηματοποιηθεί στο HEC-GeoHMS, και το μετεωρολογικό μοντέλο. Το μοντέλο λεκάνης απορροής απεικονίζει τα υδρολογικά στοιχεία συνδέοντας τα σε ένα δενδροειδές δίκτυο, με τη διαδικασία υπολογισμού να ξεκινά από τα ανάντη προς τα κατόντη. Στο πρόγραμμα διατίθενται διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής ροής και της διόδευσης πλημμύρας.

Ο χρήστης επιλέγει ποιο μαθηματικό πρότυπο θα χρησιμοποιήσει δεδομένου των συνθηκών και των διαθέσιμων στοιχείων.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα μαθηματικά πρότυπα των παραπάνω διεργασιών:

Εκτίμηση Απωλειών:

- Initial constant (δείκτης ϕ)
- SCS Curve Number
- Gridded SCS Curve Number
- Exponential (εκθετική συνάρτηση του χρόνου)
- Green-Ampt.

Υπολογισμός Επιφανειακής Απορροής: Μοναδιαίο Υδρογράφημα

- Snyder
- SCS
- Οριζόμενο από το χρήστη

Βασική Ροή:

- Recession method (εκθετικά μειούμενη)
- Σταθερή ροή
- Linear reservoir method (εκφόρτιση διηθούμενου νερού στο υδατόρευμα με διατήρηση μάζας)

Διόδευση:

- Lag method (μέθοδος καθυστέρησης – όχι εξασθένιση πλημμυρικού κύματος)
- Muskingum
- Κινηματικό κύμα
- Muskingum-Cunge

Το πρόγραμμα σε γενικές γραμμές θεωρείται εύχρηστο, με αρνητικό σημείο ότι στην περίπτωση ύπαρξης λαθών ή προβλημάτων κατά τον υπολογισμό δεν υπάρχει σαφής καθοδήγηση για την επίλυση τους, παρά μόνο η παρουσία μηνυμάτων-σφαλμάτων. Ακόμα, προβλήματα παρουσιάστηκαν κατά την εισαγωγή των δεδομένων από το υπολογιστικό φύλλο excel, (με αντιγραφή και επικόλληση), όπου δεν αναγνωριζόταν το κόμμα ως διαχωριστικό των δεκαδικών ψηφίων, και στον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που δεχόταν το πρόγραμμα. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής των δεδομένων μέσω ενδιάμεσης επεξεργασίας σε λογισμικό HEC-DSSVue. Τα αρχεία που εισάγονται στο HMS πρέπει να είναι σε format .dss, κάτι το οποίο προκύπτει από κατάλληλη διαμόρφωση των πεδίων στο excel και μέσω ειδικής εφαρμογής, μετατραπούν στο συμβατό format. Ωστόσο, αυτή η εφαρμογή δεν ήταν εφικτή στην παρούσα εργασία, επομένως η εισαγωγή των δεδομένων έγινε χειροκίνητα.

1.3. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη περιγραφή της υδρολογικής προσομοίωσης λεκάνης απορροής ποταμού, της μετέπειτα υδραυλικής προσομοίωσης τμήματος υδατορεύματος και τελικά, η εξαγωγή χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας .

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι, η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου Ελευσίνας. Η επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε συνδυαστικά σε περιβάλλον ArcGis (HEC-GeoHMS), και στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS ομοίως, η υδραυλική ανάλυση αρχικά ξεκίνησε σε περιβάλλον ArcGis (HEC-GeoRAS) και ολοκληρώθηκε στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS.

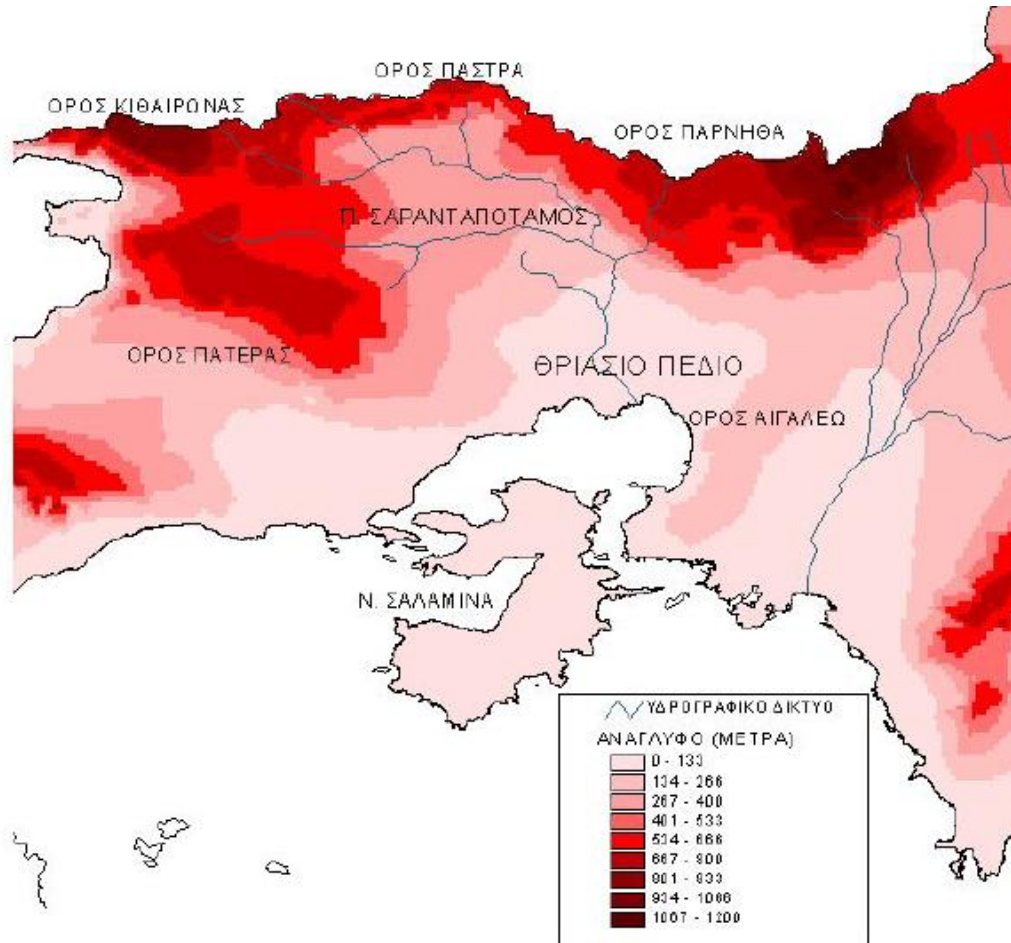
Συγκεκριμένα, μετά την παρουσίαση της περιοχής μελέτης στο δεύτερο κεφάλαιο, ακολουθεί η ανάλυση της προεπεξεργασίας των γεωγραφικών δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου και τη χάραξη υπολεκανών απορροής (HEC-GeoHMS), και στη συνέχεια, η τελική επεξεργασία αυτών στο μοντέλο HEC-HMS, με αποτέλεσμα την υδρολογική απόκριση των υπολεκανών απορροής της περιοχής μελέτης υπο τη μορφή υδρογραφημάτων (Κεφάλαιο 3).

Ακολούθως, πραγματοποιείται η επεξεργασία επιλεγθέντος τμήματος του ποταμού (HEC-GeoRAS) για τη δημιουργία γεωμετρικού αρχείου το οποίο τελικά εισάγεται στο πρόγραμμα HEC-RAS, όπου σε συνδυασμό με το υδρολογικό αρχείο που παρήχθη από την υδρολογική προσομοίωση, εκτελείται η μονοδιάστατη υδραυλική ανάλυση σε συνθήκες μόνιμης ροής (Κεφάλαιο 4). Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται για ένα παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης, διάρκειας τεσσάρων ημερών (06/02/2012-10/02/2012), με την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 5).

Τέλος, ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της υδρολογικής και της υδραυλικής προσομοίωσης, εξάγεται σε περιβάλλον ArcGIS-HEC-GeoRAS, έτσι ώστε παράγονται τελικά, οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης και πιεζομετρικών βαθμών.

2

Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Εικόνα 2.1. Η περιοχή του Θριάσιου πεδίου (Πηγή: Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2001)

2.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΓΕΝΙΚΑ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη Δυτική Αττική και συγκεκριμένα στην περιοχή του Θριάσιου πεδίου. Περιβάλλεται από τους ορεινούς όγκους, Πατέρα, Κιθαιρώνα, Πάστρα, Πάρνηθα και από το όρος Αιγάλεω (Εικόνα 2.1.). Περιμετρικά, εντοπίζονται αρκετά ρέματα. Η περιοχή έχει εξελιχθεί σε μια καθαρά βιομηχανική ζώνη, με έντονο το φαινόμενο της αστικοποίησης. Τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα είναι της Ελευσίνας, του Ασπρόπυργου, της Μάνδρας και της Μαγούλας (ΟΡΣΑ, 2011).

Το κύριο υδατόρευμα της περιοχής είναι ο Σαρανταπόταμος ή Ελευσίνιος Κηφισός, όπως ονομαζόταν κατά την αρχαιότητα. Ο Σαρανταπόταμος είναι το μεγαλύτερο ποτάμι της περιοχής καθώς σε αυτό καταλήγουν οι απορροές από τους τριγύρω ορεινούς όγκους. Διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και του Θριάσιου πεδίου και εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας.

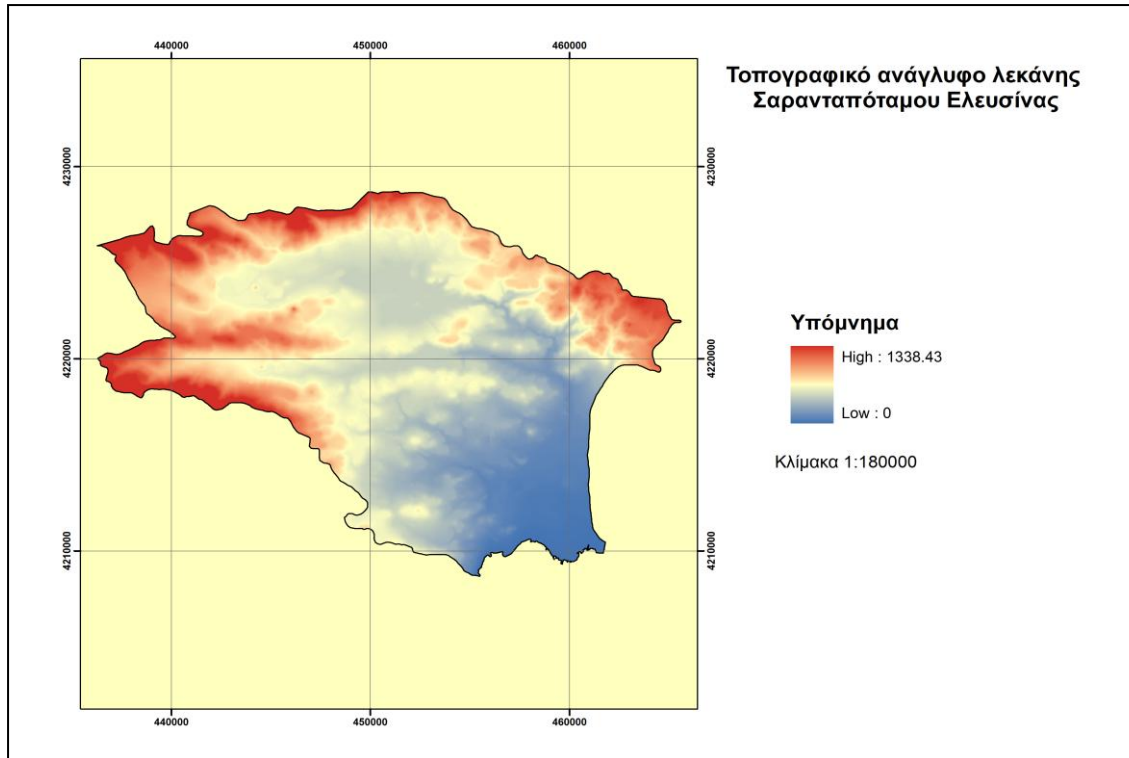
Ουσιαστικά (Εικόνα 2.1.), ο Σαρανταπόταμος διακλαδίζεται πριν την είσοδο του στο Θριάσιο πεδίο σε δύο βασικούς παραπόταμους με διεύθυνση ροής από δυτικά προς ανατολικά. Ο βόρειος κλάδος διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης, ξεκινώντας από το όρος Κιθαιρώνας και ο άλλος κλάδος, το ρέμα Αγ. Γεώργιος, ξεκινά από τον ορεινό όγκο Πατέρα, διασχίζοντας νοτιότερα την ομώνυμη κοιλάδα.

Η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, έκτασης 335 km², ορίζεται ανατολικά από το όρος της Πάρνηθας, βόρεια το όρος Πάστρα, βορειοδυτικά τον Κιθαιρώνα, και νοτιοδυτικά από το ορεινό όγκο Πατέρα. Η κύρια πηγή του βρίσκεται στο όρος Κιθαιρώνα και οι σημαντικότεροι χείμαρροι που συμβάλλουν στο ποτάμι είναι τα ρέματα Αγ. Βλάσιος, Ξηρόρεμα και Μεγάλο Κατερίνι (ΟΡΣΑ, 2011).

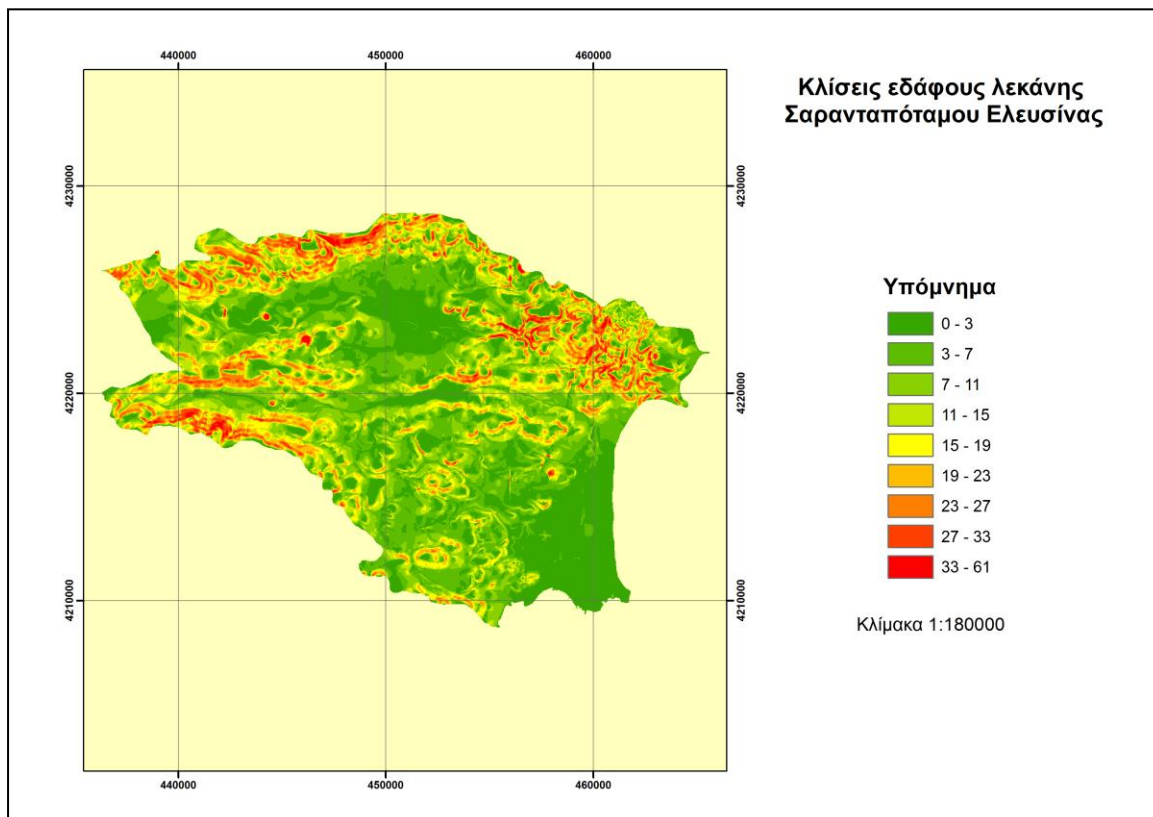
2.2.ΦΥΣΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Σε ό,τι αφορά το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής, το υψόμετρο της λεκάνης απορροής κυμαίνεται από 0 έως 1338 m, με μέσο υψόμετρο στα 400 m. Συνδυάζοντας το τοπογραφικό ανάγλυφο με τις κλίσεις γης (Χάρτης 2.2.), παρατηρούνται ήπιες κλίσεις στο κέντρο της λεκάνης μελέτης και εντονότερες κλίσεις προς το νοτιότερο μέρος της περιοχής. Η μέση κλίση είναι περίπου 10 m, με τη μέγιστη κλίση να φτάνει στα 61 m.

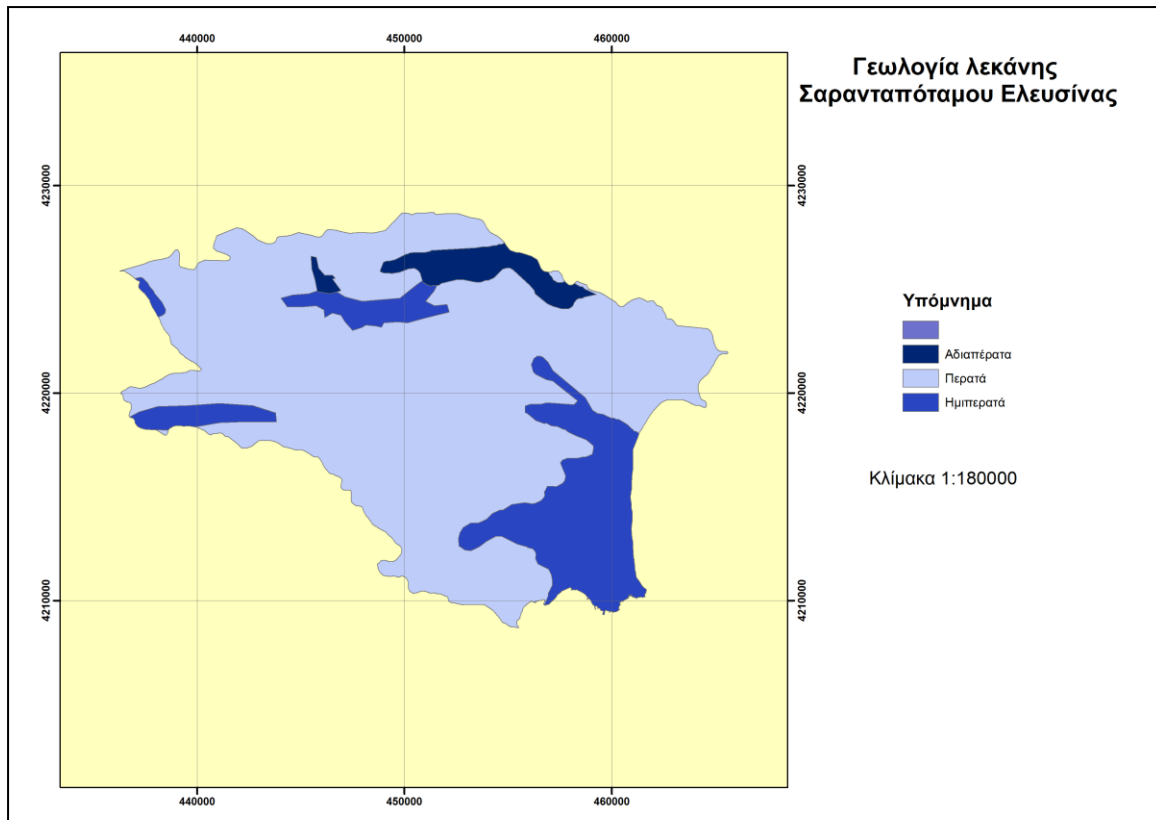
Όσο αφορά στην υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης, οι εδαφικοί τύποι που εμφανίζονται είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό υψηλής περατότητας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης καταλαμβάνουν τη μικρότερη περιοχή, και αμέσως μετά ακολουθούν τα ημιπερατά εδάφη, με μικρούς ή μεσαίους ρυθμούς διήθησης (βλ. Χάρτης 2.3.). Τέλος, στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε ένας γενικός διαχωρισμός των χρήσεων γης σε πέντε κατηγορίες, ήτοι, καλλιέργειες, λιβάδια, δάση, αστική περιοχή και δρόμοι (βλ. Κεφάλαιο 3, Πίνακας 3.2.). Ακολουθεί ο Χάρτης 2.4., όπου παρουσιάζονται οι εν λόγω γενικευμένες κατηγορίες χρήσεων γης, ομοίως και ο Πίνακας 2.3. που αποδίδει τα ποσοστά έκτασης των παραπάνω κατηγοριών.



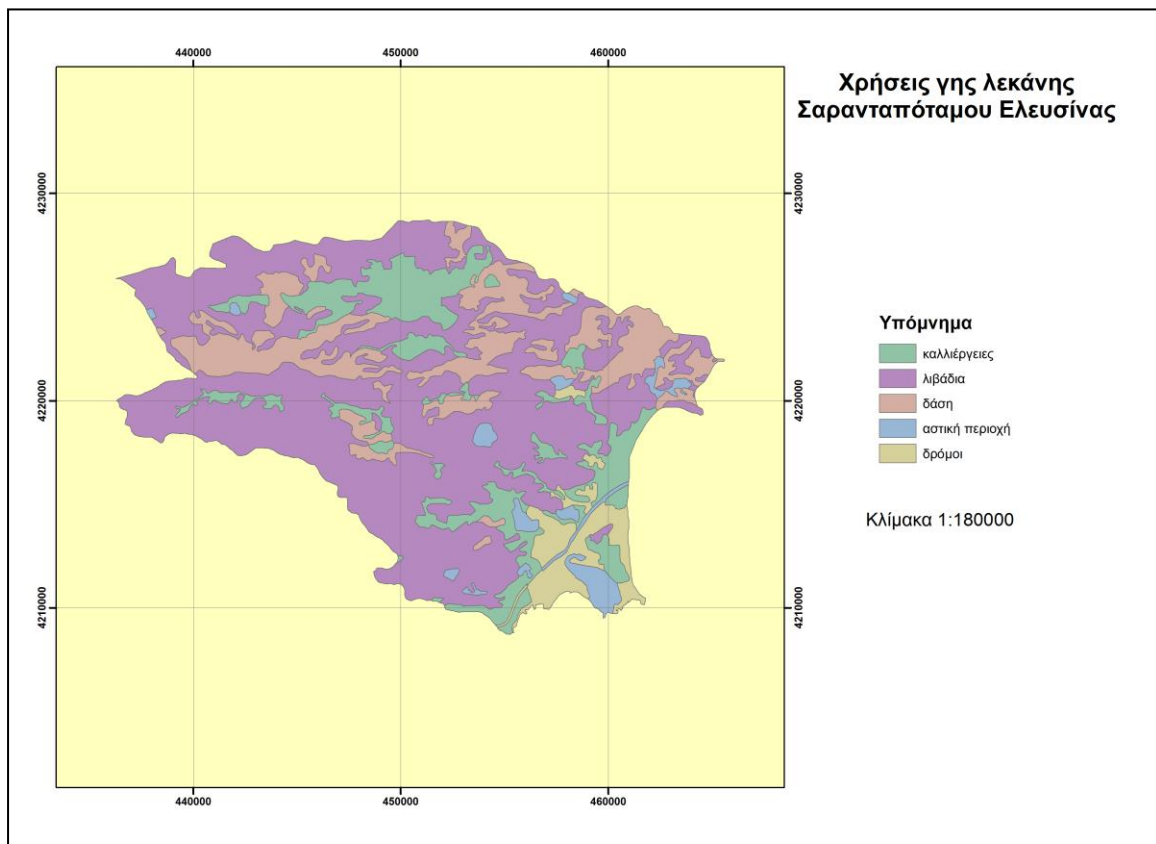
Χάρτης 2.1. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου.



Χάρτης 2.2. Κλίσεις εδάφους της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου.



Χάρτης 2.3. Κατάταξη εδαφών ως προς την περατότητα.



Χάρτης 2.4. Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης σε γενικευμένες κατηγορίες.

Πίνακας 2.1. Κατηγορίες εδαφών στην περιοχή μελέτης με κριτήριο την υδατοπερατότητα.

Τύποι εδαφών	Ρυθμοί διήθησης	Ποσοστά εμφάνισης (%)
Αδιαπέρατα	πολύ μικροί	1
Περατά	μεγάλοι	66
Ημιπερατά	μικροί ή μέσοι	33

Πίνακας 2.2. Οι γενικευμένες χρήσεις γης με τα αντίστοιχα ποσοστά έκτασης που καταλαμβάνουν.

Κατηγορία	Περιγραφή	Ποσοστά έκτασης (%)
1	Καλλιέργειες	16
2	Λιβάδια	58
3	Δάση	18
4	Αστική περιοχή	3
5	Δρόμοι	5

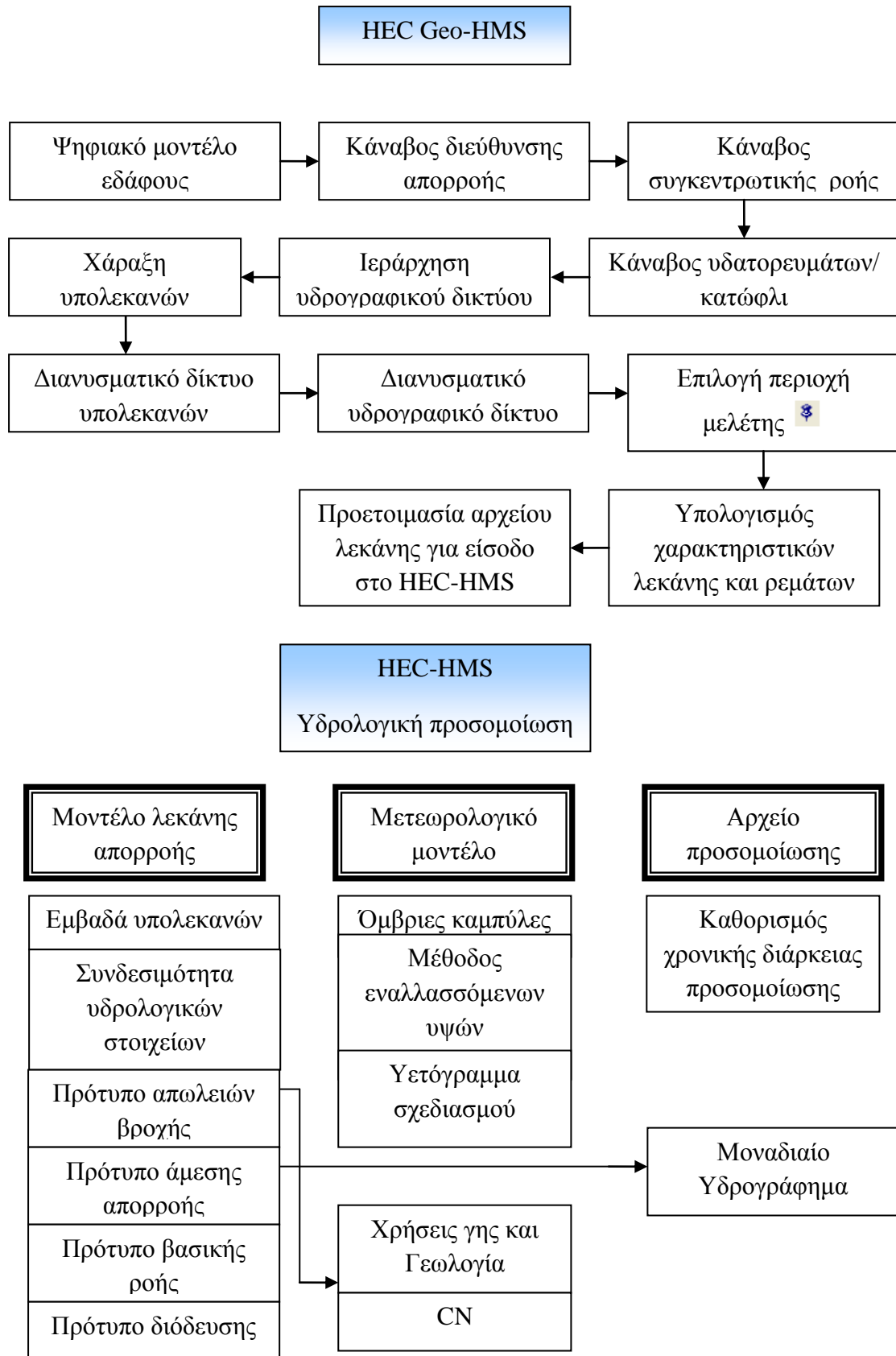
3

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε. Συγκεκριμένα, η γεωμορφολογική και η υδρολογική ανάλυση της λεκάνης μελέτης με τελικά εξαγόμενα τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς.

Η αρχική επεξεργασία για την εξαγωγή των τοπογραφικών και των υδρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού HEC-GeoHMS, μια επέκταση του προγράμματος ArcGis 9.3. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το μοντέλο λεκάνης απορροής το οποίο εισάγεται μαζί με το μετεωρολογικό μοντέλο στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί τελικώς η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης.



Σχήμα 3.1. Σχεδιάγραμμα διαδικασίας προεπεξεργασίας δεδομένων στο HEC-GeoHMS και της υδρολογικής προσομοίωσης στο HEC-HMS.

3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ HEC-GeoHMS

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε περιβάλλον ArcGis 9.3 και μέσω της επέκτασης HEC-GeoHMS στήνεται το υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης μελέτης το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στο πρόγραμμα HEC-HMS για περαιτέρω επεξεργασία. Ουσιαστικά, έχοντας σαν πρωτογενές δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σχηματοποιούνται οι λεκάνες απορροής και εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα υδρολογικά και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης μελέτης, τα αποτελέσματα των οποίων ετοιμάζονται για εισαγωγή και επεξεργασία στο HEC-HMS.

Το πρόγραμμα δημιουργεί τα εξής αρχεία εισόδου:

- ένα αρχείο χάρτη (background map file)
- ένα αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model file)
- ένα αρχείο του μετεωρολογικού μοντέλου (meteorologic model file)

Στη συγκεκριμένη εργασία δημιουργήθηκαν στο HEC-GeoHMS τα δύο πρώτα αρχεία εισόδου, ενώ το μετεωρολογικό μοντέλο δημιουργήθηκε κατευθείαν στο πρόγραμμα HEC-HMS. Το αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης. Τα όρια της λεκάνης και ο σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου μετατρέπονται σε ένα σύστημα υδρολογικών δεδομένων που αναπαριστά την απόκριση της λεκάνης στη βροχόπτωση.

Για να ξεκινήσει η επεξεργασία στο HEC-GeoHMS, απαιτείται αρχικά το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Εδώ, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε έχει κάναβο $25\text{ m} \times 25\text{ m}$. Άλλα αρχεία εισόδου για το HEC-GeoHMS είναι οι χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας, όπως παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα.

Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται στο HEC-GeoHMS είναι:

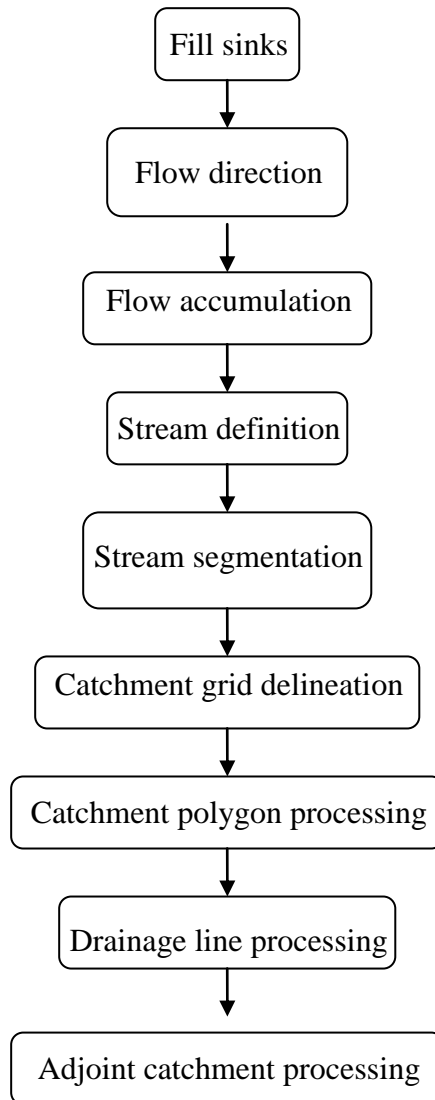
1. Η προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing).
2. Ορισμός του project που θα εισαχθεί στο HEC-HMS (HMS Project Setup).
3. Επεξεργασία της λεκάνης απορροής (Basin Processing).
4. Υπολογισμός και προσδιορισμός των υδρολογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων (Stream and Watershed characteristics).
5. Τέλος, προετοιμασία του αρχείου λεκάνης απορροής για εισαγωγή στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (HEC-HMS Model Files).

3.2.1. Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους

Στο στάδιο αυτό, έχοντας σαν αρχείο εισόδου το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και εκτελώντας με τη σειρά τις εντολές Terrain Preprocessing της εργαλειοθήκης

ArcHydro του ArcGis, υπολογίζονται υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου εδάφους με τελικό εξαγόμενο το υδρογραφικό δίκτυο με τις αντίστοιχες υπολεκάνες απορροής.

Σχηματικά οι εντολές του μενού Terrain Preprocessing είναι οι ακόλουθες:



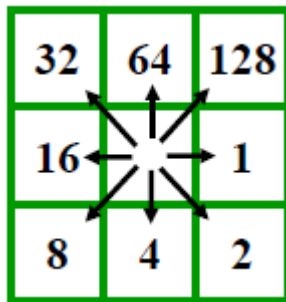
Σχήμα 3.2. Σειρά εντολών της προεπεξεργασίας του μοντέλου εδάφους

Fill sinks

Κατά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προκύπτουν ψευδή βυθίσματα στο ανάγλυφο. Ως βύθισμα, θεωρείται ένα ή περισσότερα φατνία, γύρω από τα οποία υπάρχουν φατνία με υψηλότερο υψόμετρο. Έτσι λοιπόν, διορθώνονται τα βυθίσματα ώστε το νερό να μην συγκεντρώνεται σε μικρά, διασκορπισμένα τμήματα της λεκάνης και να «μπερδεύει» τη μετέπειτα διαδικασία για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Flow direction

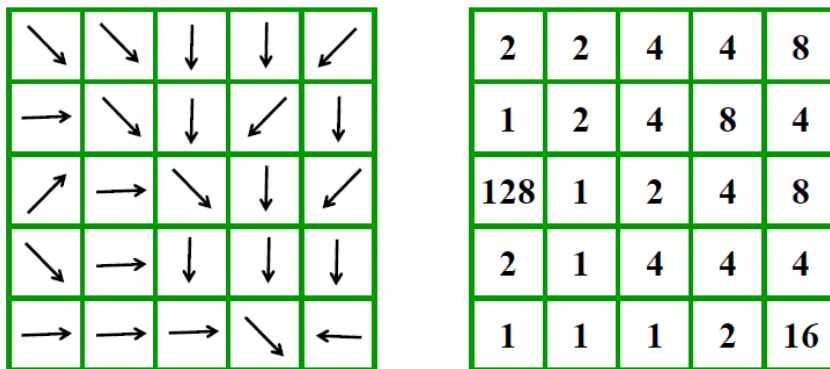
Στη συνέχεια, μετά τη διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους από τα βυθίσματα, δημιουργείται ο κানাβος διεύθυνσης απορροής. Εφαρμόζεται στον κানাβο υψομέτρου και υπολογίζει για κάθε φατνίο προς τα πού θα κατευθυνθεί η ροή. Η βασική αρχή του κανάβου απορροής είναι ότι η απορροή ξεκινά από κάθε φατνίο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα και μόνο φατνίο από τα 8 γειτονικά του, ανάλογα με την κλίση (μεγαλύτερη προς μικρότερη κλίση). Η κλίση μεταξύ 2 γειτονικών φατνίων υπολογίζεται ως η διαφορά των υψομέτρων τους διαιρεμένη με το 1, αν το εν λόγω φατνίο βρίσκεται οριζόντια ή κάθετα του αρχικού ή διαιρεμένη με το $\sqrt{2}$ αν βρίσκεται διαγώνια. Ανάλογα με τη διεύθυνση της απορροής, κάθε φατνίο παίρνει μία τιμή όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



- 1= ανατολικά, 2= νοτιοανατολικά
- 4= νότια, 8= νοτιοδυτικά
- 16=δυτικά, 32= βορειοδυτικά
- 64= βόρεια, 128= βορειοανατολικά

Σχήμα 3.3. Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Πηγή: Στάμου και Σκοπελίτη, 2009)

Έτσι, σύμφωνα με την παραπάνω κωδικοποίηση της διεύθυνσης απορροής, προκύπτει τελικά ο κানাβος διεύθυνσης απορροής:



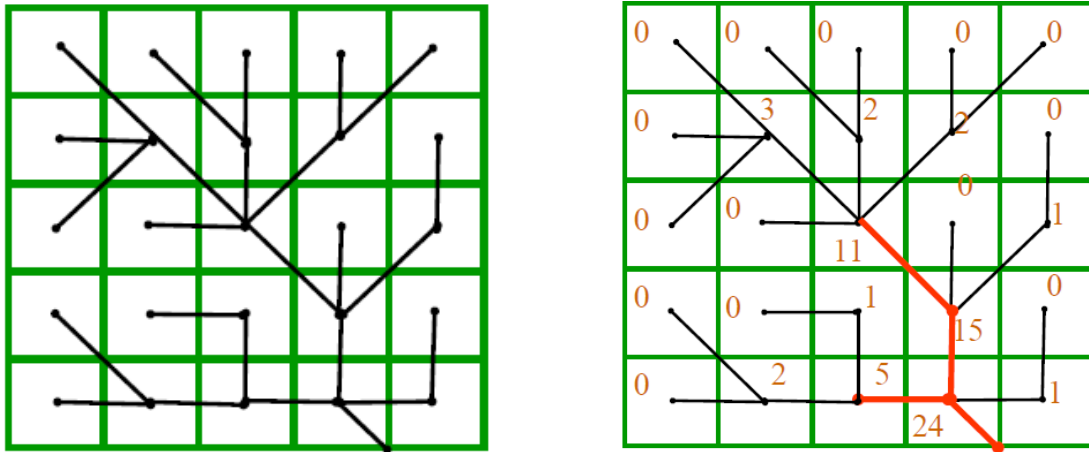
Σχήμα 3.4. Καναβος διευθύνσεων απορροής (Πηγή: Στάμου και Σκοπελίτη, 2009)

Flow accumulation

Στον κানাβο αυτό, η συγκεντρωτική ροή κάθε φατνίου ισούται με το άθροισμα των γειτονικών που απορρέουν σε αυτό. Τα φατνία συγκεντρωτικής ροής με υψηλές τιμές

αντιστοιχούν στις μιγαγγειες, ενώ αυτά με τις μηδενικές τιμές αντιστοιχούν στις κορυφογραμμές.

Ουσιαστικά, καθορίζεται ο αριθμός των ανάντη φατνίων που αποστραγγίζονται σε ένα συγκεκριμένο φατνίο. Το εμβαδόν της ανάντη περιοχής αποστράγγισης μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τον πολλαπλασιασμό της τιμής συσσώρευσης του συγκεκριμένου κατάντη κελιού με το εμβαδόν του κελιού.



Σχήμα 3.5. Κάναβος πλήθους φατνίων απορροής (Πηγή: Στάμου και Σκοπελίτη, 2009)

Stream definition

Στο σημείο αυτό δημιουργείται ένας κάναβος υδατορευμάτων έχοντας σαν εισαγόμενο τον κάναβο συγκεντρωτικής απορροής και ορίζοντας ένα κατώφλι (threshold). Το κατώφλι είναι μια ελάχιστη τιμή που ορίζεται από το χρήστη. Ουσιαστικά, επιλέγονται τα κελιά που έχουν συσσώρευση ροής μεγαλύτερη από το οριζόμενο κατώφλι. Τα επιλεγμένα κελιά ορίζουν και το υδρογραφικό δίκτυο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή που δίνεται στο κατώφλι, τόσο μικρότερο είναι το υδρογραφικό δίκτυο που παράγεται.

Stream segmentation

Με την εντολή αυτή χωρίζεται το υδρογραφικό δίκτυο σε μικρότερα τμήματα με βάση τις μεθόδους ιεράρχησης υδατορευμάτων π.χ. κατά Strahler or Shreve.

Catchment grid delineation

Η εντολή αυτή δημιουργεί υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου. Τα παραγόμενα είναι ακόμα σε μορφή κανάβου.

Catchment polygon processing

Στο σημείο αυτό, οι υπολεκάνες που παρήχθησαν στο προηγούμενο βήμα, μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή.

Drainage line processing

Η εντολή αυτή μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή κανάβου (grid) σε διανυσματική μορφή (vector).

Adjoint catchment processing


Αυτό το βήμα δεν έχει κάποια υδρολογική σημασία, είναι αναγκαίο για να βελτιώσει την υπολογιστική ισχύ του προγράμματος. Αθροίζει τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του υδατορέματος. (Doan and Fleming, 2010)

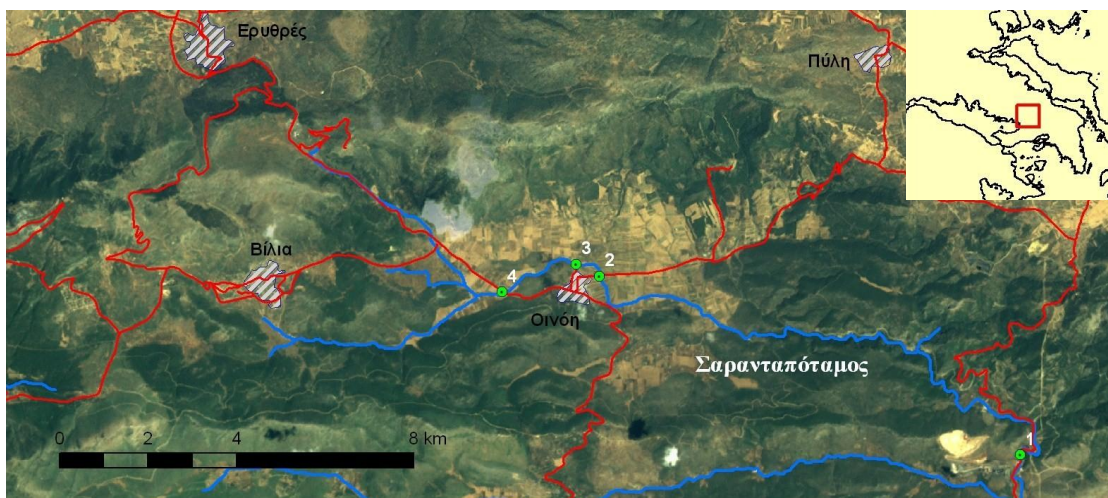
Μετά την ολοκλήρωση της σειράς αυτής των εντολών προεπεξεργασίας του μοντέλου εδάφους, ακολουθεί η προετοιμασία των αρχείων εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS, για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης.

3.2.2. Προετοιμασία αρχείων εισόδου για εισαγωγή στο HEC-HMS

Το επόμενο βήμα είναι να οριστεί η περιοχή μελέτης, στην οποία θα γίνει η περαιτέρω επεξεργασία. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια του μενού HMS Project Setup. Το μενού αυτό εξάγει τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία ενός project στο HEC-HMS. Επιλέγεται ένα σημείο εξόδου (project point) και αυτόματα μέσω μιας εντολής ορίζεται και η περιοχή μελέτης (project area) ανάντη του επιλεγμένου σημείου.

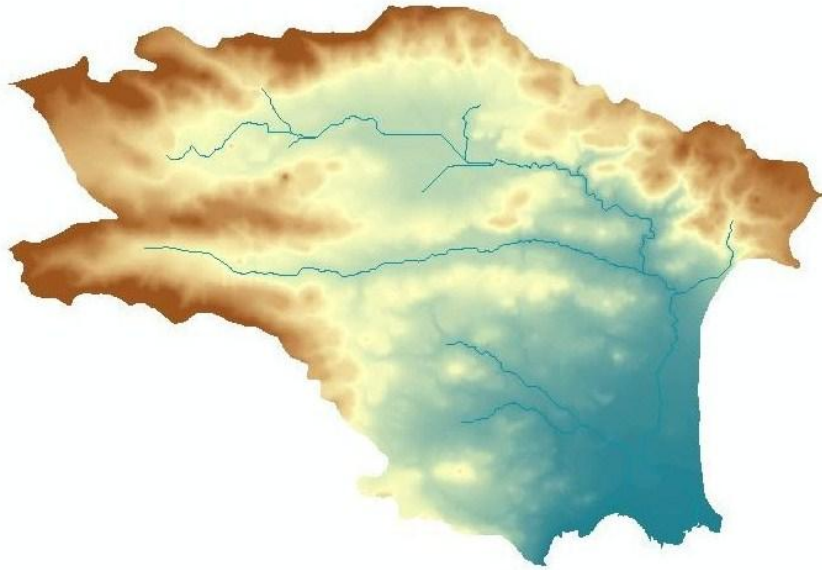
Αρχικά, επιλέγοντας την εντολή *Start a new project*, δίνεται ένα όνομα στο αρχείο της μελέτης. Έπειτα, γίνεται η αντιστοίχιση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, του κανάβου διεύθυνσης απορροής, του υδρογραφικού δικτύου, των υπολεκανών κ.λπ. μέσω της εντολής *Data Management* που βρίσκεται στο ίδιο μενού.

Στη συνέχεια, επιλέγοντας το εργαλείο *Add Project Points*  ορίζεται ουσιαστικά το σημείο εξόδου της λεκάνης και με την εντολή *Generate Project* δημιουργείται η περιοχή μελέτης ανάντη του σημείου αυτού. Η επιλογή της περιοχής έγινε με βάση τις θέσεις των σταθμών μέτρησης που έχουν τοποθετηθεί στη περιοχή.

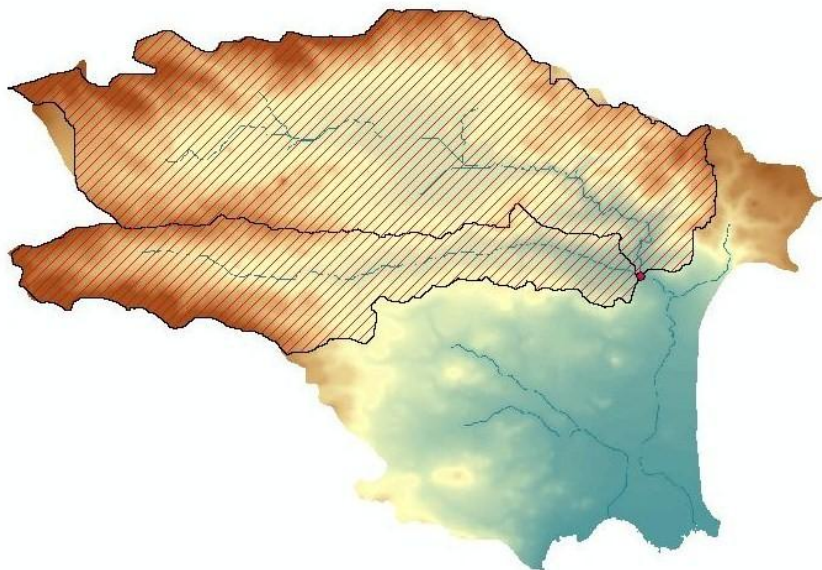


Εικόνα 3.1. Οι θέσεις των σταθμών μέτρησης στην περιοχή μελέτης.

Έτσι, καταλήγουμε στις εξής υπολεκάνες και στο αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο.



Εικόνα 3.2. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής πριν την εφαρμογή της εντολής *Generate Project*.

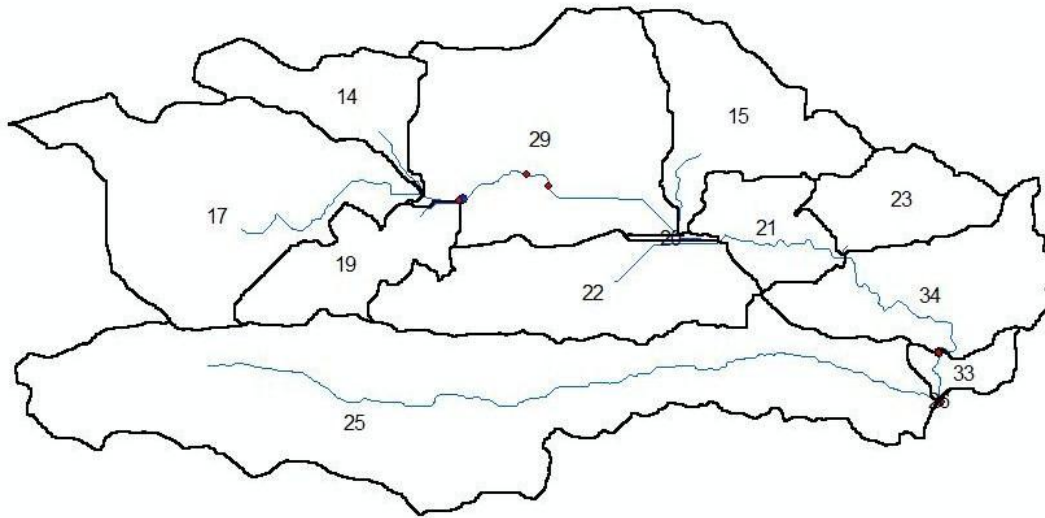


Εικόνα 3.3. Η περιοχή μελέτης όπως έχει οριστεί με την εφαρμογή της εντολής *Generate Project*.

Εφόσον έχει οριστεί η περιοχή μελέτης, έκτασης 200 km^2 , το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία των υπολεκανών και τελικά, η εξαγωγή χρήσιμων τοπογραφικών χαρακτηριστικών των λεκανών. Αυτά επιτυγχάνονται με τις εντολές *Basin Processing* και *Basin Characteristics*.

Από το πρώτο μενού εφαρμόστηκε μόνο η εντολή *Subbasin Divide*, σύμφωνα με την οποία μια λεκάνη μπορεί να χωριστεί σε δύο υπολεκάνες σε ένα υπάρχον υδατόρεμα

(Doan and Fleming, 2010). Με το εργαλείο *Subbasin Divide* επιλέγονται δύο σημεία, το ένα κοντά στο σταθμό 4 και το δεύτερο στο σταθμό 1 (Εικόνα 3.1.) τα οποία ορίζονται ως user points.



Εικόνα 3.4. Η τελική μορφή των υπολεκανών και του υδρογραφικού δικτύου μελέτης.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του μενού *Basin Characteristics* υπολογίζονται τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των ρεμάτων των υπολεκανών. Συγκεκριμένα, η κλίση (basin slope), το κέντρο βάρους (basin centroid) της κάθε υπολεκάνης, το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (longest flowpath), το μήκος (river length) και η κλίση (river slope) των υδατορευμάτων. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά συμπληρώνονται αυτόματα στον πίνακα ιδιοτήτων (open the attribute table) των λεκανών και των ρεμάτων, ενώ άλλα όπως το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης και το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής φαίνονται κατευθείαν στο χάρτη.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται ο πίνακας ιδιοτήτων των σχηματιζόμενων υπολεκανών:

OBJECTID *	Shape *	Shape_Length	Shape_Area	HydroID	DrainID	BasinSlope	GRIDCODE
1	Polygon	21150	9119375	14	14	30.056812	1
2	Polygon	25100	14259375	15	15	19.319689	2
4	Polygon	35950	28967500	17	17	19.509182	4
6	Polygon	21750	9318125	19	19	20.945396	6
7	Polygon	5250	341875	20	20	1.626577	7
8	Polygon	15800	6922500	21	21	19.442562	8
9	Polygon	28450	18574375	22	22	10.908115	9
10	Polygon	16750	8103750	23	23	27.104803	10
11	Polygon	10150	2562500	33	33	20.631685	11
12	Polygon	68100	62541875	25	25	21.716789	12
13	Polygon	1000	6875	26	26	7.047882	13
14	Polygon	30550	29970625	29	29	16.953548	<Null>
15	Polygon	24450	15438125	34	34	29.432602	<Null>

Εικόνα 3.5. Πίνακας ιδιοτήτων των υπολεκανών.

Στη συνέχεια ακολουθεί, ο υπολογισμός διαφόρων υδρολογικών παραμέτρων με τη βοήθεια του μενού *Hydrologic Parameters*. Αρχικά, δίνεται η δυνατότητα επιλογής των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στο HEC-HMS (*Select HMS Processes*). Συγκεκριμένα, τα πρότυπα για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής ροής και της διόδευσης του πλημμυρογραφήματος. Ωστόσο αυτό το βήμα παραλείπεται στο συγκεκριμένο στάδιο, καθώς η επιλογή των προτύπων μπορεί να γίνει αργότερα στο HEC-HMS, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Τέλος, δόθηκαν ονόματα στα υδατορέματα και στις υπολεκάνες ξεκινώντας από τα ανάντη προς τα κατόντη με το μενού *River Auto Name* και *Basin Auto Name*.

Το τελευταίο βήμα, είναι η τελική επεξεργασία των αρχείων εισόδου πριν την εισαγωγή τους στο HEC-HMS. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά εντολών στο μενού HMS, όπως φαίνεται και παρακάτω:

- *Map to HMS Units* → Αντιστοιχία των μονάδων των δεδομένων με μονάδες συμβατές με το HEC-HMS.
- *Check Data* → Ελέγχει την ορθότητα των δεδομένων.
- *HMS Schematic* → Δημιουργία ενός απλού υδρογραφικού δικτύου και έλεγχος της σύνδεσης των κόμβων (nodes) και των συνδέσμων (links).
- *HMS Legend* → Αναπαράσταση των βασικών στοιχείων (υπολεκάνες, συνδέσμους, σημείο εξόδου κ.α.) με σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο HEC-HMS.
- *Add coordinates* → Εξαγωγή συντεταγμένων στα στοιχεία κόμβων και συνδέσμων.
- *Prepare data for model export* → Αποθήκευση των δεδομένων υπολεκανών και υδατορευμάτων σε πίνακες ιδιοτήτων για την εξαγωγή του μοντέλου λεκάνης (basin model file) στο HEC-HMS.
- *Background Shape File* → Εξαγωγή χάρτη συμβατού σε περιβάλλον HEC-HMS.
- *Basin Model File* → Εξαγωγή του μοντέλου λεκάνης με τα υδρολογικά στοιχεία, τη συνδεσιμότητα τους και τις απαραίτητες γεωγραφικές πληροφορίες.
- *Create HEC-HMS Project* → Δημιουργία ενός Project έτοιμο για επεξεργασία στο HEC-HMS.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας και μετεωρολογικού μοντέλου (Met Model File) στο HEC-GeoHMS. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία τα μετεωρολογικά μοντέλα δημιουργήθηκαν κατευθείαν στο HEC-HMS.

3.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

3.3.1. Το μοντέλο λεκάνης απορροής (BASIN MODEL)





Η επεξεργασία της λεκάνης μελέτης γίνεται πλέον στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Αρχικά φορτώνεται το αρχείο της λεκάνης απορροής (basin model) όπως έχει ετοιμαστεί από το HEC-GeoHMS. Οι εντολές που χρησιμοποιούνται είναι:

File → Import → Basin Model

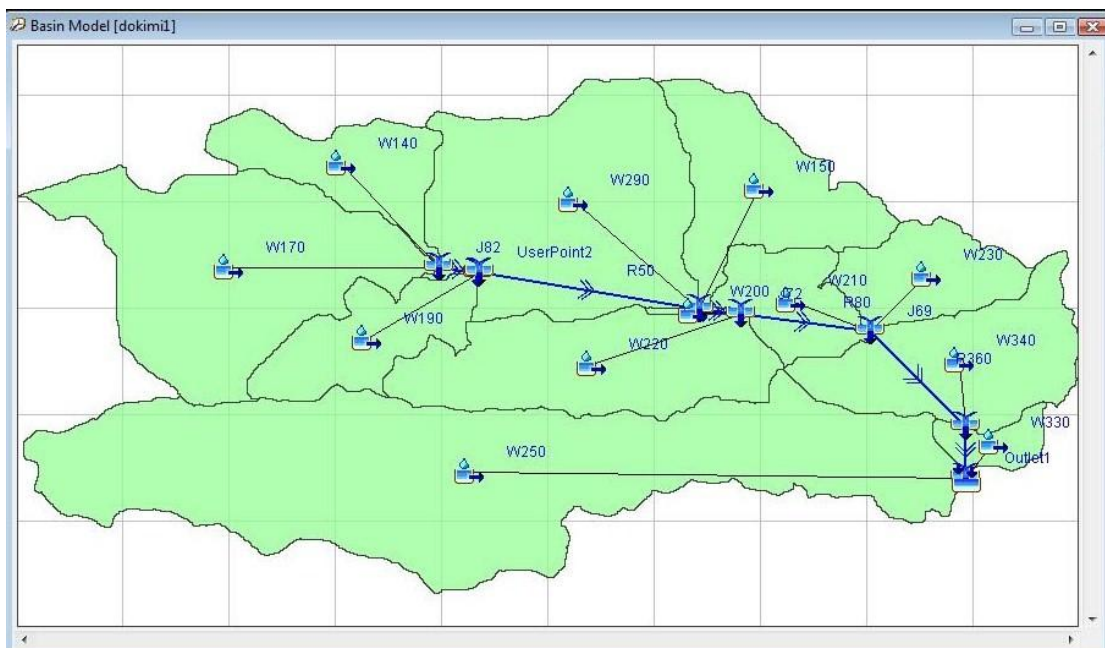
Επιπλέον, προστίθεται και ο χάρτης υποβάθρου για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα επιλέγοντας:

View → Background Maps → Add

Έχουμε λοιπόν:

- 12 επιμέρους υπολεκάνες 
- ρέματα (reaches)  που συνδέονται με
- κόμβους (junctions)  καταλήγοντας
- στο σημείο εξόδου της λεκάνης (outlet) 

όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.6. Το μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS.

Έτσι, για κάθε υπολεκάνη δίνονται στοιχεία για την έκταση της, το τμήμα ρέματος με το οποίο συνδέεται κατάντη και τα μαθηματικά πρότυπα που επιλέγονται, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

Εικόνα 3.7. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των υπολεκανών.

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των προτύπων:

- υπολογισμού απωλειών βροχής
- υπολογισμού άμεσης απορροής
- υπολογισμού βασικής απορροής
- διόδευσης πλημμυρογραφήματος

Οι επιλογές γίνονται χάριν ευκολίας μαζικά για όλες τις υπολεκάνες από το μενού Parameters → Loss / Transform/ Baseflow/ Routing αντίστοιχα.

3.3.1.1. Το πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Η άμεση απορροή προκαλείται από την ενεργό βροχόπτωση αφού έχουν αφαιρεθεί από το συνολικό όγκο βροχής οι υδρολογικές απώλειες. Η εμφάνιση των απωλειών εξαρτάται και από τη χρονική κλίμακα που εξετάζεται. Σε μεγάλη χρονική κλίμακα π.χ. ετήσια, τα ελλείμματα που προκύπτουν από την ποσότητα που βρέχει με την ποσότητα που τελικά θα απορρεύσει οφείλονται στην εξάτμιση και στη διαπνοή. Όταν όμως εξετάζονται επεισόδια βροχόπτωσης σε μικρή χρονική κλίμακα π.χ. ημερήσια, η συνεισφορά των παραπάνω διεργασιών θεωρείται αμελητέα. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν την περίπτωση είναι η κατακράτηση από τη φυτοκάλυψη, η διήθηση και η επιφανειακή αποθήκευση.

Η ποσοτική εκτίμηση των απωλειών βροχής, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα καθώς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και από τα χαρακτηριστικά της βροχής. Το τροχοπέδη στον υπολογισμό αυτό παραμένει η ανομοιογένεια στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά (γεωμορφολογία, τύποι εδαφών, χλωρίδα) της

λεκάνης, επηρεάζοντας τις αντίστοιχες υδρολογικές διεργασίες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999).

Η απλούστερη μέθοδος υπολογισμού της ενεργού βροχόπτωσης είναι η μέθοδος του συντελεστή απορροής όπως χρησιμοποιείται στην ορθολογική μέθοδο, η οποία μετασχηματίζει τη βροχή σε απορροή με την απλή σχέση $Q = ciA$. Ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι επαρκής μόνο στην περίπτωση που η βροχή έχει ομοιόμορφη ένταση σε όλη τη διάρκεια της. Μια καλύτερη προσέγγιση για βροχή χρονικά ανομοιόμορφης έντασης είναι η μέθοδος του δείκτη ολικών απωλειών ϕ . Σύμφωνα με αυτήν, οι απώλειες πραγματοποιούνται με χρονικά σταθερό ρυθμό, μεγέθους ϕ . Σημειώνεται ότι, οι μέθοδοι αυτές είναι ισοδύναμες για χρονικά ομοιόμορφη βροχόπτωση (Κουτσογιάννης, 2011).

Η πιο ρεαλιστική μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, αποτελεί η μέθοδος των Η.Π.Α. Soil Conservation Service (SCS), η οποία επιλέχτηκε ως το πρότυπο υπολογισμού των απωλειών στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος καταλήγει στην ακόλουθη σχέση (Κουτσογιάννης, 2011):

$$H = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & P \leq 0.2S \\ \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P > 0.2S \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

όπου P το ολικό ύψος βροχής (mm) σε μια τυχαία χρονική στιγμή, το οποίο υπολογίζεται αθροιστικά από την έναρξη της βροχής, H το ύψος της ενεργούς βροχόπτωσης (mm) στην ίδια χρονική στιγμή και S παράμετρος μέγιστης δυνητικής κατακράτησης (mm). Η παραπάνω σχέση αναπαριστά το φαινόμενο μετατροπής της βροχής σε απορροή με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι οι μέθοδοι που στηρίζονται σε δείκτες απωλειών, σταθερούς στο χρόνο (δείκτη ϕ) ή μεταβλητούς (π.χ. εκθετικής μείωσης). Η σχέση αυτή υπολογίζει το τελικό ύψος βροχής αλλά και τις ενδιάμεσες τιμές του κι έτσι προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου.

Στο μοντέλο που αντιπροσωπεύει η παραπάνω σχέση θεωρείται ότι ένα αρχικό ύψος βροχής, ίσο με $0.2S$, μετατρέπεται σε απώλειες (αρχική κατακράτηση) χωρίς να πραγματοποιηθεί απορροή. Μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος και καθώς εξελίσσεται η καταιγίδα, το μοντέλο θεωρεί ότι μπορεί να μετατραπεί σε απώλειες μια πρόσθετη ποσότητα βροχής, το πολύ ίση με την παράμετρο S . Συνεπώς, το ολικό ύψος των απωλειών βροχής μπορεί να φτάσει έως $1.2S$.

Η παράμετρος S συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (curve number). Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από το γεωλογικό τύπο (διαπερατότητα εδάφους), τις χρήσεις γης και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Είναι ένας αριθμός που παίρνει τιμές

από το 0 μέχρι το 100 και συνδέεται με τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση S με τη σχέση:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Στην περίπτωση που είναι γνωστό το ενεργό ύψος βροχής (σχέση 3.1) είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραμέτρου S . Όταν όμως δεν υπάρχουν δεδομένα απορροής η παράμετρος αυτή υπολογίζεται εμμέσως μέσω του αριθμού CN. Συνεπώς, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του αριθμού CN.

3.3.1.2. Υπολογισμός του αριθμού καμπύλης απορροής CN

Έχοντας επιλέξει τη μέθοδο SCS για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του αριθμού CN. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παράμετρος CN επηρεάζεται από τον τύπο εδάφους, τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής, και από τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, και παίρνει τιμές από 0 έως 100.

Η μέθοδος αυτή κατατάσσει αρχικά τα εδάφη σε 3 τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας, οι οποίοι είναι (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Για τον τύπο II η μέθοδος SCS δίνει τιμές για τον αριθμό CN ανάλογα με τις χρήσεις γης και τους γεωλογικούς σχηματισμούς του εδάφους. Για τους άλλους δύο τύπους οι αριθμοί CN υπολογίζονται συναρτήσει του αριθμού CN_{II} όπως φαίνεται ακολούθως:

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.0058CN_{II}} \quad (3.3)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.013CN_{II}} \quad (3.4)$$

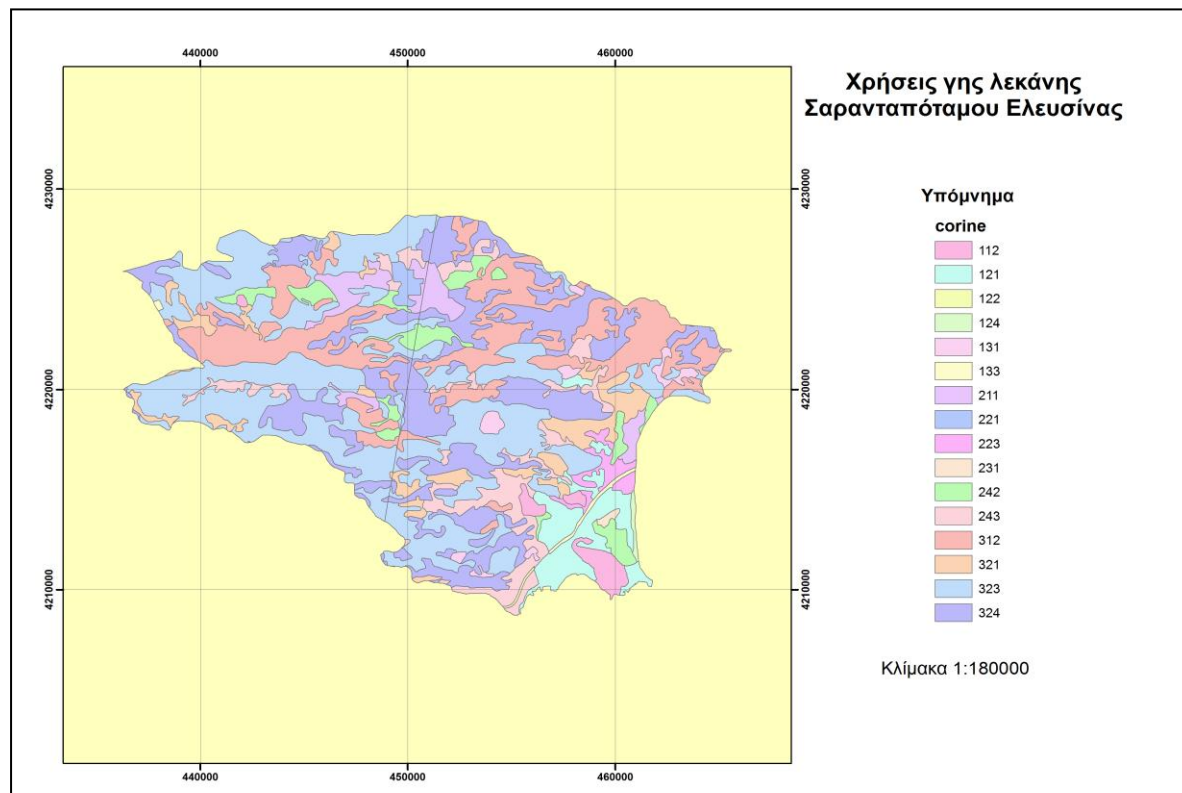
Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι ισχύει ο δεύτερος τύπος προηγούμενων συνθηκών υγρασίας.

Ο δεύτερος διαχωρισμός που γίνεται στη μέθοδο αυτή είναι συναρτήσει των χρήσεων γης. Αρχικά, οι χρήσεις γης που εμφανίζονται στη λεκάνη μελέτης κατατάσσονται σε πέντε γενικευμένες κατηγορίες:

Πίνακας 3.1. Γενικευμένη κατηγοριοποίηση χρήσεων γης

Κατηγορία	1	2	3	4	5
Χρήση γης	Καλλιεργημένη έκταση	Λιβάδια	Δάση	Αστική περιοχή	Δρόμοι

Στη συνέχεια γίνεται αντιστοίχιση των χρήσεων γης (corine) που εμφανίζονται στη λεκάνη μελέτης με τις παραπάνω κατηγορίες και προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας (Γαλιουνά, 2011) και ακολούθως, ο αντίστοιχος χάρτης με τις χρήσεις γης (Χάρτης 3.1).



Χάρτης 3.1. Οι χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 3.2. Κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης για τον υπολογισμό του αριθμού CN στη λεκάνη μελέτης.

Κωδικός corine	Χρήσεις γης	Κατηγορία
112	Διακεκομμένη αστική δόμηση	4
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	5
122	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	5
124	Ζώνες αεροδρομίων	5
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	4
133	Χώροι οικοδόμησης	4
211	Μη αρδεύσιμη γη	1
221	Αμπελώνες	1
223	Ελαιώνες	1
231	Λιβάδια	2
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	1
243	Γη καλυπτόμενη από γεωργία και φυσική βλάστηση	1
312	Δάσος κωνοφόρων	3
321	Φυσικοί βοσκότοποι	2
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	2
324	Δασώδεις- θαμνώδεις εκτάσεις	2

Ο τρίτος και τελευταίος διαχωρισμός γίνεται με βάση τη διαπερατότητα των εδαφών, σε 4 ομάδες.

Πίνακας 3.3. Κατάταξη εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητα τους (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Ομάδα Α: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.

Ομάδα Β: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα

περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Ακολουθώς, δίνονται οι τυπικοί αριθμοί CN συνδυάζοντας τις χρήσεις γης με τον υδρολογικό τύπο εδαφών.

Πίνακας 3.4. Εύρος τιμών καμπύλης απορροής CN για κάθε χρήση γης και τύπο εδάφους (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Περιγραφή χρήσης γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις	62-72	71-81	78-88	81-91
Λιβάδια, βοσκότοποι	30-68	58-79	71-86	78-89
Δάση	22-45	55-66	70-77	77-83
Αστικές περιοχές	51-77	68-85	79-90	84-92
Δρόμοι	72-98	82-98	87-98	89-98

Τελικά, προκύπτει ο πίνακας με τις τιμές του αριθμού CN, όπως χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία:

Πίνακας 3.5. Αριθμοί καμπύλη απορροής για κάθε χρήση γης και τύπο εδάφους που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

		A	B-C	D
1	Καλ. Έκταση	67	80	86
2	Λιβάδια	49	74	84
3	Δάση	35	68	80
4	Αστική περιοχή	64	81	88
5	Δρόμοι	85	92	94

Αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού του αριθμού καμπύλης απορροής έχει ως εξής. Για κάθε υπολεκάνη θα υπολογιστεί και ένας αριθμός CN. Η διαδικασία υπολογισμού γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGis. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Προσθήκη ενός νέου πεδίου (type) στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) του χάρτη χρήσεων γης (corine), που συμπληρώνεται με τον τύπο (1,2,3,4 και 5) των γενικευμένων κατηγοριών (καλ.έκταση, λιβάδια κ.λπ.), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

2. Ένωση του χάρτη χρήσεων γης (corine) με το χάρτη που δίνει τους υδρολιθολογικούς τύπους εδαφών (geology) για την εμφάνιση ενός τελικού χάρτη με πίνακα ιδιοτήτων που θα περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά και των δύο. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή *Intersect* από την εργαλειοθήκη Arc toolbox του ArcMap. Στον τελικό αυτό πίνακα προστίθεται ένα νέο πεδίο που συμπληρώνεται από το χρήστη με τους αριθμούς CN όπως προκύπτουν από τον τελικό Πίνακα 3.5.
3. Με την εντολή *clip* από την εργαλειοθήκη Arc toolbox του ArcMap, «κόβεται» ο αρχικός ενωμένος χάρτης (corine και geology) σε κάθε υπολεκάνη.
4. Για κάθε τύπο εδάφους (A, B-C, D) και για κάθε χρήση γης αντιστοιχεί ένας αριθμός CN. Υπολογίζονται λοιπόν τα ποσοστά έκτασης της κάθε χρήσης γης σε συνδυασμό με τον γεωλογικό τύπο εδάφους στην υπολεκάνη. Πολλαπλασιάζονται τα ποσοστά αυτά με τον αντίστοιχο αριθμό CN (Πίνακας 3.5) και το άθροισμα αυτών δίνει τον τελικό αριθμό CN της υπολεκάνης.

Σημειώνεται ότι, πριν την τελική μορφή του πίνακα ιδιοτήτων, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, έγινε μια απλοποίηση χάριν ευκολίας των υπολογισμών. Η εντολή *dissolve* από την εργαλειοθήκη Arc toolbox του ArcMap, αθροίζει στοιχεία με βάση συγκεκριμένες ιδιότητες. Εδώ, επιλέχθη να προστεθούν όσα στοιχεία έχουν τον ίδιο αριθμό CN. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας για μια τυχαία λεκάνη απορροής (17):

OBJECTID *	Shape *	cn	Shape_Length	Shape_Area	area	cn_pc	cn1
1	Polygon	35	35143.417357	8974574.067056	28944530	0.310061	10.85214
2	Polygon	49	56066.276905	16740066.055317	28944530	0.57835	28.339144
3	Polygon	64	1932.976554	252171.016862	28944530	0.008712	0.557582
4	Polygon	67	11883.631921	1736049.562996	28944530	0.059979	4.01856
5	Polygon	68	3596.454802	287931.862175	28944530	0.009948	0.676444
6	Polygon	74	6441.459706	412688.412957	28944530	0.014258	1.055085
7	Polygon	80	4805.985143	541048.651554	28944530	0.018693	1.495408

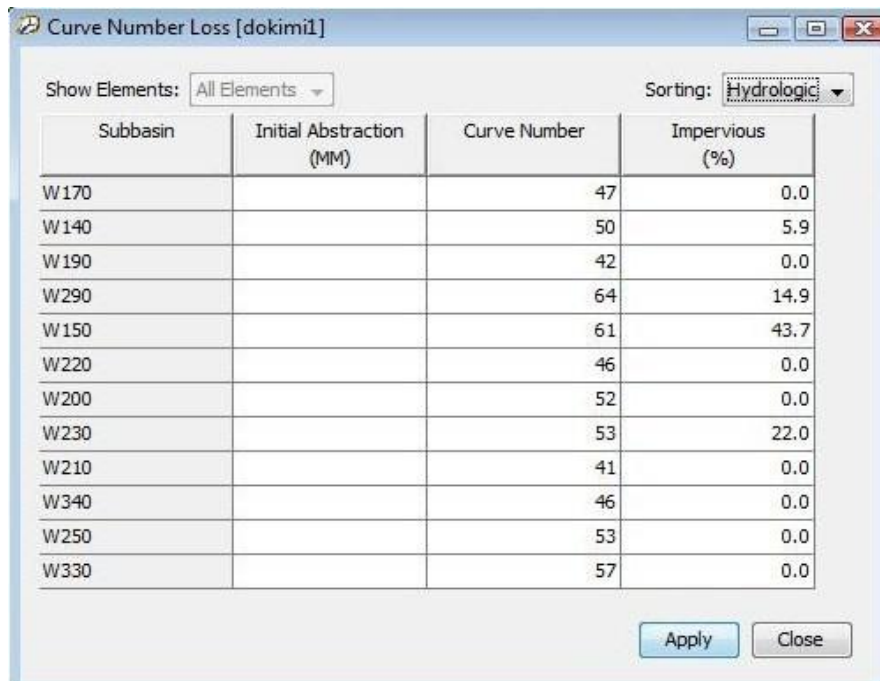
Εικόνα 3.8. Ο πίνακας ιδιοτήτων της υπολεκάνης 17 με τους αντίστοιχους αριθμούς CN.

$$0.3*35 + 0.58*49 + 0.01*64 + 0.06*67 + 0.01*68 + 0.01*74 + 0.02*80 = 47$$

Η ίδια διαδικασία εκτελείται για όλες τις υπολεκάνες.

Εκτός από τον αριθμό CN ζητείται στο πρόγραμμα HEC-HMS και το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας που υπάρχει σε κάθε υπολεκάνη. Έτσι συμπληρώνεται ο

ακόλουθος πίνακας των απαραίτητων δεδομένων για τον υπολογισμό του προτύπου απωλειών βροχής:



Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W170		47	0.0
W140		50	5.9
W190		42	0.0
W290		64	14.9
W150		61	43.7
W220		46	0.0
W200		52	0.0
W230		53	22.0
W210		41	0.0
W340		46	0.0
W250		53	0.0
W330		57	0.0

Εικόνα 3.9. Οι αριθμοί CN και τα ποσοστά αδιαπέρατης επιφάνειας σε κάθε υπολεκάνη.

Στο πεδίο initial abstraction, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής ενός αρχικού ελλείμματος. Αν αυτό δεν συμπληρωθεί, όπως εδώ, το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της μέγιστης δυνατικής κατακράτησης, όπως προκύπτει και από τη βασική σχέση υπολογισμού του ενεργού ύψους βροχής (βλ. σχέση 3.1)

3.3.1.3. Το πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Για το πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το μοναδιαίο υδρογράφημα οριζόμενο από το χρήστη (user specified Unit Hydrograph).

Η ενεργός βροχόπτωση είναι εκείνο το τμήμα της ολικής βροχής που μετατρέπεται σε απορροή. Το ενδιαφέρον έγκειται στη μετατροπή της βροχής σε απορροή. Ωστόσο, η ανομοιόμορφη χωρική και χρονική κατανομή της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής παρακωλύουν τη συσχέτιση αυτή. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί θεωρίες και μαθηματικά μοντέλα που να μετατρέπουν τη βροχόπτωση σε άμεση απορροή, προσδιορίζοντας τη χρονική διάρκεια της άμεσης απορροής, το χρόνο που θα φτάσει η παροχή αιχμής καθώς και την τιμή της (Γκικόκας, 2009). Από τη μια, υπάρχει η επιλογή των μοντέλων φυσικής βάσης όπως είναι το μοντέλο του κινηματικού κύματος (kinematic wave) βασισμένο στις θεμελιώδεις εξισώσεις της

υδραυλικής και από την άλλη μοντέλα που στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Ντοανίδης, 2007).

Ως *μοναδιαίο υδρογράφημα* θεωρείται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προέρχεται από ενεργό βροχόπτωση, σταθερής έντασης, ύψους 10 mm ομοιόμορφα καταναμημένου σε όλη την έκταση της λεκάνης.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις εξής παραδοχές (Μαμάσης, 2011):

- Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
- Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή δεν εξαρτάται από τις προηγούμενες βροχές.
- Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει χρονικά αμετάβλητη.

Επίσης, οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η *αρχή της επαλληλίας* και η *αρχή της αναλογίας*. Σύμφωνα με την πρώτη, το συνολικό υδρογράφημα απορροής που προκύπτει από διαδοχικές βροχοπτώσεις, είναι το υδρογράφημα με παροχές που ισούνται με το άθροισμα των παροχών των επιμέρους βροχοπτώσεων. Σύμφωνα με τη δεύτερη, δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης δίνουν υδρογραφήματα απορροής με την ίδια χρονική βάση, ενώ σε κάθε χρονική στιγμή ο λόγος των παροχών είναι ίσος με το λόγο των εντάσεων.

Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων από πραγματικά επεισόδια βροχής. Στην περίπτωση αυτή, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να υπολογιστεί συνθετικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Στη μελέτη αυτή η μέθοδος που επιλέχθηκε για τη σύνθεση του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι του *Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας*.

Η μέθοδος του *Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας*

Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιεί τοπογραφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, καθώς και δεδομένα κλίσεων που προκύπτουν από τη μηκοτομή του κύριου υδατορεύματος. Συνιστά τη σύνθεση τριγωνικού υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής $d=1h$. Ο χρόνος ανόδου t_p του υδρογραφήματος υπολογίζεται συναρτήσει των χαρακτηριστικών της λεκάνης από τη σχέση:

$$t_p = \frac{46.6L^{0.14}}{S_{0.1*L-0.85*L}^{0.38} (1+URBAN)^{1.99} RMSD^{0.4}} \quad (3.5)$$

t_p	χρόνος ανόδου σε h
Q_p	παροχή αιχμής σε m ³ /s
t_b	χρόνος βάσης σε h
L	μήκος κύριου υδατορεύματος σε km
$S_{0.1^*L-0.85^*L}^{0.38}$	η μέση κλίση υδατορεύματος μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους του σε m/km
<i>URBAN</i>	αναλογία αστικών περιοχών στη λεκάνη απορροής
<i>RMSD</i>	παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων σε mm (πρακτικά υπολογίζεται ως το ύψος 24ώρης βροχής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 5 ετών)
A	έκταση λεκάνης απορροής σε km ²

Ο χρόνος βάσης t_b δίνεται από τη σχέση:

$$t_b = 2.52t_p \quad (3.6)$$

Εξ ορισμού το μοναδιαίο υδρογράφημα προέρχεται από ενεργό βροχή ύψους $h=10$ mm. Εφαρμόζοντας λοιπόν την εξίσωση συνέχειας (όγκος υετογραφήματος= όγκος πλημμυρογραφήματος), η παροχή αιχμής Q_p προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$10A = \frac{t_b Q_p}{2} \Rightarrow Q_p = \frac{20A}{t_b} \quad (3.7)$$

Η μέθοδος του *Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας*, δίνει μοναδιαίο υδρογράφημα για διάρκεια βροχής $d= 1h$. Ωστόσο, τα επεισόδια βροχής που χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναλυτικά αναφέρονται παρακάτω, είναι ημερήσια, χρονικού βήματος $d= 15$ min. Για να γίνει λοιπόν η προσαρμογή αυτή ώστε να παραχθούν μοναδιαία υδρογραφήματα 15 min, ο χρόνος ανόδου t_p υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$t_p = 0.6t_c + \frac{d}{2} \quad (3.8)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης και $d= 15$ min.

Σημειώνεται ότι, στους υπολογισμούς για τη σύνθεση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, ο χρόνος ανόδου t_p και ο χρόνος βάσης t_b στρογγυλοποιήθηκαν έτσι ώστε να είναι ακέραια πολλαπλάσια του χρονικού βήματος d .

Ο χρόνος συγκέντρωσης t_c υπολογίστηκε από τον τύπο του Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (3.9)$$

A (km²) έκταση της λεκάνης

L (km) το μήκος του κυρίου υδατορεύματος

ΔH (m) η διαφορά του μέσου υψομέτρου λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο

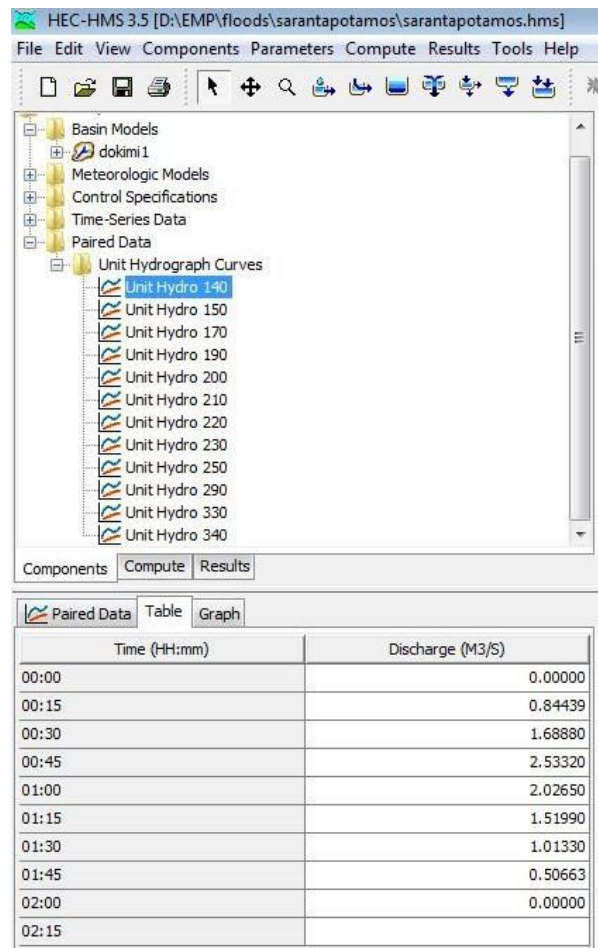
Κατά αυτόν τον τρόπο, υπολογίστηκαν τα μοναδιαία υδρογραφήματα για κάθε υπολεκάνη. Αρχικά, για την επιλογή της μεθόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS ακολουθήθηκε η σειρά εντολών:

Parameters → Transform → User-Specified Unit Hydrograph

Η εισαγωγή των μοναδιαίων υδρογραφημάτων έγινε υπό τη μορφή ζευγών δεδομένων (paired data) επιλέγοντας:

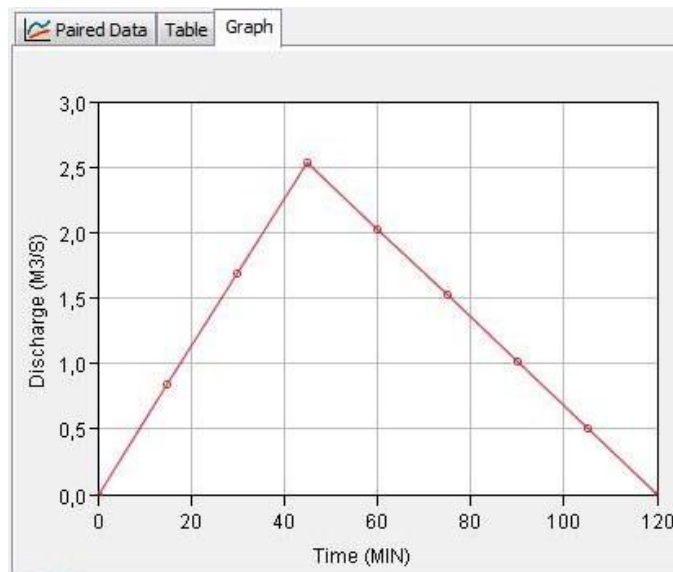
Components → Paired Data Manager → New → Unit Hydrograph Curves

Η εισαγωγή των τιμών έγινε χειροκίνητα (manual entry) από υπολογιστικό φύλλο του excel. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το μοναδιαίο υδρογράφημα μιας τυχαίας λεκάνης:



Εικόνα 3.10. Οι τιμές του μοναδιαίου υδρογραφήματος μιας τυχαίας λεκάνης (W140) σε περιβάλλον HEC-HMS.

Και το αντίστοιχο διάγραμμα του συγκεκριμένου μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:



Εικόνα 3.11. Το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης W140.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι τιμές των παροχών των ΜΥ εισήχθησαν στο πρόγραμμα HEC-HMS αφού τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει συμφωνία στους όγκους των ΜΥ και των εξαγόμενων πλημμυρογραφημάτων σε κάθε υπολεκάνη. Στα τελικά αποτελέσματα, υπήρχαν μηνύματα προειδοποίησης για πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ των παραπάνω όγκων, πριν από τις μετατροπές.

3.3.1.4. Το πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής

Δύο είναι οι συνιστώσες της επιφανειακής απορροής, η άμεση απορροή και η βασική ροή. Η άμεση απορροή σχετίζεται ευθέως με την ενεργό βροχόπτωση. Ενώ η βασική ροή, είναι ένα σύνολο προηγούμενων κατακρημνισμάτων αποθηκευμένων προσωρινά στη λεκάνη απορροής και της υπόγειας απορροής της τρέχουσας βροχόπτωσης.

Στην ανάλυση ενός υδρογραφήματος, το οποίο περιλαμβάνει την άμεση και τη βασική απορροή, παρατηρείται ότι η βασική ροή είναι διαρκής, καθ' όλη τη διάρκεια του επεισοδίου βροχής, ενώ η άμεση απορροή ανέρχεται μέχρι την παροχή αιχμής, και σιγά σιγά φθίνει μέχρι να φτάσει τη βασική ροή, εφόσον αυτή υπάρχει, ή μπορεί να φτάσει και το μηδέν (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003).

Στην παρούσα εργασία, λόγω έλλειψης δεδομένων για την προσομοίωση της βασικής ροής, δεν επιλέχθηκε κάποιο πρότυπο υπολογισμού της:

Parameters → Baseflow → None

Εξάλλου, δεδομένου ότι η βασική ροή οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην υπόγεια ροή των υδάτων, δεν επηρεάζεται αισθητά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών, όποτε δε σχετίζεται με το σκοπό της παρούσας εργασίας.

3.3.1.5. Το πρότυπο διόδευσης πλημμύρας

Για το πρότυπο διόδευσης πλημμύρας δεν επιλέχθηκε κάποια μέθοδος και δε γίνεται κάποια περαιτέρω ανάλυση, καθώς ξεφεύγει από το στόχο της παρούσας εργασίας.

3.3.2. Το μετεωρολογικό μοντέλο (METEOROLOGIC MODEL)

Μετά το στήσιμο του μοντέλου λεκάνης απορροής, όπως περιγράφηκε αναλυτικά πιο πάνω, ακολουθεί η κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου για την εισαγωγή των στοιχείων μετεωρολογικής πληροφορίας. Αρχικά, δημιουργείται από το κεντρικό μενού:

Components → Meteorologic Model Manager → New → Met1 → Specified Hyetograph

Δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη εισαγωγής παρατηρημένων επεισοδίων βροχόπτωσης, όπου αυτά υπάρχουν, είτε η εισαγωγή υποθετικών επεισοδίων βροχής για επιλεγμένη περίοδο επαναφοράς με τη βοήθεια των όμβριων καμπυλών. Λόγω απουσίας βροχομετρικής πληροφορίας στην περιοχή μελέτης, εισήχθησαν βροχές για κάθε υπολεκάνη, όπως προέκυψαν από την όμβρια καμπύλη που αντιστοιχεί στην εν λόγω περιοχή.

Δημιουργείται λοιπόν το αρχείο που θα δεχθεί τα δεδομένα σε μορφή χρονοσειράς:

Components → Times Series Data Manager → Precipitation Gages → New → Gage 14

Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και για τις 12 υπολεκάνες μελέτης, δημιουργώντας τις αντίστοιχες χρονοσειρές βροχής (Gage 17, Gage 22, Gage 19 κ.ο.κ.)

Αρχικά, επιλέχθηκε η όμβρια καμπύλη που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης (Αττική) με συντελεστή $\kappa = 15$ (Κοζώνης, 1995):

$$i = \kappa \frac{\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{d^{0.71}} \quad (3.10)$$

Η υδρολογική προσομοίωση θα γίνει για τρεις περιόδους επαναφοράς $T=20$, $T=100$, $T=1000$. Το υποθετικό επεισόδιο βροχής είναι ημερήσιο (24h) με χρονικό βήμα $d=15$ min. Για την κατανομή του συνολικού ύψους βροχής στο χρόνο και συνεπώς την κατάρτιση υετογράμματος σχεδιασμού, επιλέχθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εφόσον έχει επιλεγεί η περίοδος επαναφοράς T , η διάρκεια του επεισοδίου βροχής (24h) και το χρονικό βήμα (15 min) υπολογίζεται

από την όμβρια καμπύλη (3.7), η ένταση της βροχής i (mm/h) για κάθε τέταρτο, και εν συνεχεία, από την ένταση προκύπτει το αντίστοιχο ύψος βροχής h (mm).

Για τη μετατροπή του σημειακού ύψους βροχής σε επιφανειακό, υπολογίζεται ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής φ :

$$\varphi = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01\ln A}}{d^{0.35}} \quad (3.11)$$

όπου A η έκταση της λεκάνης απορροής σε km^2 και $d=15$ min.

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζεται ο συντελεστής φ με το αντίστοιχο τμηματικό ύψος βροχής h και επειδή κάθε τμηματικό ύψος περιέχει και την προηγούμενη τιμή, αυτή αφαιρείται και τελικά προκύπτουν τα επιθυμητά τμηματικά ύψη βροχής (Δh). Η διαδικασία υπολογισμού του υετογράμματος σχεδιασμού τελειώνει με τα τμηματικά ύψη βροχής να κατατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της συνολικής διάρκειας βροχής (12h) και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά αριστερά και δεξιά του κεντρικού μπλοκ κ.ο.κ.

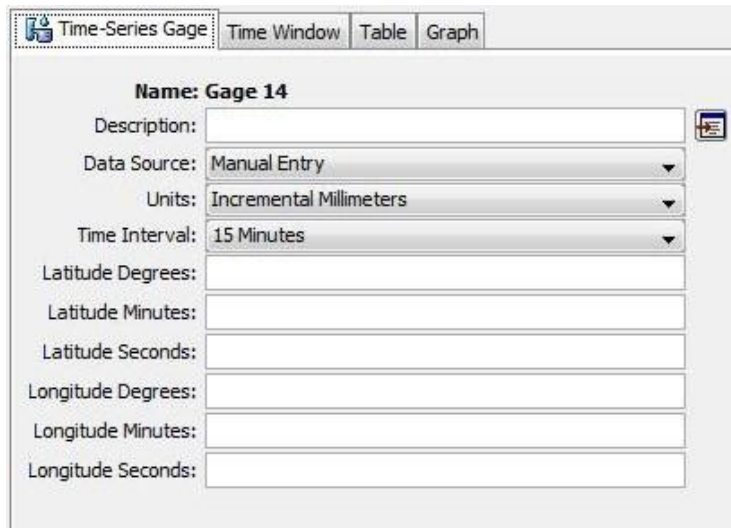
Παρουσιάζεται ενδεικτικά η παραπάνω διαδικασία των υπολογισμών για περίοδο επαναφοράς $T=20$ σε μια τυχαία λεκάνη απορροής (17) έκτασης 28.97 km^2 .

Πίνακας 3.6. Οι υπολογισμοί για την κατάρτιση του υετογράμματος σχεδιασμού για μια τυχαία λεκάνη απορροής (17) με $T=20$ έτη.

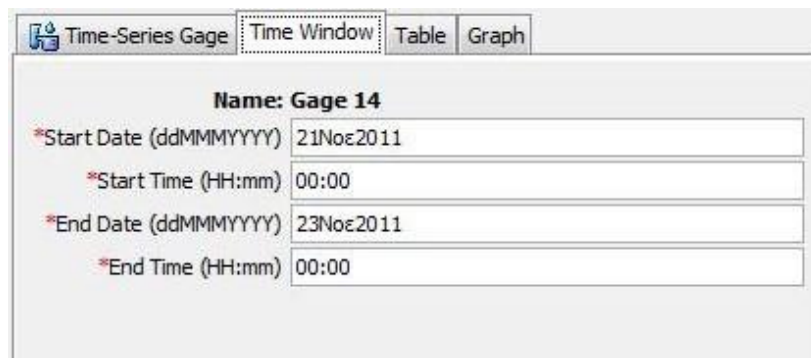
d h	T	i mm/h	h mm	φ	$h*\varphi$	Δh	κατάταξη
0.25	20	84.956	21.239	0.766	16.271	16.271	0.246
0.5	20	51.936	25.968	0.816	21.202	4.931	0.250
0.75	20	38.944	29.208	0.841	24.557	3.355	0.254
1	20	31.749	31.749	0.856	27.178	2.621	0.258
....
23	20	3.427	78.820	0.952	75.032	0.252	0.260
23.25	20	3.401	79.067	0.952	75.282	0.250	0.256
23.5	20	3.375	79.313	0.952	75.530	0.248	0.252
23.75	20	3.350	79.556	0.952	75.776	0.246	0.248
24	20	3.325	79.798	0.953	76.021	0.244	0.244

Τα πεδία που πρέπει να συμπληρωθούν στο HEC-HMS σε αυτό το στάδιο, για την εισαγωγή των χρονοσειρών βροχόπτωσης είναι: ο τρόπος εισαγωγής, οι μονάδες, το

χρονικό παράθυρο (διάρκεια βροχής και χρονικό βήμα), όπως παρουσιάζονται στις *Εικόνες 3.12.* και *3.13,* και είναι κοινές για κάθε μια από τις 12 υπολεκάνες:

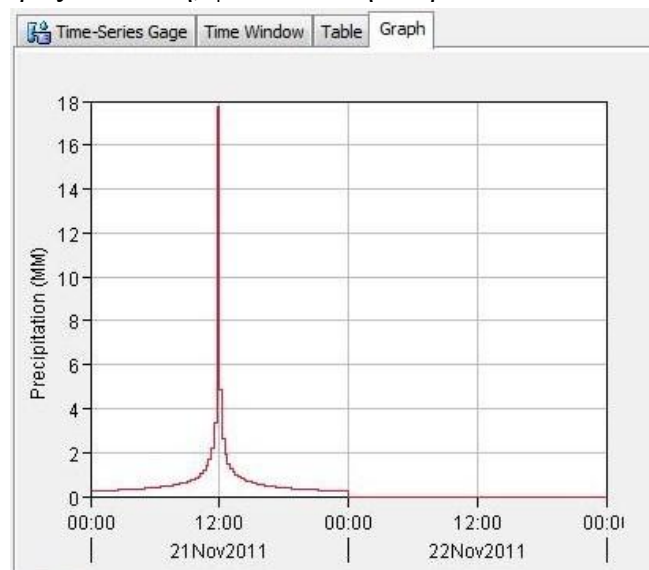


Εικόνα 3.12. Οι γενικές ρυθμίσεις των χρονοσειρών βροχόπτωσης πριν την εισαγωγή τους στο HEC-HMS.



Εικόνα 3.13. Χρονικός καθορισμός επεισοδίου βροχής.

Τέλος, το υετόγραμμα σχεδιασμού μιας τυχαίας λεκάνης απορροής (14) και για περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.14. Το υετόγραμμα σχεδιασμού για τη λεκάνη απορροής 14 ($T=20$ έτη).

Σε κάθε υπολεκάνη αντιστοιχεί διαφορετικό υετόγραμμα όπως προέκυψε από τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ για τις 3 περιόδους επαναφοράς $T=20$, $T=100$, $T=1000$ έτη.

3.3.3. Το αρχείο προσομοιώσεων (CONTROL SPECIFICATIONS)

Το τελευταίο βήμα πριν τον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων, είναι ο ορισμός της χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης. Δημιουργείται ένα νέο αρχείο από το μενού:

Components → Control Specifications Manager → New → Control 1

Control Specifications	
Name:	Control 1
Description:	21-23
*Start Date (ddMMMYYYY)	21Noe2011
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMMYYYY)	23Noe2011
*End Time (HH:mm)	00:00
Time Interval:	15 Minutes

Εικόνα 3.15. Το αρχείο προσομοίωσης πριν τους υπολογισμούς.

3.3.4. Το αρχείο υπολογισμών-Αποτελέσματα

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των δεδομένων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης, το τελικό στάδιο είναι ο υπολογισμός των υδρογραφημάτων των επιμέρους υπολεκανών. Ο χρήστης μεταβαίνει στο μενού:

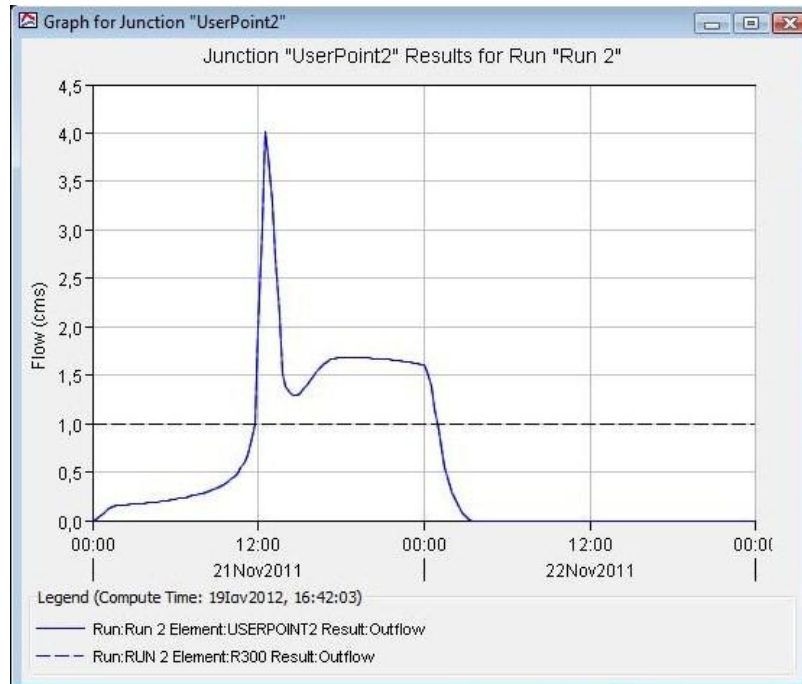
Compute → Create Simulation Run → Run1

Για τη δημιουργία του αρχείου υπολογισμών που θα «τρέξει» το πρόγραμμα, αρχικά επιλέγεται το μοντέλο λεκάνης απορροής, το μετεωρολογικό μοντέλο και το αρχείο προσομοιώσεων. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της εντολής: Compute → Select Run → Run1 ή απευθείας, αφού έχει επιλεγεί το αρχείο υπολογισμών (Run1) πατώντας το αντίστοιχο εικονίδιο.

Τα αποτελέσματα δίνονται είτε με τη μορφή διαγραμμάτων (graph), είτε με τη μορφή πινάκων (time series table) στους οποίους παρουσιάζονται η βροχόπτωση, οι απώλειες και η απορροή με τη μορφή χρονοσειράς, είτε ως τιμές παροχών αιχμής, ολικής βροχόπτωσης, ολικών απωλειών και απορροής (summary table). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στα 2 σημεία (userpoints) όπου έχουν τοποθετηθεί

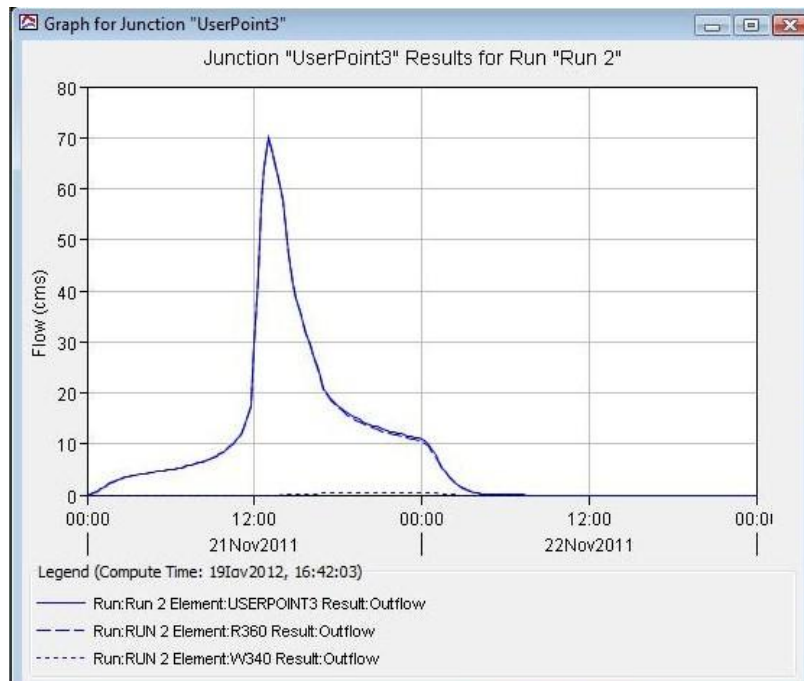
σταθμηγράφοι, καθώς και το πλημμυρογράφημα σε μια ανάντη υπολεκάνη απορροής (W150) για περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη.

Για την περιοχή Οινόη:



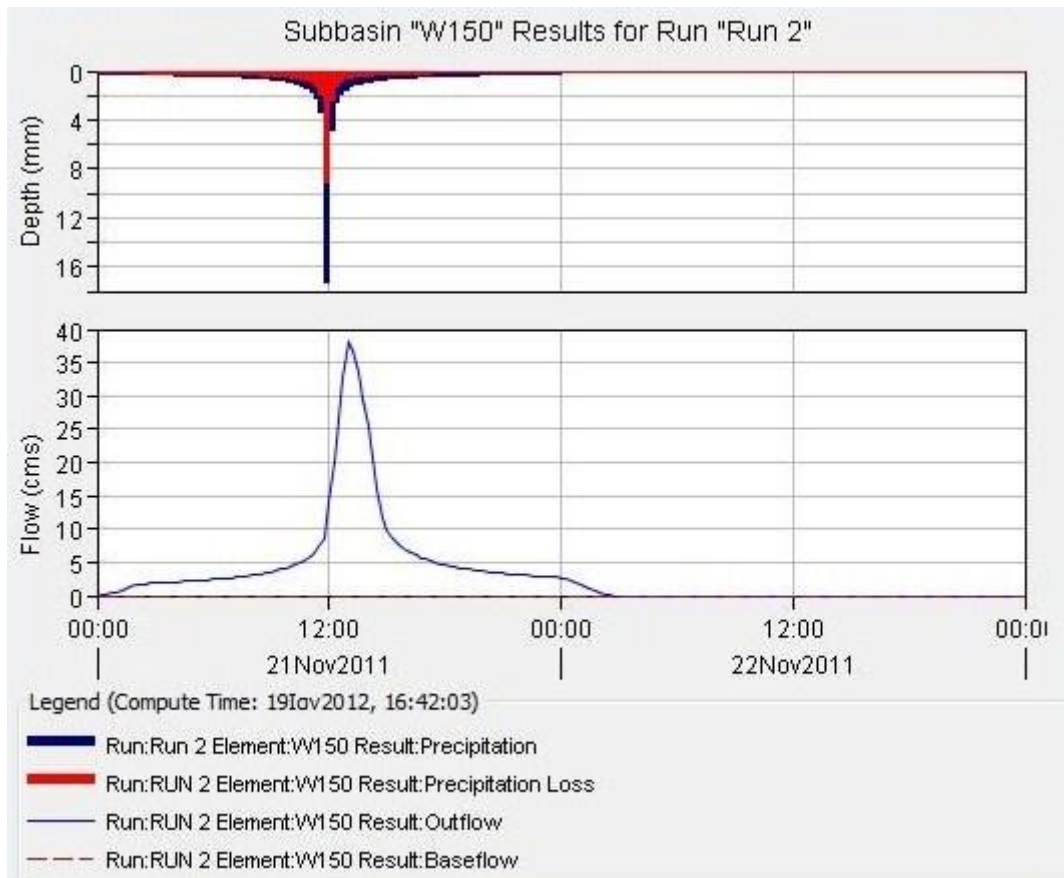
Εικόνα 3.16. Υδρογράφημα ανάντη θέσης μέτρησης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.

Για την περιοχή Μαγούλα:



Εικόνα 3.17. Υδρογράφημα θέσης μέτρησης λίγο πριν την έξοδο της λεκάνης, για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.

Για την ανάντη υπολεκάνη W150 (βλ. Εικόνα 3.6.)



Εικόνα 3.18. Υετόγραμμα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h ανάντη υπολεκάνης W150 και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.

Τέλος, ο συγκεντρωτικός πίνακας (summary table) για την παραπάνω λεκάνη:

Summary Results for Subbasin "W150"			
Project: sarantapotamos			
Simulation Run: Run 2		Subbasin: W150	
Start of Run:	21Nov2011, 00:00	Basin Model:	dokimi 1
End of Run:	23Nov2011, 00:00	Meteorologic Model:	Met 1
Compute Time:	19Jan2012, 16:42:03	Control Specifications:	Control 1
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3			
Computed Results			
Peak Discharge :	38.032 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge :	21Nov2011, 13:00
Total Precipitation :	76.745 (MM)	Total Direct Runoff :	38.876 (MM)
Total Loss :	37.869 (MM)	Total Baseflow :	0.000 (MM)
Total Excess :	38.876 (MM)	Discharge :	38.876 (MM)

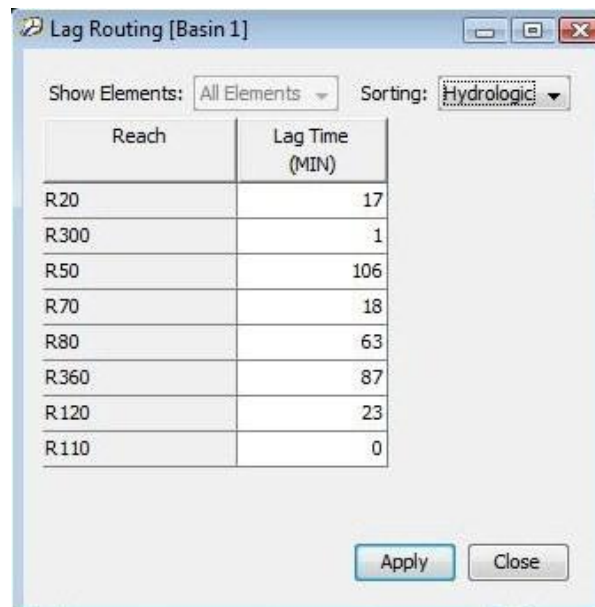
Εικόνα 3.19. Συγκεντρωτικός πίνακας της αντίστοιχης υπολεκάνης απορροής.

3.3.5. Διερεύνηση των υδρολογικών παραμέτρων-Αποτελέσματα

Παρατηρήθηκε ότι, η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης με τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν έδωσε πλημμυρογραφήματα σε ορισμένες μόνο

λεκάνες απορροής, μετατρέποντας τη βροχόπτωση εξ ολοκλήρου σε απώλειες. Αυτό στάθηκε η αφορμή για περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων και την εφαρμογή αλλαγών.

Συγκεκριμένα, στο πρότυπο υπολογισμού των απωλειών βροχής, επιλέχθηκε η μέθοδος SCS, με δεδομένα εισόδου το αρχικό έλλειμμα (initial abstraction), ο αριθμός cn και το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (impervious). Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι αριθμοί cn , όπως υπολογίστηκαν, αλλά δόθηκε τιμή στο αρχικό έλλειμμα ίση με 10 mm, και τα ποσοστά της αδιαπέρατης επιφάνειας τοποθετήθηκαν ως μηδενικά. Ακόμα, επιλέχθηκε ως μέθοδος διόδευσης πλημμύρας το lag routing. Θεωρήθηκε ότι η μέση ταχύτητα ροής του νερού είναι ίση με 1 m/s, και σε συνδυασμό με το μήκος κάθε τμήματος του ποταμού (R20, R300 κ.λπ.), υπολογίστηκε ο αντίστοιχος χρόνος σε λεπτά (min).

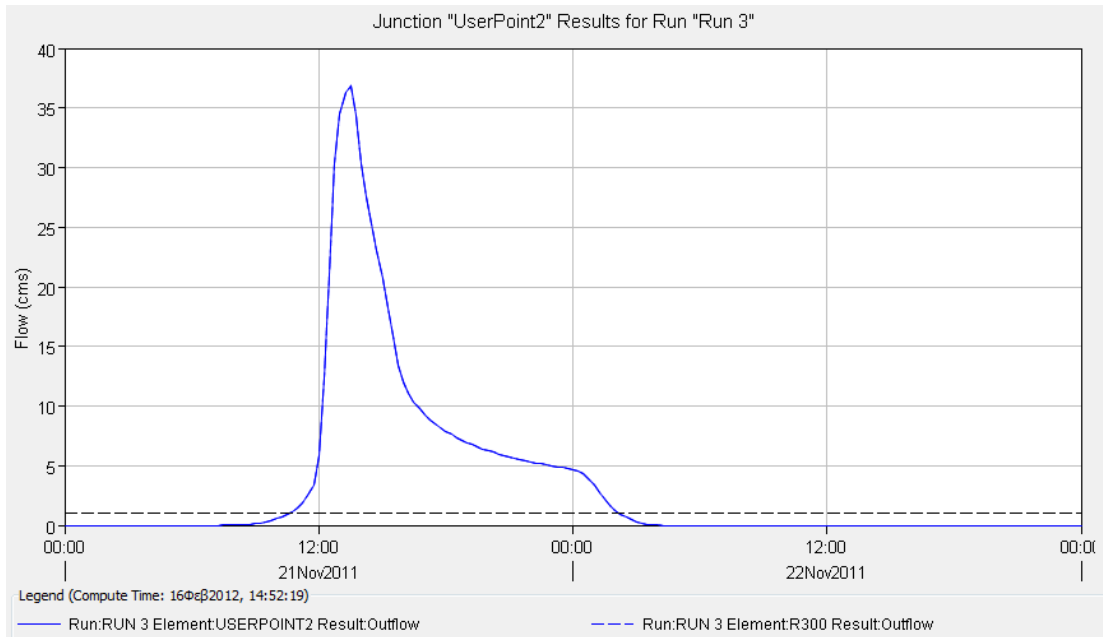


Reach	Lag Time (MIN)
R.20	17
R.300	1
R.50	106
R.70	18
R.80	63
R.360	87
R.120	23
R.110	0

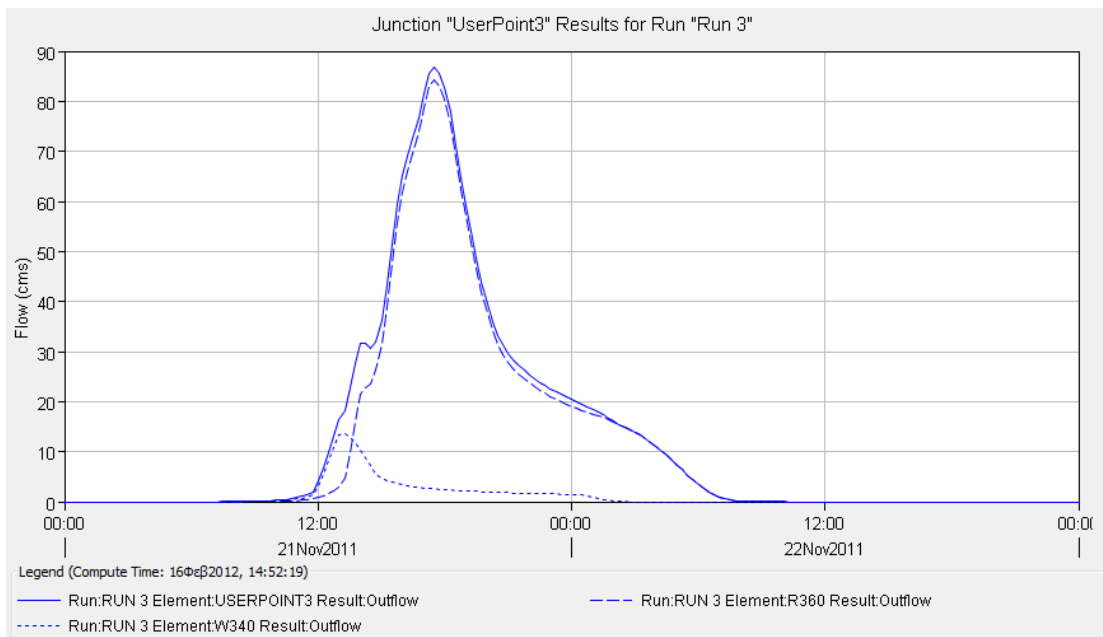
Εικόνα 3.20. Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας.

Τα πρότυπα βασικής ροής και άμεσης απορροής έμειναν τα ίδια. Παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις δύο θέσης μέτρησης (Οινόη και Μαγούλα) καθώς και τα πλημμυρογραφήματα στην πλέον ανάντη υπολεκάνη απορροής (W170) (βλ. Εικόνα 3.6.) και την αντίστοιχη κατάντη λεκάνη (W340), για περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη. Παρατηρείται ότι, τα πλημμυρογραφήματα έχουν αλλάξει μορφή σε όλες τις υπολεκάνες, και οι αντίστοιχες παροχές αιχμής έχουν αυξηθεί.

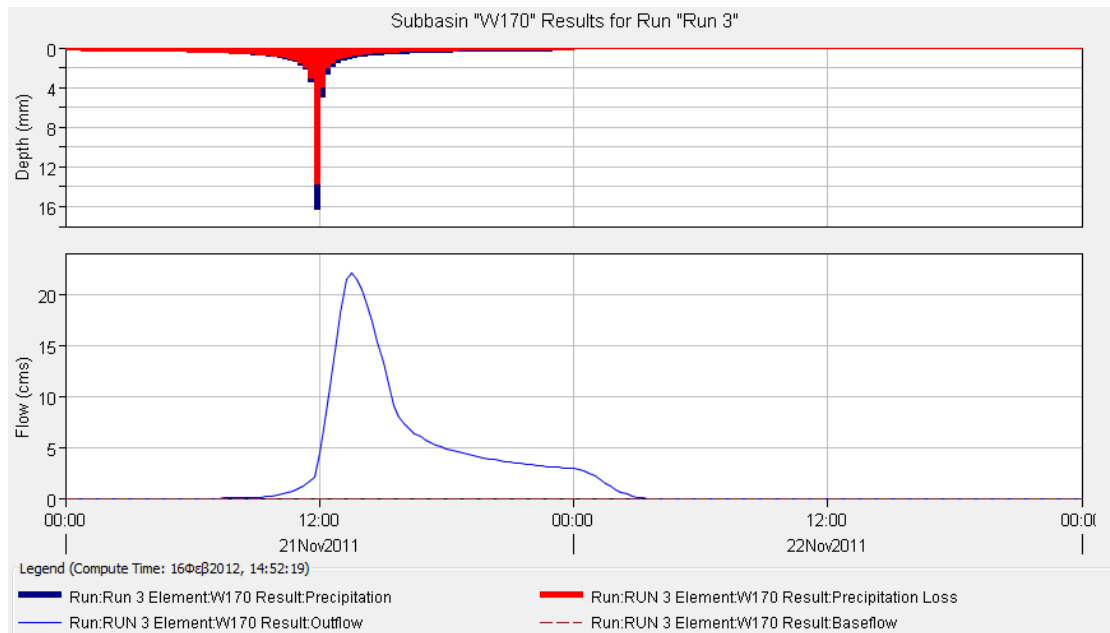
Για την περιοχή Οινόη:



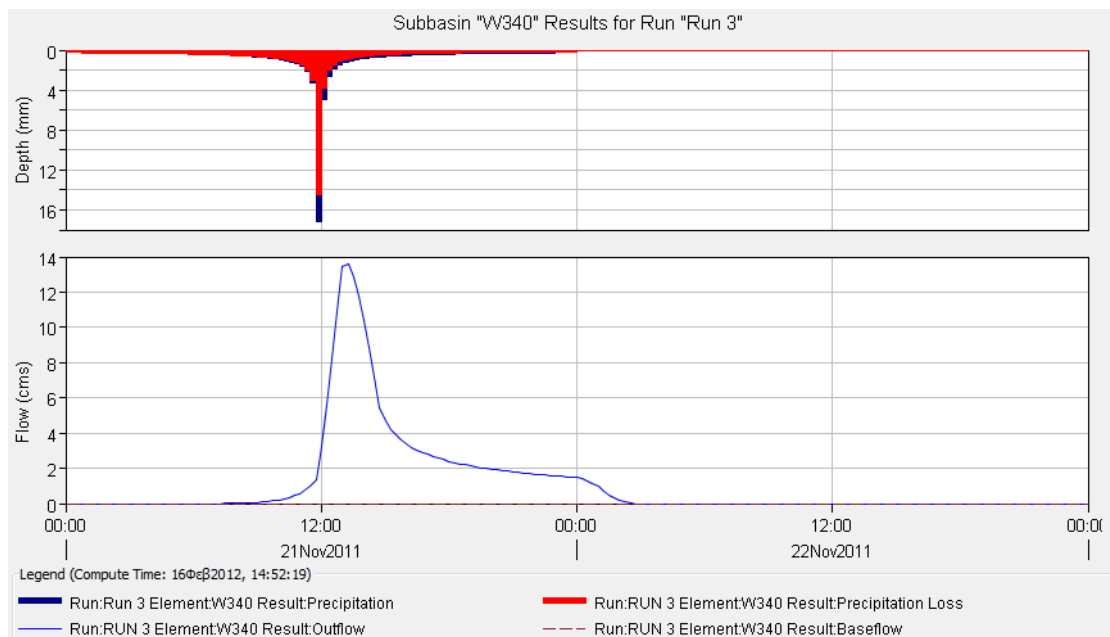
Εικόνα 3.21. Υδρογράφημα ανάντη θέσης μέτρησης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.



Εικόνα 3.22. Υδρογράφημα θέσης μέτρησης λίγο πριν την έξοδο της λεκάνης για επεισόδιο βροχής 24 h και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.



Εικόνα 3.23. Υετόγραμμα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h ανάντη υπολεκάνης και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.



Εικόνα 3.24. Υετόγραμμα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h κατόντη υπολεκάνης και περίοδο επαναφοράς 20 έτη.

4

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

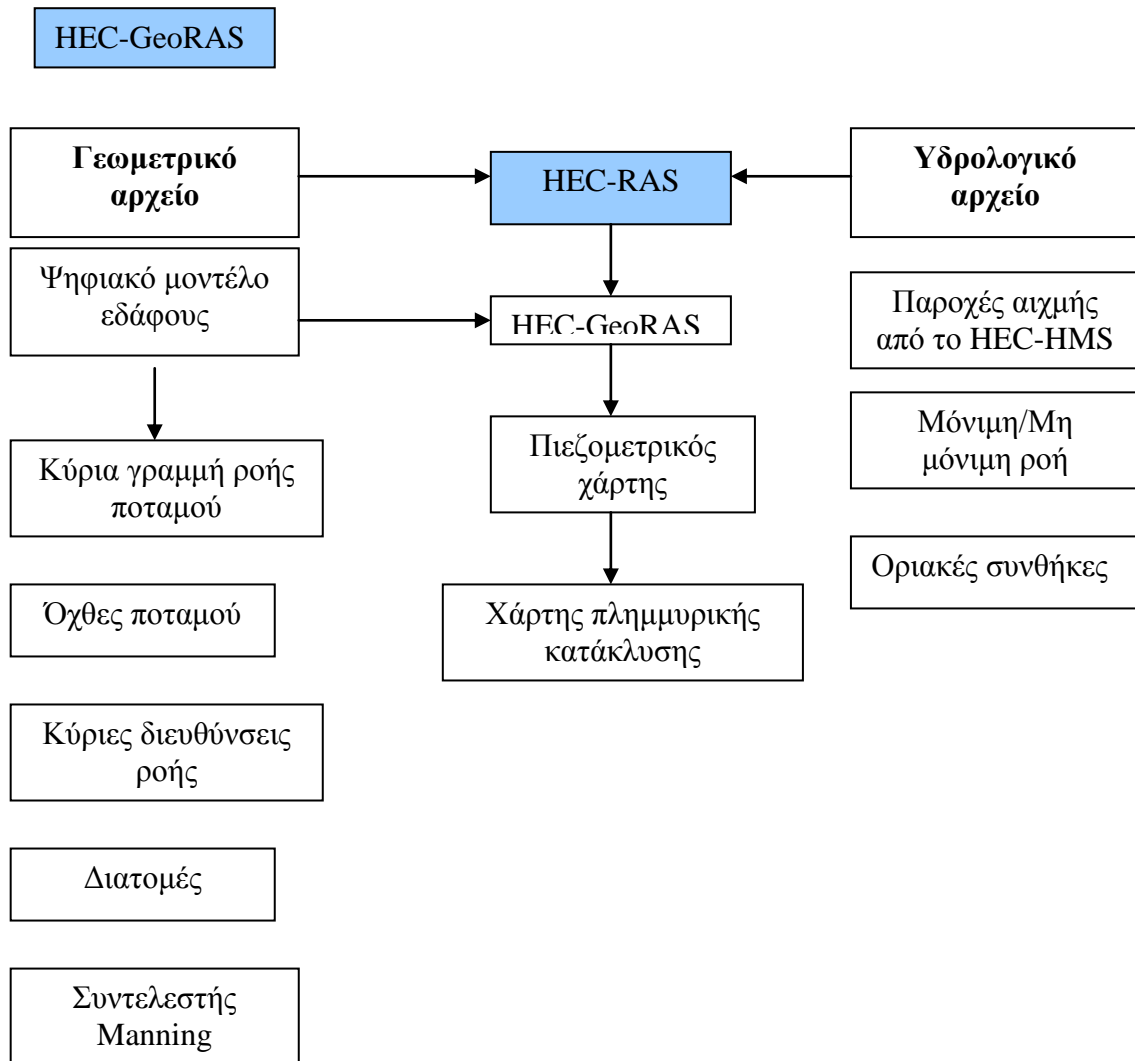
Έπειτα από την ολοκλήρωση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης, ακολουθεί η υδραυλική προσομοίωση τμήματος του ποταμού. Η διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη μονοδιάστατη ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων ή τεχνητών συστημάτων. Πρόκειται για ένα σύνολο μοντέλων με τέσσερις συνιστώσες ανάλυσης (Brunner, 2008):

1. Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής.
2. Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.
3. Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών.
4. Υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία του νερού.

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα υπολογίζει τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή, σε σύστημα υδατορευμάτων με τεχνητά συστήματα ή σε φυσικές κοίτες υδατορευμάτων, σε συνθήκες υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης ή και μεικτής ροής. Ακόμα, μπορεί να υπολογίσει, υδραυλικά άλματα, υδραυλικές συνθήκες σε γέφυρες, υπερχειλιστές, καθώς και τη διάβρωση της κοίτης στις γέφυρες. Τα βασικά μέρη του προγράμματος αυτού, είναι το γεωμετρικό αρχείο και το υδρολογικό αρχείο, τα οποία αναπτύσσονται παρακάτω.

Αρχικά, δημιουργείται ένα γεωμετρικό υπόβαθρο στο λογισμικό HEC-GeoRAS, μια επέκταση του προγράμματος ArcGis 9.3. Το λογισμικό αυτό, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο απαραίτητων γεωμετρικών δεδομένων (κοίτη

ποταμού, όχθες κ.α.) προτού τα εισάγει για τελική επεξεργασία στο HEC-RAS. Εφόσον ολοκληρωθεί η επεξεργασία στο HEC-GeoRAS και εξαχθεί το γεωμετρικό αρχείο, ακολουθούν οι υδρολογικές πληροφορίες (παροχές σχεδιασμού, συνθήκες μόνιμης ροής) όπως αναλύονται σε επόμενη ενότητα. Ακολουθεί σχεδιάγραμμα που παρουσιάζει την πορεία των εργασιών για την υδραυλική προσομοίωση (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1. Σχεδιάγραμμα πορείας εργασιών για την υδραυλική προσομοίωση και τη σύνθεση χαρτών.

4.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-GeoRAS

Δύο είναι τα βασικά μέρη του μενού στο λογισμικό HEC-GeoRAS, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 4.1.*, το RAS Geometry και το RAS Mapping. Το πρώτο αποτελείται από επιμέρους εντολές/ εργαλεία με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η προεπεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων για την εισαγωγή τους στο HEC-RAS, ενώ το δεύτερο επεξεργάζεται τα αποτελέσματα που εξάγονται από το HEC-RAS (Ackerman and Cameron, 2011).



Εικόνα 4.1. Η εργαλειοθήκη του HEC-GeoRAS.

Το πρωτογενές δεδομένο για να ξεκινήσει η προεπεξεργασία είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε μορφή tin, έχοντας σαν δεδομένα υψόμετρα και ισοϋψείς. Η δημιουργία έγινε με την εξής αλληλουχία εντολών:

3D analyst → Create/Modify TIN → Create TIN from features και επιλέγω το πεδίο με τα υψόμετρα (elevation) και τις ισοϋψείς (contour).

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία διαφόρων θεματικών επιπέδων RAS Geometry → Create RAS Layers.

Δίνεται πληθώρα επιλογών για τα θεματικά επίπεδα. Η δημιουργία τους εξαρτάται από το σκοπό της κάθε εργασίας. Ως υποχρεωτικά για τη δημιουργία τους θεωρούνται τα θεματικά επίπεδα (Ackerman and Cameron, 2011):

- Η κύρια γραμμή ροής ποταμού (Stream centerline)
- Οι διατομές (Cross section cut lines)

Ως προαιρετικά θεματικά επίπεδα θεωρούνται:

- Οι όχθες (Banks)
- Οι κύριες διευθύνσεις ροής (Flow path centerlines)
- Οι χρήσεις γης (Land use)
- Αναχώματα (Levees)
- Περιοχές ανενεργού ροής (Ineffective flow areas)
- Γέφυρες/ υπόγειους οχετούς (Bridges/ culverts)
- Περιοχές αποθήκευσης νερού (Floodplain storage areas)

Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν 5 θεματικά επίπεδα:

1. Η κύρια γραμμή ροής ποταμού

2. Οι όχθες
3. Οι κύριες διευθύνσεις ροής
4. Οι διατομές
5. Οι χρήσεις γης

4.2.1. Η κύρια γραμμή ροής ποταμού (stream centerline)


Από το μενού RAS Geometry → Create RAS Layers → Stream centerline δημιουργείται το θεματικό επίπεδο με το όνομα River. Στη συνέχεια, γίνεται ψηφιοποίηση από το μενού Editor → Start Editing και το εργαλείο σχεδίασης (sketch tool) (Εικόνα 4.2.), με βάση το υδρογραφικό δίκτυο όπως αυτό προέκυψε από την υδρολογική προεπεξεργασία της λεκάνης απορροής, στο λογισμικό HEC-GeoHMS. Εδώ, επιλέχθηκε να ψηφιοποιηθεί ο κύριος, βόρειος κλάδος του ποταμού, κατά μήκος του οποίου έχουν τοποθετηθεί σταθμηγράφοι, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.3. Η φορά της ψηφιοποίησης έγινε από τα ανάντη προς τα κατόντη.



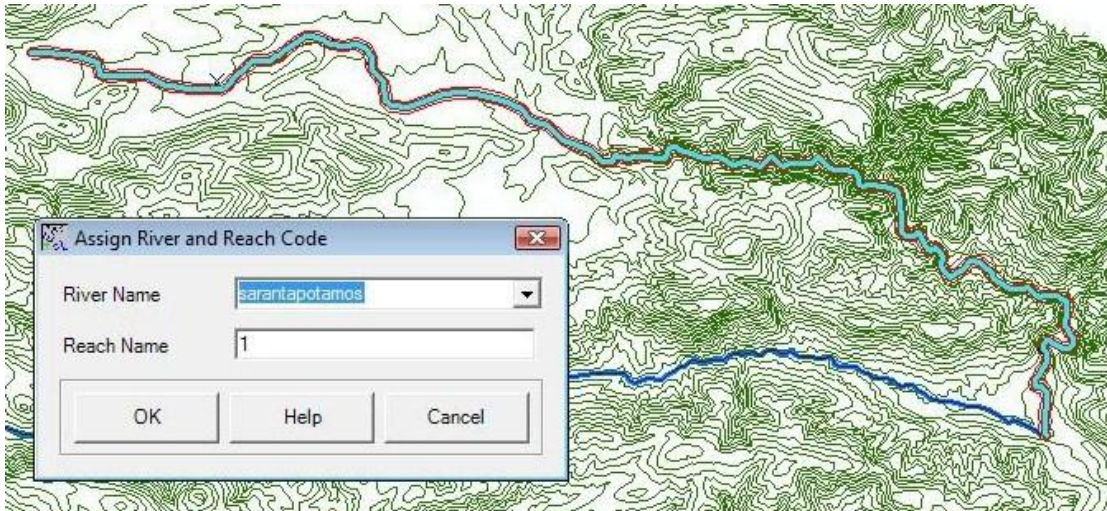
Εικόνα 4.2. Το μενού για τη ψηφιοποίηση των θεματικών επιπέδων.



Εικόνα 4.3. Η ψηφιοποιημένη κύρια γραμμή ροής του ποταμού.

Μετά την ολοκλήρωση της ψηφιοποίησης ακολουθεί η ονομασία της κύριας γραμμής ροής του ποταμού. Αυτό πραγματοποιείται με το εργαλείο  όπου επιλέγεται το

υδατόρευμα και δίνεται όνομα στην κύρια γραμμή ροής και στο αντίστοιχο τμήμα του (reach) (Εικόνα 4.4.)



Εικόνα 4.4. Η ονομασία της κύριας γραμμής ροής του ποταμού.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της κύριας γραμμής ροής του ποταμού, έτσι ώστε να συμπληρωθεί και ο αντίστοιχος πίνακας ιδιοτήτων. Η σειρά των εντολών έχει ως εξής: RAS Geometry → Stream Centerline Attributes → Topology/Length-Station/Elevation.

Με την εντολή *Topology*, ελέγχεται η σύνδεση και ο προσανατολισμός του υδρογραφικού δικτύου που έχει σχηματιστεί. Με την εντολή *Length-Station*, υπολογίζονται τα μήκη της κύριας γραμμής ροής για κάθε τμήμα και καθορίζεται η φορά ροής. Αυτό το εργαλείο χρησιμεύει και στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των διατομών, όπως παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα. Τέλος, η εντολή *Elevation*, μετατρέπει τη δισδιάστατη γραμμή ροής σε τρισδιάστατη χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Ωστόσο, αυτό το βήμα δεν είναι χρήσιμο, καθώς δε χρησιμοποιούνται δεδομένα υψομέτρων στο HEC-RAS (Ackerman and Cameron, 2011).

4.2.2. Οι όχθες (bank lines)

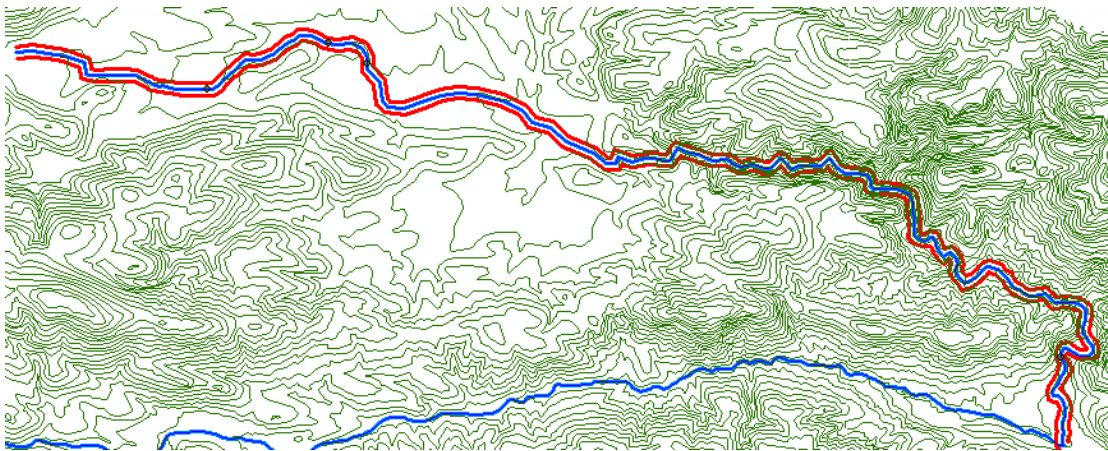
Οι όχθες του ποταμού είναι δυο πολυγωνικές γραμμές που δημιουργούνται εκατέρωθεν αυτού. Ουσιαστικά διαχωρίζουν τη ροή εντός και εκτός της κοίτης του υδατορεύματος. Η δημιουργία αυτού του θεματικού επιπέδου μπορεί να θεωρείται προαιρετική, ωστόσο διευκολύνει στο μετέπειτα ορισμό των οχθών στο HEC-RAS. Οι κανόνες που ακολουθούνται στη χάραξη των οχθών είναι ότι (Ackerman and Cameron, 2011):

Οι δυο αυτές γραμμές των οχθών θα πρέπει να τέμνουν την κάθε διατομή.

- Ο προσανατολισμός τους δεν έχει σημασία, κατά τη χάραξη.
- Οι γραμμές αυτές μπορεί να είναι συνεχόμενες ή διακοπτόμενες.

Η χάραξη των οχθών γίνεται όπως και στην κύρια γραμμής ροής του ποταμού με την ενεργοποίηση του μενού *editor* για ψηφιοποίηση, εφόσον έχει δημιουργηθεί το θεματικό πεδίο: RAS Geometry → Create RAS Layers → Bank lines

Η ψηφιοποίηση μπορεί να γίνει χειροκίνητα παράλληλα στην κύρια γραμμής ροής του ποταμού δεξιά και αριστερά αυτής, ωστόσο χάριν ευκολίας μπορεί να αντιγραφεί και να τοποθετηθεί σε επιθυμητή απόσταση μέσω της εντολής *copy parallel* από το μενού *editor*. Η απόσταση που επιλέχθηκε είναι 2.5 m.



Εικόνα 4.5. Οι κύριες γραμμές των οχθών.

4.2.3. Οι κύριες διευθύνσεις ροής (Flow path centerlines)

Οι κύριες διευθύνσεις ροής είναι επίσης ένα προαιρετικό πεδίο, ωστόσο είναι απαραίτητο για τη συμπλήρωση της απόστασης κάθε διατομής από την κατάντη διατομή, όπως προκύπτει στο επόμενο βήμα. Δημιουργείται κατά τα γνωστά, RAS Geometry → Create RAS Layers → Flow path centerlines



Οι κύριες διευθύνσεις ροής δημιουργούνται αυτόματα κατά τη διεύθυνση ροής από τα ανάντη προς τα κατάντη. Εφόσον έχει ήδη δημιουργηθεί η κύρια γραμμής ροής του ποταμού, αυτή ουσιαστικά αντιγράφεται για να γίνει η κύρια διεύθυνση ροής στην κύρια κοίτη του ποταμού (Ackerman and Cameron, 2011).

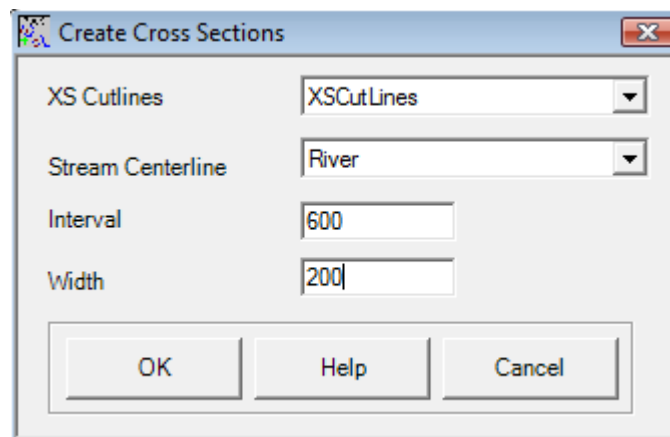
4.2.4. Οι διατομές (Cross section cut lines)

Οι διατομές είναι το βασικό θεματικό επίπεδο που ενδιαφέρει, καθώς εξάγει υψόμετρα εδάφους στο HEC-RAS και δίνει μια «εικόνα» του εδάφους στην κοίτη του ποταμού. Οι βασικοί κανόνες που διέπουν το σχεδιασμό τους είναι οι ακόλουθοι (Ackerman and Cameron, 2011):

- Να σχεδιάζονται από την αριστερή όχθη προς τη δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη.
- Να μην τέμνονται μεταξύ τους και να τέμνουν την κύρια γραμμή ροής του ποταμού ακριβώς μια φορά.
- Και κυρίως, να είναι κάθετες στη διεύθυνση ροής του ποταμού.

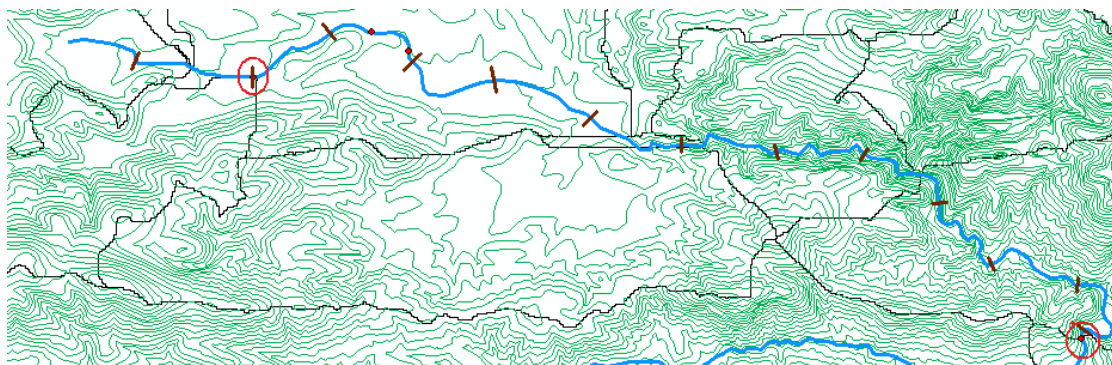
Η δημιουργία του θεματικού επιπέδου γίνεται με τις επιλογές: RAS Geometry → Create RAS Layers → XS Cut Lines.

Ο σχεδιασμός των διατομών μπορεί να γίνει μία προς μία χειροκίνητα με το σχεδιαστικό εργαλείο  της ψηφιοποίησης και το αντίστοιχο μενού *editor*. Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης παραγωγής διατομών με τη βοήθεια του εργαλείου *Construct XS Cut Lines* . Ο χρήστης μπορεί να ορίσει την απόσταση μεταξύ των διατομών και το μήκος αυτών, όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.6*.




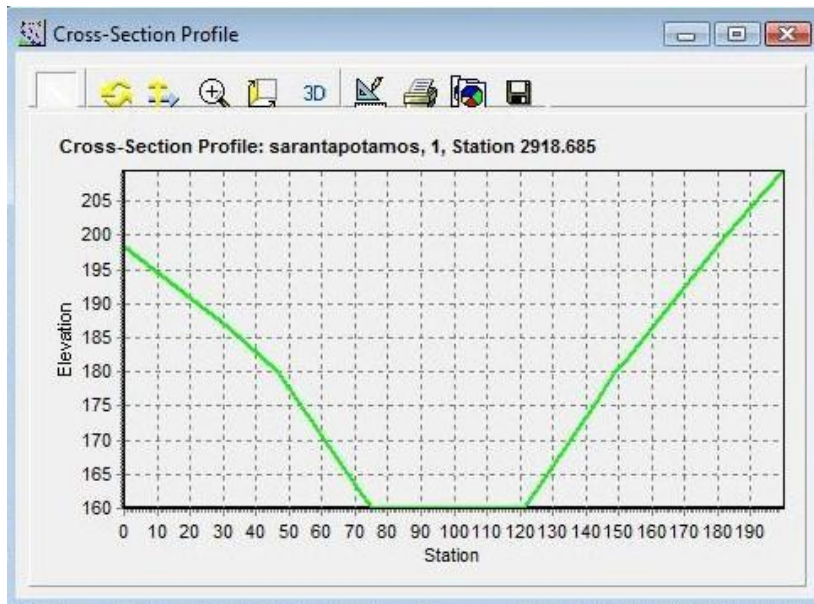
Εικόνα 4.6. Ορισμός απόστασης και μήκους των διατομών.

Στην παρούσα εργασία, έγινε επιλογή των διατομών που θα μελετηθούν και θα εισαχθούν στο HEC-RAS, έτσι ώστε να βρίσκονται σε χαρακτηριστικά σημεία των λεκανών απορροής (αρχή/μέση/τέλος, *Εικόνα 4.7*). Δύο από αυτές δημιουργήθηκαν εξ ολοκλήρου στο HEC-RAS βάση τοπογραφικών διαγραμμάτων στις δύο θέσεις μέτρησης (Οινόη και Μαγούλα).



Εικόνα 4.7. Το θεματικό επίπεδο των διατομών.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα προεπισκόπησης της κάθε διατομής με τη βοήθεια του εργαλείου Plot Cross Section  , ενδεικτικά παρουσιάζεται μια τυχαία διατομή:



Εικόνα 4.8. Μια τυχαία διατομή της κύριας κοίτης του ποταμού μελέτης.

Πριν την εξαγωγή των δεδομένων στο HEC-RAS, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των διατομών με την εφαρμογή μιας σειράς εντολών από το μενού: RAS Geometry → XS Cut Line Attributes. Σε κάθε μια διατομή, συμπληρώνεται και το αντίστοιχο πεδίο στον πίνακα ιδιοτήτων των διατομών. Συγκεκριμένα με την εντολή:

River/Reach Names: Συμπληρώνονται τα ονόματα της κύριας κοίτης και του αντίστοιχου κλάδου (Σαρανταπόταμος/ 1) για κάθε διατομή.

Stationing: Συμπληρώνεται ο σταθμός του ποταμού (river station) σε κάθε διατομή. Το πρόγραμμα υπολογίζει ουσιαστικά την απόσταση της διατομής από το αρχικό κατάντη τμήμα του ποταμού (σημείο εξόδου).

Bank Stations: Για τη συμπλήρωση αυτού του πεδίου (left bank, right bank) χρησιμοποιείται το θεματικό επίπεδο των οχθών. Υπολογίζεται το ποσοστό του μήκους της διατομής από την αριστερή πλευρά, μέχρι το σημείο που αυτή τέμνει τη δεξιά και την αριστερή όχθη αντίστοιχα.

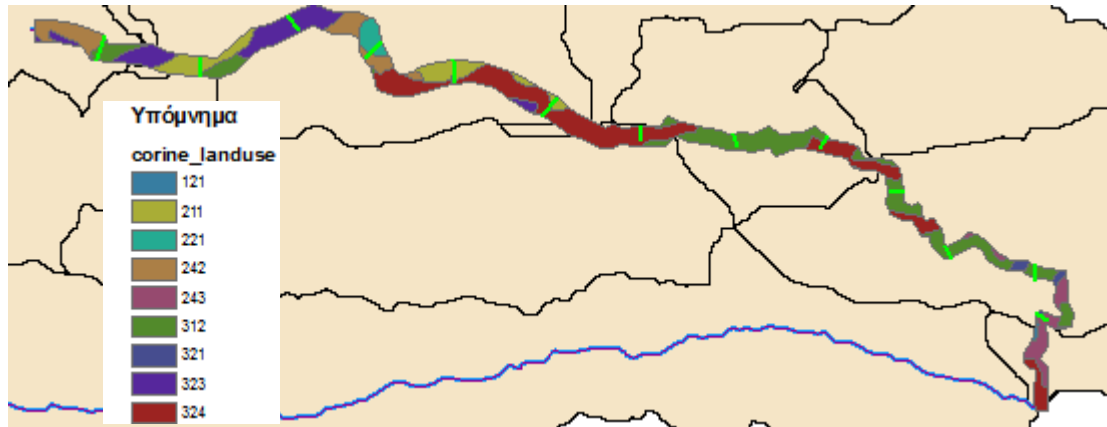
Downstream Reach Lengths: Υπολογίζεται η απόσταση μέχρι την κατάντη διατομή βάση του θεματικού επιπέδου των κύριων διευθύνσεων ροής.

Elevation: Δημιουργείται ένα νέο θεματικό επίπεδο διατομών (XSCutLines3D) σε τρισδιάστατη μορφή λαμβάνοντας υπόψη το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (tin).

4.2.5 . Οι χρήσεις γης (Landuse Areas)

Το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης χρησιμεύει στην εξαγωγή των τιμών του συντελεστή Manning στη θέση της κάθε διατομής. Αρχικά, δημιουργείται το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης: RAS Geometry → Create RAS Layers → Landuse Areas.

Στη συνέχεια, επιλέγεται το μενού της ψηφιοποίησης *editor* και δημιουργείται ένα πολύγωνο ορισμένο στις όχθες του υδατορεύματος. Ενώνοντας, μέσω της εντολής clip του Arc toolbox, τις χρήσεις γης για όλη τη λεκάνη απορροής (Χάρτης 3.1) με το νέο πολύγωνο των χρήσεων γης (landuse) προκύπτει ένα θεματικό επίπεδο που περιέχει τις χρήσεις γης στην περιοχή που ενδιαφέρει, έτσι ώστε να προκύψει ο συντελεστής Manning για την κάθε διατομή.



Εικόνα 4.9. Οι χρήσεις γης κατά μήκος του ποταμού.

Ακολούθως, δημιουργείται ένας πίνακας που περιέχει μια τιμή του συντελεστή Manning για κάθε διατομή, μέσω της εντολής: RAS Geometry → Manning's n Values → Create LU Manning table και τέλος, εξάγονται οι τιμές που αφορούν κάθε διατομή σε νέο πίνακα μέσω της εντολής RAS Geometry → Manning n' values → Extract N values (Εικόνα 4.10).

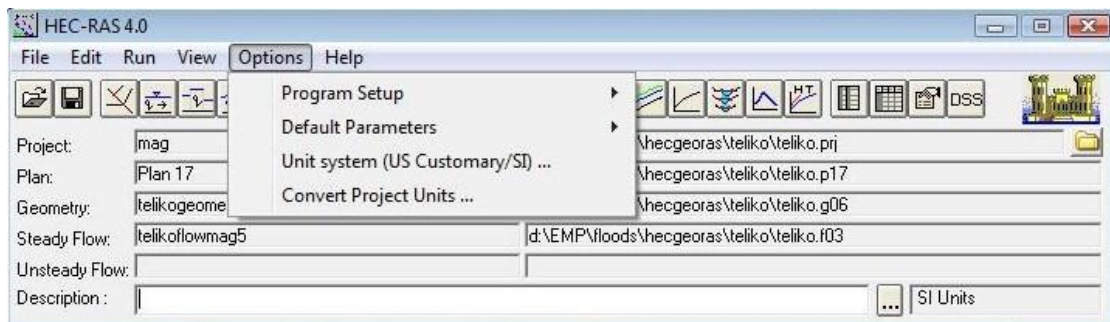
OBJECTID	LUCode	N_Value
19	312	0.045
20	324	0.03
21	242	0.045
22	323	0.045
23	211	0.04
24	221	0.04
25	243	0.035
26	321	0.042
27	121	0.015

Εικόνα 4.10. Απόδοση τιμών συντελεστών Manning σύμφωνα με τις χρήσεις γης.

Η απόδοση τιμών στους συντελεστές Manning έγινε μέσω ειδικού πίνακα που βρίσκεται στο manual του HEC-RAS. Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας των απαραίτητων θεματικών πεδίων, ακολουθεί η εξαγωγή του γεωμετρικού αρχείου στο HEC-RAS. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής: RAS Geometry → Export RAS data.

4.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-RAS

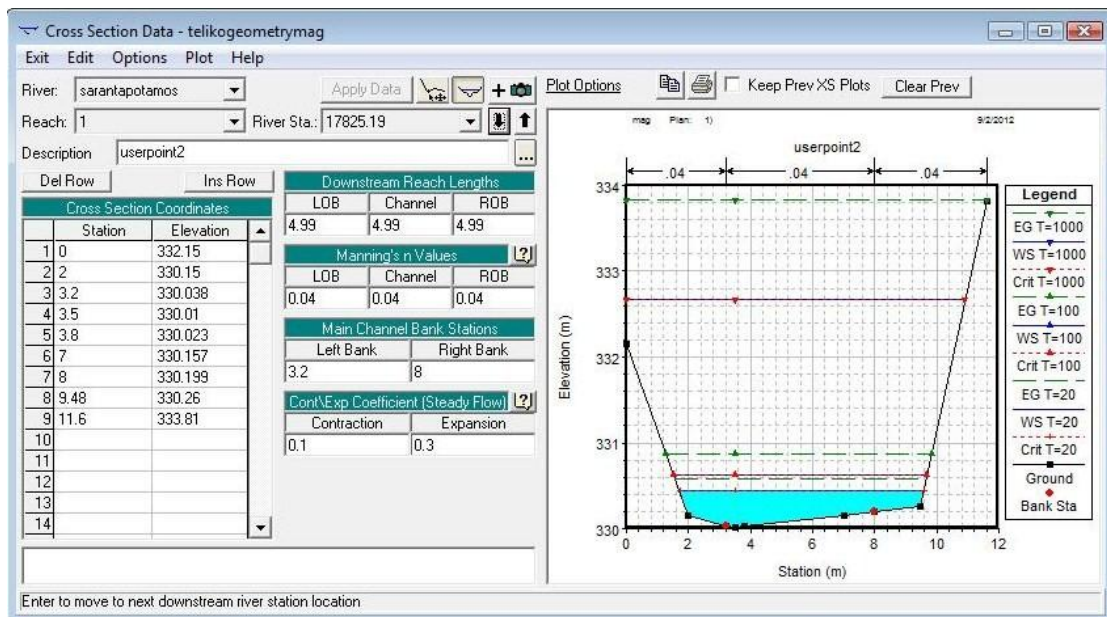
Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο project με τις εξής εντολές: File → New Project. Από τις κεντρικές επιλογές του προγράμματος γίνεται η επιλογή των μονάδων μέτρησης, στο μετρικό σύστημα (metric system S.I.).



Εικόνα 4.11. Το κεντρικό μενού του προγράμματος HEC-RAS.

Η εισαγωγή του γεωμετρικού αρχείου γίνεται μέσω της εντολής Edit → Geometric data και στη συνέχεια από το παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων, επιλέγεται η εντολή: File → Import Geometry Data → GIS Format.

Τα χαρακτηριστικά της κάθε διατομής παρουσιάζονται στο παράθυρο Cross section data (Edit cross section), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

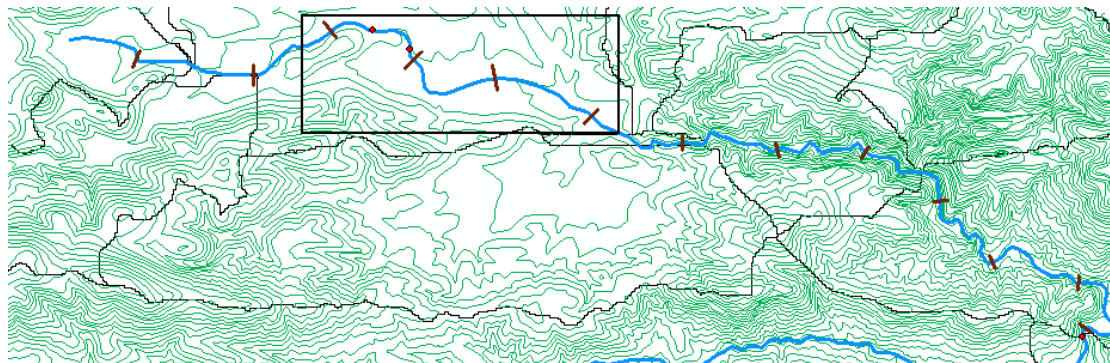


Εικόνα 4.12. Η διατομή στο σταθμό μέτρησης στην περιοχή Οινόη.

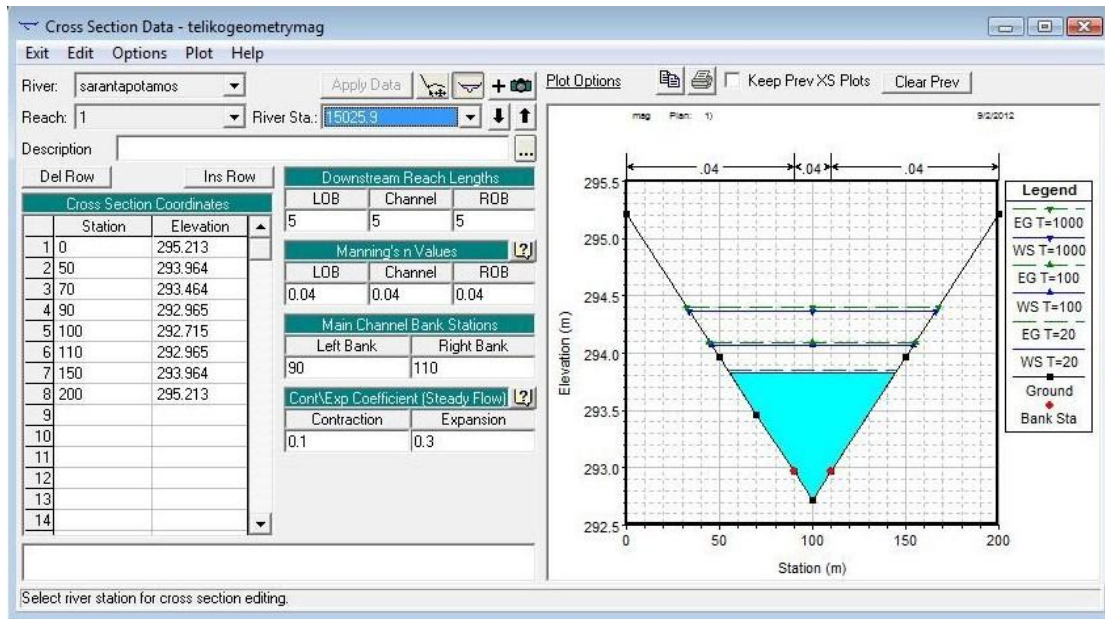
- *River/ Reach*: Το όνομα του ποταμού και το αντίστοιχο τμήμα στο οποίο ανήκει η διατομή.
- *River Station*: Ο κωδικός αριθμός της διατομής, πρόκειται για την απόσταση της διατομής από το αρχικό κατάντη τμήμα του ποταμού.
- *Cross Section Coordinates*: Πίνακας που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά σημεία της διατομής. Συγκεκριμένα, την απόσταση τους από το αριστερό άκρο της διατομής (Station) με τα αντίστοιχα υψόμετρα τους (Elevation).
- *Downstream Reach Lengths*: Η απόσταση της κάθε διατομής από την κατάντη της.
- *Manning's n Values*: Οι τιμές του συντελεστή manning για την αριστερή και δεξιά όχθη και την κύρια κοίτη του ποταμού.
- *Main Channel Bank Stations*: Οι αποστάσεις της αριστερής και δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής. Στην παρούσα εργασία, σε ορισμένες διατομές έγινε προσαρμογή των οχθών σύμφωνα με το σχήμα της κάθε διατομής.
- *Cont / Exp Coefficients*: Οι συντελεστές συστολής/διαστολής για το μετέπειτα υπολογισμό των τοπικών απωλειών. Οι τιμές είναι default από το πρόγραμμα για τη μόνιμη ροή.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των διατομών προκύπτουν από την προεπεξεργασία του ποταμού και των λοιπών θεματικών επιπέδων στο HEC-GeoRAS.

Στην παρούσα εργασία, υπήρξαν προβλήματα στην απεικόνιση των διατομών στα σημεία όπου οι ισοϋψείς ήταν πολύ αραιές (ισοδιάσταση 20 m). Στην περίπτωση αυτή, η διατομή παρουσιαζόταν σε ένα υψόμετρο (πεδιάδα), (Εικόνα 4.13.), γεγονός που δημιουργούσε προβλήματα στους μετέπειτα υδραυλικούς υπολογισμούς. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, οι εν λόγω διατομές δημιουργήθηκαν με μεγαλύτερο πλάτος (1000 m έναντι 200 m). Ωστόσο, για την τελική εισαγωγή τους στο HEC-RAS, έγινε προσαρμογή έτσι ώστε το πλάτος τους να μην ξεπερνά τα 200 m (Εικόνα 4.14.).

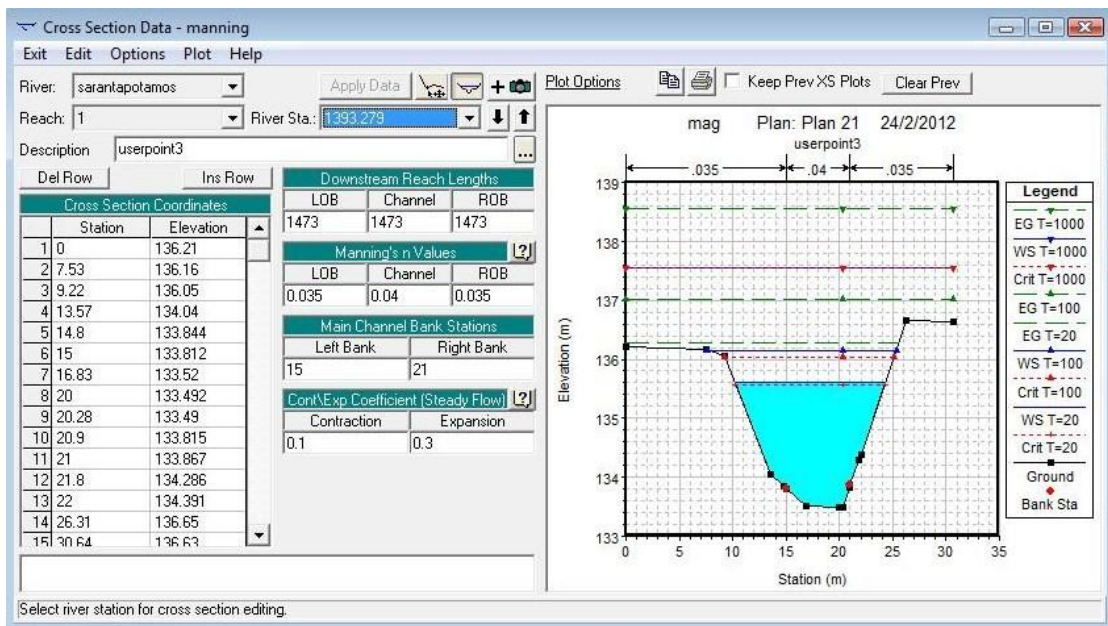


Εικόνα 4.13. Το σημείο όπου οι διατομές υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 4.14. Μια τυχαία διατομή μετά από επεξεργασία.

Τέλος, στα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί σταθμοί μέτρησης, δημιουργήθηκαν εκ νέου οι διατομές στο HEC-RAS με βάση τα τοπογραφικά διαγράμματα της περιοχής στα εν λόγω σημεία, (Εικόνα 4.12. και Εικόνα 4.15.).



Εικόνα 4.15. Η διατομή στο σταθμηγράφο στην περιοχή Μαγούλα.

4.4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ HEC-RAS

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε να γίνει η υδραυλική προσομοίωση του ποταμού σε συνθήκες μόνιμης ροής. Έτσι από το μενού, Edit → Steady Flow Data, γίνεται η επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων.

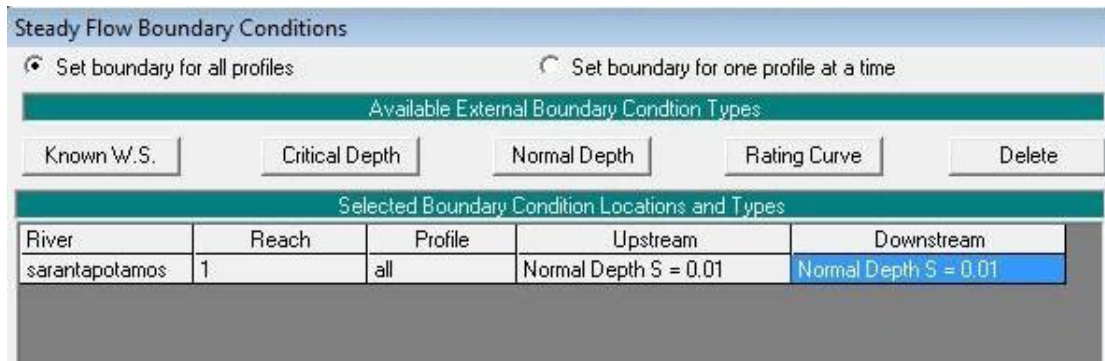
Στο παράθυρο των δεδομένων των συνθηκών μόνιμης ροής, εισάγεται αρχικά ο αριθμός των προφίλ, για καθένα από τα οποία συμπληρώνονται οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές για την κάθε διατομή, όπως προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS. Τα προφίλ, εδώ είναι τρία, $T=20$, $T=100$ και $T=1000$. Η μετονομασία των επιλεγμένων προφίλ επιτυγχάνεται μέσω της εντολής: Options → Edit Profile Names.

Flow Change Location				Profile Names and Flow Rates		
	River	Reach	RS	T=20	T=100	T=1000
1	sarantapotamos	1	20018.6E	0.964	4.685	89.9
2	sarantapotamos	1	17825.1E	4.019	8.276	105.964
3	sarantapotamos	1	15025.9	27.689	47.01	80.536
4	sarantapotamos	1	13525.9	27.689	47.01	80.536
5	sarantapotamos	1	10418.6E	0.035	0.108	0.277
6	sarantapotamos	1	9618.68E	0.034	0.346	2.088
7	sarantapotamos	1	9018.68E	0.034	0.346	2.088
8	sarantapotamos	1	7218.68E	0.034	0.346	2.088
9	sarantapotamos	1	6418.68E	0.44	2.269	9.842
10	sarantapotamos	1	6018.68E	0.44	2.269	9.842
11	sarantapotamos	1	4818.68E	0.44	2.269	9.842
12	sarantapotamos	1	3218.68E	0.44	2.269	9.842
13	sarantapotamos	1	3018.68E	0.44	2.269	9.842
14	sarantapotamos	1	1393.27E	69.81	109.865	282.184

Εικόνα 4.16. Υδρολογικά δεδομένα σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Για να ολοκληρωθεί η εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων, γίνεται η επιλογή των οριακών συνθηκών (Reach Boundary Conditions). Ο ορισμός των οριακών συνθηκών είναι απαραίτητος για να ξεκινήσει ο υπολογισμός της αρχικής επιφάνειας του νερού και οι μετέπειτα υπολογισμοί της εξίσωσης ενέργειας. Ανάλογα με το καθεστώς ροής που επικρατεί στο υδατόρευμα (υποκρίσιμη/ υπερκρίσιμη ροή), ορίζεται και η θέση των οριακών συνθηκών. Στην *υποκρίσιμη ροή*, οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες στο κατάντη τμήμα του ποταμού, ενώ οι υπολογισμοί ξεκινούν από τα ανάντη προς τα κατάντη. Αντίστοιχα, στην *υπερκρίσιμη ροή*, οι οριακές συνθήκες έχουν νόημα μόνο στην ανάντη θέση με τους υπολογισμούς να αρχίζουν από τα κατάντη προς τα ανάντη. Στην περίπτωση της *μεικτής ροής*, οι οριακές συνθήκες ορίζονται και στα δύο άκρα του ποταμού. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μεικτή ροή, καθώς παρατηρούνται ήπιες κλίσεις εδάφους σε κάποια σημεία του υδατορεύματος, αλλά

και εντονότερες κλίσεις σε άλλα σημεία. Συνεπώς, οι οριακές συνθήκες ορίστηκαν και στην κατάντη και στην ανάντη θέση.



Εικόνα 4.17. Ορισμός οριακών συνθηκών για μόνιμη ροή.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους οριακών συνθηκών, συγκεκριμένα (Brunner, 2008):

- *Known Water Surface Elevation* (Γνωστό πιεζομετρικό φορτίο): Σε αυτή την οριακή συνθήκη πρέπει να εισαχθεί ένα γνωστό πιεζομετρικό φορτίο για κάθε προφίλ.
- *Critical Depth* (Κρίσιμο βάθος): Με αυτήν την επιλογή δε χρειάζεται καμία επιπλέον πληροφορία. Το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος για κάθε προφίλ και το χρησιμοποιεί σαν οριακή συνθήκη.
- *Normal Depth* (Ομοιόμορφο βάθος): Σε αυτή την οριακή συνθήκη, εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, βάση της οποίας υπολογίζεται το ομοιόμορφο βάθος με την εξίσωση manning. Γενικά, η κλίση της γραμμής ενέργειας προσδιορίζεται κατά προσέγγιση ως η μέση κλίση της κύριας κοίτης του υδατορεύματος.
- *Rating Curve* (Καμπύλη στάθμης – παροχής): Η οριακή αυτή συνθήκη προϋποθέτει την εισαγωγή ζευγών τιμών στάθμης – παροχής. Από την καμπύλη αυτή το πρόγραμμα μπορεί με παρεμβολή να υπολογίσει το πιεζομετρικό φορτίο για την αντίστοιχη παροχή.

Στην παρούσα εργασία, λόγω έλλειψης υδρομετρικών δεδομένων, ως οριακή συνθήκη επιλέχθηκε το ομοιόμορφο βάθος. Η κλίση γραμμής ενέργειας υπολογίστηκε από το προφίλ του υδατορεύματος (profile plot) ίση με 0.01.

4.5. ΟΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

4.5.1. Προετοιμασία γεωμετρικού και υδρολογικού αρχείου για τους υπολογισμούς

Από το βασικό μενού του προγράμματος, επιλέγεται: Run →Steady Flow analysis. Και στο παράθυρο της ανάλυσης της μόνιμης ροής, επιλέγονται το επιθυμητό γεωμετρικό και υδρολογικό αρχείο, το καθεστώς ροής (υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη, μικτή) και τελικώς η εντολή Compute.

Η πρώτη προσπάθεια υδραυλικής προσομοίωσης και των αντίστοιχων υπολογισμών, χωρίς κάποια περαιτέρω ρύθμιση, παρουσίασε σφάλματα και προειδοποιήσεις (warnings) στους τελικούς συγκεντρωτικούς πίνακες για κάθε διατομή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποια από αυτά:

Πίνακας 4.1. Παρουσίαση πιο συχνών σφαλμάτων κατά τους υδραυλικούς υπολογισμούς.

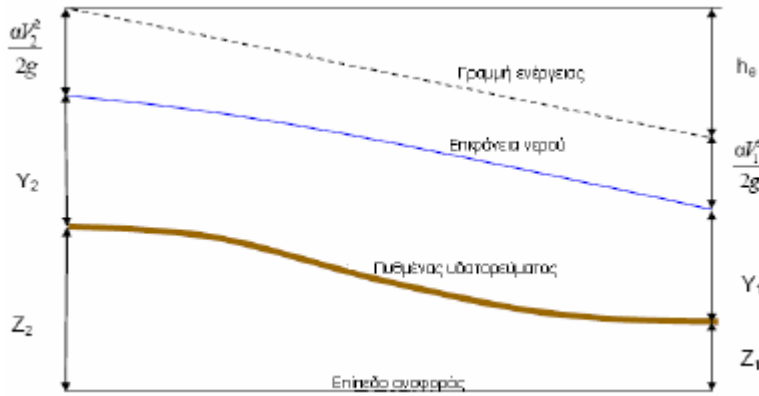
Warnings	Αντιμετώπιση
The velocity head has changed more than 0.5 ft (0.15 m). This may indicate the need for additional cross sections.	Εισαγωγή ενδιάμεσων διατομών ανά 5 m και σε ορισμένα σημεία ανά 1 m (εντολή interpolation).
The conveyance ratio (upstream conveyance divided by downstream conveyance) is less than 0.7 or greater than 1.4. This may indicate the need for additional cross sections.	Εισαγωγή ενδιάμεσων διατομών ανά 5 m και σε ορισμένα σημεία ανά 1 m (εντολή interpolation).
The energy equation could not be balanced with the specified number of iterations. The program used critical depth for water surface and continued on with the calculations.	Παρεμβολή βαθμιαίως αυξανόμενων παροχών στις διατομές με μεγάλες αποκλίσεις στις παροχές αιχμής (π.χ. από 4 m ³ /s να ακολουθούν 28 m ³ /s).
During the standard step iterations, when the assumed water surface was set equal to critical depth, the calculated water surface came back below critical depth. This indicates that there is not a valid subcritical answer. The program defaulted to critical depth.	Αυτό το μήνυμα είναι λογικό όταν από την υποκρίσιμη ροή σε μια διατομή μεταβαίνει σε υπερκρίσιμη ροή στην αμέσως κατάντη διατομή.

4.5.2. Το θεωρητικό υπόβαθρο των υπολογισμών

Το πρόγραμμα HEC-RAS υπολογίζει το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε διατομή, επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας (4.1) μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών.

$$z_2 + y_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = z_1 + y_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (4.1)$$

- Όπου, z_1, z_2 : υψόμετρα του πυθμένα του υδατορεύματος από το επίπεδο αναφοράς,
 y_1, y_2 : βάθη νερού στις διαδοχικές διατομές,
 v_1, v_2 : μέσες ταχύτητες διατομών (παροχή/εμβαδόν διατομής),
 a_1, a_2 : διορθωτικοί συντελεστές κινητικής ενέργειας ταχύτητας
 g : επιτάχυνση βαρύτητας
 h_e : ολικές απώλειες ενέργειας (γραμμικές και τοπικές)



Διάγραμμα 4.1. Τα βασικά μεγέθη της εξίσωσης ενέργειας (Πηγή: Brunner, 2008)

Οι ολικές απώλειες ενέργειας h_e συνίστανται στις γραμμικές απώλειες, στις απώλειες λόγω τριβής και συστολής/ διαστολής μεταξύ των διαδοχικών διατομών, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.2):

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (4.2)$$

- L η μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών
 \bar{S}_f οι απώλειες λόγω τριβής
 C ο συντελεστής συστολής/διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας

$\left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right|$ η διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

i. Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας

Οι γραμμικές απώλειες L υπολογίζονται από τη σχέση (4.3), σε συνάρτηση με τις μέσες παροχές μεταξύ διαδοχικών διατομών:

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (4.3)$$

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} οι αποστάσεις της αριστερής όχθης, του κύριου υδατορεύματος και της δεξιάς όχθης, μεταξύ διαδοχικών διατομών όπως υπολογίστηκαν στο γεωμετρικό αρχείο (downstream reach length)

Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{rob} οι μέσες παροχές στο αριστερό τμήμα της διατομής, στην κύρια κοίτη και στο δεξί τμήμα αυτής.

Πριν τον υπολογισμό των απωλειών τριβής, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς K για κάθε διατομή. Η μέθοδος υπολογισμού επιλέγεται από την εντολή Run → Options → Conveyance calculations → At breaks in n values only. Ουσιαστικά, χωρίζεται η διατομή σε επιμέρους τμήματα (εκτός του διαχωρισμού σε αριστερή όχθη, κύρια κοίτη και δεξιά όχθη) για κάθε διαφορετική τιμή Manning n . Ο συντελεστής μεταφοράς K , υπολογίζεται από τη σχέση:

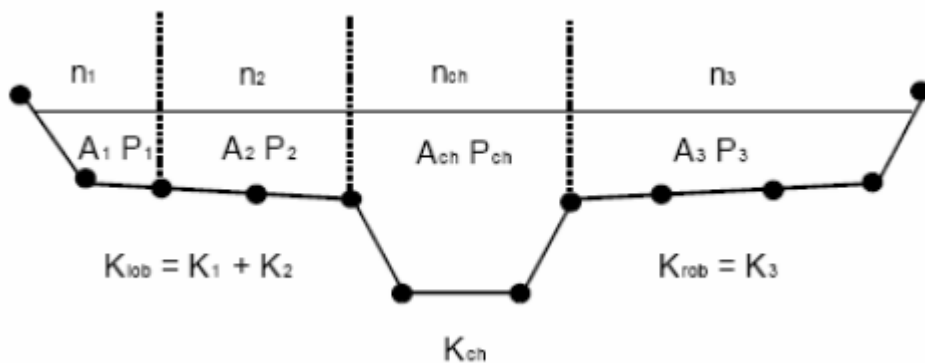
$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (4.4)$$

n ο συντελεστής Manning

A το εμβαδόν της διατομής

R η υδραυλική ακτίνα (A/P , P : η βρεχόμενη περίμετρος)

Για κάθε τιμή του συντελεστή Manning n_i , υπολογίζεται και ο αντίστοιχος συντελεστής K_i , (εξ. 4.4), και οι επιμέρους τιμές αθροίζονται έτσι ώστε τελικά να προκύψει μια τιμή K για την αριστερή όχθη (K_{lob}), μια τιμή για τη δεξιά όχθη (K_{rob}) και μια τιμή για την κύρια κοίτη (K_{ch}), (Σχήμα 4.1.). Ο ολικός συντελεστής K για τη διατομή προκύπτει από το άθροισμα $K_{lob} + K_{ch} + K_{rob}$.



Σχήμα 4.2. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφορά K για όλη τη διατομή (Πηγή: Brunner, 2008).

ii. Οι απώλειες λόγω τριβής

Η μέση κλίση γραμμής ενέργειας \bar{S}_f υπολογίζεται από το πρόγραμμα μέσω της εντολής Run → Options → Friction slope method. Η γενική μορφή της εξίσωσης που δίνει τη μέση κλίση γραμμής ενέργειας είναι:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (4.5)$$

Το πρόγραμμα HEC-RAS δίνει τη δυνατότητα επιλογής εναλλακτικών μορφών της παραπάνω εξίσωσης (4.5) για τον υπολογισμό της μέσης κλίσης. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος *average conveyance*, η οποία συνιστάται για μόνιμη ροή. Η εξίσωση που αντιστοιχεί στην εν λόγω μέθοδο είναι:

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (4.6)$$

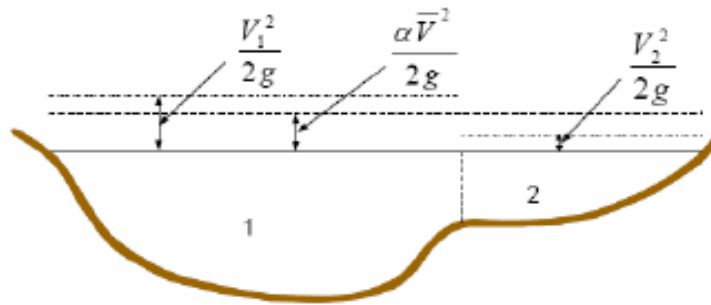
Q_1, Q_2 οι μέσες παροχές στις δύο διαδοχικές διατομές

K_1, K_2 οι συντελεστές μεταφοράς για κάθε διατομή

iii. Οι τοπικές απώλειες ενέργειας

Για την εύρεση των ολικών απωλειών ενέργειας, το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός των τοπικών απωλειών ενέργειας, ήτοι η διαφορά της μέσης κινητικής ενέργειας κάθε διατομής.

Για v_1, v_2 οι μέσες ταχύτητες διατομών, v η μέση ταχύτητα όλης της διατομής και Q_1, Q_2 οι μέσες παροχές στις δύο διαδοχικές διατομές, ισχύει η σχέση (εξ. 4.7) σύμφωνα και με το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.3. Υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής (Πηγή: Brunner, 2008).

$$\alpha \frac{v^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{v_1^2}{2g} + Q_2 \frac{v_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (4.7)$$

Από τη σχέση (4.7) και απλοποιώντας την επιτάχυνση βαρύτητας προκύπτει ο διορθωτικός συντελεστής κινητικής ενέργειας α :

$$\alpha = \frac{Q_1 v_1^2 + Q_2 v_2^2}{(Q_1 + Q_2) v^2} \quad (4.8)$$

Επομένως, μπορεί πλέον να υπολογιστεί η διαφορά της μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής.

Το τελευταίο κομμάτι που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ο συντελεστής συστολής/διαστολής (contraction/expansion). Το πρόγραμμα θεωρεί ότι η συστολή στη ροή συμβαίνει όταν η μέση ταχύτητα κατάντη είναι μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα ανάντη, και αντίστοιχα η διαστολή, όταν η μέση ταχύτητα ανάντη είναι μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα κατάντη. Για υποκρίσιμη ροή οι συντελεστές αυτοί παίρνουν τυπικές τιμές 0.1 και 0.3 αντίστοιχα, ενώ στην υπερκρίσιμη ροή οι τυπικές τιμές είναι 0.01 και 0.03 αντίστοιχα (Brunner, 2008), όπως αποδεικνύεται και στα αποτελέσματα.

Τελικά, έχοντας όλα τα δεδομένα υπολογίζονται οι ολικές απώλειες ενέργειας (εξ. 4.2) και κατ' επέκταση ξεκινούν οι υπολογισμοί στην εξίσωση ενέργειας (εξ. 4.1).

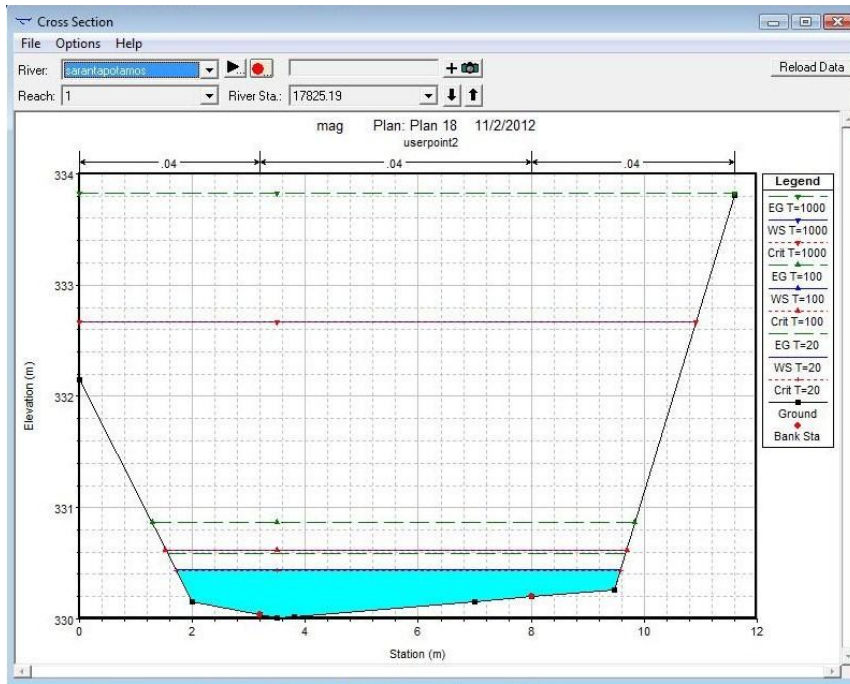
Ουσιαστικά, εφαρμόζεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του πιεζομετρικού φορτίου σε κάθε διατομή (WS), βασιζόμενος στην εξίσωση ενέργειας (εξ. 4.1) και στην εξίσωση απωλειών (εξ. 4.2). Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα υποθέτει ένα αρχικό πιεζομετρικό φορτίο για την ανάντη διατομή, εάν πρόκειται για υποκρίσιμη ροή (και αντίστοιχα στην κατάντη διατομή για υπερκρίσιμη ροή), και βάση αυτού, υπολογίζει το συντελεστή μεταφοράς K (εξ. 4.4) και τη μέση ταχύτητα (παροχή/εμβαδόν). Έχοντας τις τιμές αυτές, στη συνέχεια, υπολογίζει τη μέση κλίση γραμμής ενέργειας S_f και τέλος τις ολικές απώλειες ενέργειας (εξ. 4.2). Με την εξίσωση ενέργειας (εξ. 4.1) υπολογίζει τελικά το πιεζομετρικό φορτίο της διατομής. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη σύγκριση της υπολογισμένης τιμής και της τιμής που τέθηκε αρχικά, και ελέγχεται αν συγκλίνει σε ένα επιτρεπτό όριο.

Τέλος, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος με μέθοδο που ορίζεται από την εντολή *Critical Depth Computation Method* (Run → Steady Flow analysis → Options) και το συγκρίνει με το πιεζομετρικό βάθος στην διατομή μελέτης, συμβάλλοντας στον έλεγχο της ορθότητας των εισαχθέντων δεδομένων. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους επελέγη η παραβολική μέθοδος, η οποία είναι η ταχύτερη και προτείνεται από τους κατασκευαστές του HEC-RAS (Brunner, 2008).

4.5.3. Τα αποτελέσματα στις διατομές μελέτης

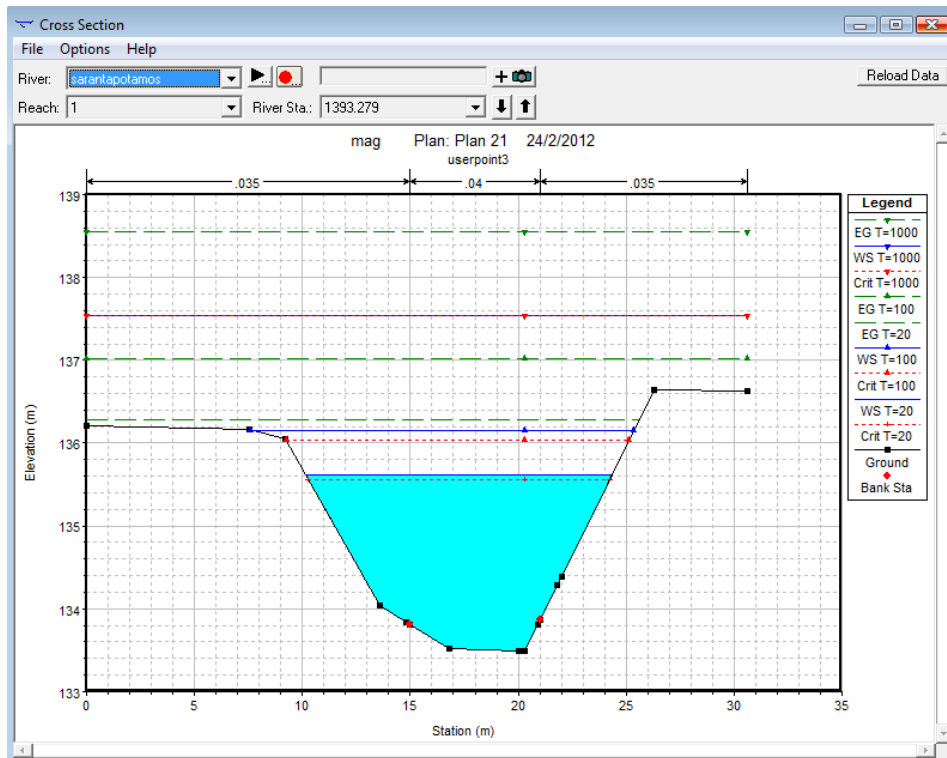
Από την εντολή View → Cross sections, στο κεντρικό μενού γίνεται η επισκόπηση των αποτελεσμάτων, σε μορφή διαγράμματος και με την επιλογή Detailed Output Tables, παρουσιάζονται πίνακες με τα χαρακτηριστικά μεγέθη στην κάθε διατομή. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα και οι πίνακες στις δύο διατομές μελέτης, στις όποιες υπάρχουν σταθμοί μέτρησης στάθμης-παροχής.

1. Η διατομή στη θέση Οινόη



Διάγραμμα 4.2. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=20$, $T=100$ και $T=1000$ έτη.

2. Η διατομή στη θέση Μαγούλα.



Διάγραμμα 4.3. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=20$, $T=100$ και $T=1000$ έτη.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	sarantapotamos	Profile:	T=20		
Reach	1	RS:	17825.19	Plan:	
Plan Select profile					
E.G. Elev (m)	330.59	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.14	Wt. n-Val.	0.040	0.040	0.040
W.S. Elev (m)	330.44	Reach Len. (m)	4.99	4.99	4.99
Crit W.S. (m)	330.44	Flow Area (m ²)	0.46	1.65	0.33
E.G. Slope (m/m)	0.020698	Area (m ²)	0.46	1.65	0.33
Q Total (m ³ /s)	4.02	Flow (m ³ /s)	0.72	2.91	0.39
Top Width (m)	7.88	Top Width (m)	1.49	4.80	1.59
Vel Total (m/s)	1.65	Avg. Vel. (m/s)	1.56	1.76	1.20
Max Chl Dpth (m)	0.43	Hydr. Depth (m)	0.31	0.34	0.21
Conv. Total (m ³ /s)	27.9	Conv. (m ³ /s)	5.0	20.2	2.7
Length Wtd. (m)	4.99	Wetted Per. (m)	1.62	4.81	1.69
Min Ch El (m)	330.01	Shear (N/m ²)	57.90	69.66	39.09
Alpha	1.04	Stream Power (N/m s)	90.23	122.81	46.88
Frictn Loss (m)	0.10	Cum Volume (1000 m ³)	49.36	190.92	20.48
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)	140.20	656.03	67.66

Εικόνα 4.18. Πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της εξίσωσης ενέργειας της διατομής.

Πίνακας 4.2. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Οινόη) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς σε έτη	Στάθμη νερού (m)
T20	0.43
T100	0.61
T1000	2.66

Πίνακας 4.3. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Μαγούλα) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς σε έτη	Στάθμη νερού (m)
T20	2.12
T100	2.66
T1000	4.05

4.5.4. Τα αποτελέσματα στις διατομές μελέτης με τις νέες παροχές αιχμής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εισαγωγή του ίδιου γεωμετρικού αρχείου, και ενός νέου υδρολογικού αρχείου που περιλαμβάνει τις

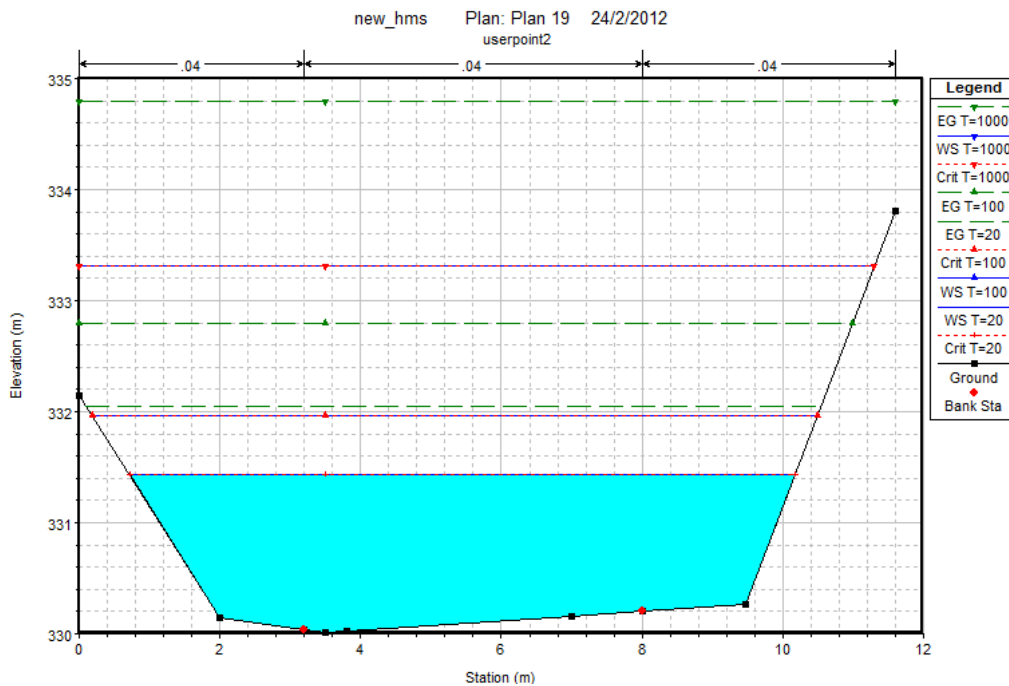
παροχές αιχμής όπως προέκυψαν με την αλλαγή των υδρολογικών παραμέτρων στο HEC-HMS (Κεφάλαιο 3.3.5).

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates			
	River	Reach	RS	T=20	T=100	T=1000
1	sarantapotamos	1	20018.69	22.018	37.525	111.787
2	sarantapotamos	1	17825.19	36.805	62.509	153.789
3	sarantapotamos	1	15025.9	31.491	51.751	84.984
4	sarantapotamos	1	13525.9	31.491	51.751	84.984
5	sarantapotamos	1	10418.68	0.21	0.352	0.596
6	sarantapotamos	1	9618.685	5.53	9.496	16.499
7	sarantapotamos	1	9018.685	5.53	9.496	16.499
8	sarantapotamos	1	7218.685	5.53	9.496	16.499
9	sarantapotamos	1	6418.685	13.586	23.132	39.922
10	sarantapotamos	1	6018.685	13.586	23.132	39.922
11	sarantapotamos	1	4818.685	13.586	23.132	39.922
12	sarantapotamos	1	3218.685	13.586	23.132	39.922
13	sarantapotamos	1	3018.685	13.586	23.132	39.922
14	sarantapotamos	1	1393.279	86.779	143.982	274.203

Εικόνα 4.19. Το νέο υδρολογικό αρχείο.

Οι οριακές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα των διατομών στις θέσεις μέτρησης είναι:

1. Η διατομή στη θέση Οινόη

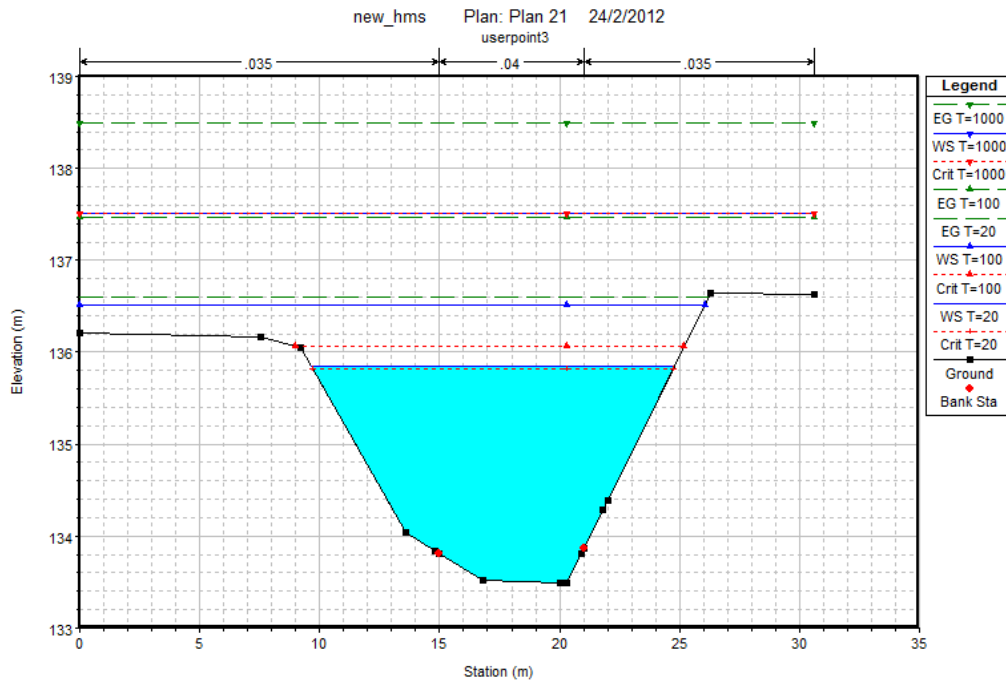


Διάγραμμα 4.4. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=20$, $T=100$ και $T=1000$ έτη.

Πίνακας 4.4. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Οινόη) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς με το νέο υδρολογικό αρχείο.

Περίοδος επαναφοράς σε έτη	Στάθμη νερού (m)
T20	1.43
T100	1.95
T1000	3.3

2. Η διατομή στη θέση Μαγούλα.



Διάγραμμα 4.5. Διατομή ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=20$, $T=100$ και $T=1000$ έτη.

Πίνακας 4.5. Η στάθμη νερού στη διατομή μελέτης (Μαγούλα) για τις τρεις περιόδους επαναφοράς με το νέο υδρολογικό αρχείο.

Περίοδος επαναφοράς σε έτη	Στάθμη νερού (m)
T20	2.35
T100	3.02
T1000	4.01

5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ HEC ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΜΕΝΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης της ίδιας περιοχής μελέτης, με τη διαφορά ότι αντί για επεισόδια βροχής που έχουν δημιουργηθεί από όμβριες καμπύλες (Κεφάλαιο 3), χρησιμοποιείται παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης.

Η διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης στο HEC-HMS γίνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας. Η διαφορά έγκειται στην κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου. Εισάγεται ένα επεισόδιο βροχόπτωσης, όπως καταγράφηκε από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς στις περιοχές Βίλια, Μάνδρα και Πράσινο για τέσσερις μέρες, από τις 6/2/2012 μέχρι τις 10/2/2012. Στη συνέχεια, υπολογίζεται με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen η μέση βροχόπτωση σε κάθε υπολεκάνη. Μετά από αυτήν την προεπεξεργασία στο ArcGis, οι βροχοπτώσεις τελικά εισάγονται στο HEC-HMS για την ολοκλήρωση της υδρολογικής προσομοίωσης.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία στο HEC-HMS, οι παροχές αιχμής που προέκυψαν εισάγονται ως υδρολογικό αρχείο στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS, με τη διαδικασία που έχει ήδη περιγραφεί.

5.2. Η ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Δημιουργείται ένα καινούριο project, όπου το μοντέλο λεκάνης απορροής έχει ήδη δημιουργηθεί με την προεπεξεργασία στο HEC-GeoHMS, και εισάγεται στο

υδρολογικό μοντέλο. Τα πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής και άμεσης απορροής μένουν ως έχουν (Κεφάλαιο 3).

Στο πρότυπο υπολογισμού των απωλειών βροχής, επιλέχθηκε η ίδια μέθοδος, της SCS, με ορισμένες αλλαγές στις παραμέτρους. Το αρχικό έλλειμμα (initial abstraction) θεωρήθηκε ίσο με 10 mm και το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας ίσο με 0 για κάθε υπολεκάνη. Ακόμα για το πρότυπο διόδευσης πλημμύρας (Routing) επιλέχθηκε η μέθοδος lag time. Θεωρήθηκε ότι η μέση ταχύτητα ροής του νερού είναι ίση με 1 m/s, και σε συνδυασμό με το μήκος κάθε τμήματος του ποταμού (R20, R300 κ.λπ.) υπολογίστηκε ο αντίστοιχος χρόνος σε λεπτά min.

Reach	Lag Time (MIN)
R20	17
R300	1
R50	106
R70	18
R80	63
R360	87
R120	23
R110	0

Εικόνα 5.1. Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας.

Στο μετεωρολογικό μοντέλο εισάγεται το παρατηρημένο επεισόδιο βροχής. Αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen στο ArcGis.

5.2.1. Η μέθοδος πολυγώνων Thiessen

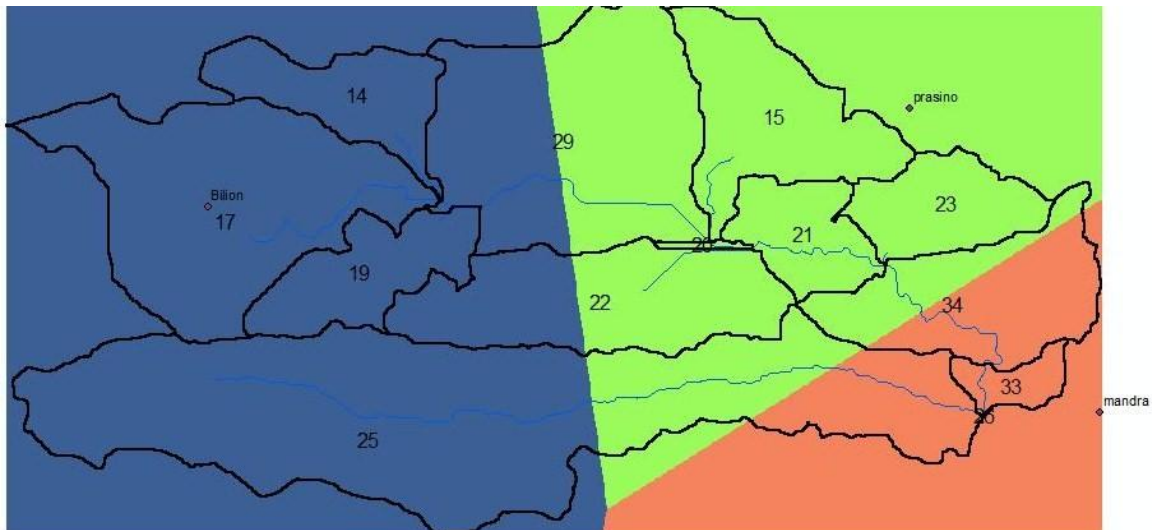
Στη μέθοδο αυτή υπολογίζεται το μέσο βροχομετρικό ύψος με τη βοήθεια ορισμένων συντελεστών βάρους. Συγκεκριμένα, προκύπτουν πολύγωνα, με τη χάραξη μεσοκαθέτων στις ευθείες που σχηματίζουν οι γειτονικοί μετεωρολογικοί σταθμοί, τα οποία πολύγωνα αποτελούν την επιφάνεια απορροής που περιβάλλουν τον εν λόγω σταθμό. Ο συντελεστής βάρους w_i του κάθε σταθμού είναι ίσος με το λόγο του εμβαδού του πολυγώνου A_i προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής A ($w_i = A_i/A$). Επομένως,

$$h = \sum_{i=1}^n w_i h_i \quad (5.1)$$

όπου h_i το ύψος βροχής σε κάθε σταθμό (Γιαννόπουλος, 2005).

Βέβαια, η χάραξη των πολυγώνων Thiessen γίνεται αυτοματοποιημένα με την εφαρμογή μιας σειράς εντολών στο ArcGis. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Εισάγονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί, βάση των συντεταγμένων τους με την εντολή Tools → Add X,Y data.
2. Δημιουργία μάσκας (mask) για όλη την περιοχή μελέτης (βοηθητικό grid στο οποίο όλα τα φαινία εντός λεκάνης έχουν την τιμή 0). Με την εντολή Spatial Analyst → Options → Extent → Same as layer mask, επιλέγεται η επέκταση των πολυγώνων Thiessen σε όλη την έκταση των υπολεκανών της περιοχής μελέτης.
3. Με την εντολή Spatial Analyst → Distance → Allocation, επιλέγοντας ως εισερχόμενο δεδομένο τους σταθμούς μέτρησης, εξάγονται τα πολύγωνα Thiessen.



Εικόνα 5.2. Τα πολύγωνα Thiessen για την περιοχή μελέτης.

Ο υπολογισμός των συντελεστών βάρους (Thiessen)

Από τον πίνακα ιδιοτήτων των πολυγώνων υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των φαινίων (open attribute table → count → statistics → sum), και διαιρώντας τον αριθμό των φαινίων κάθε πολυγώνου με το συνολικό προκύπτει ο αντίστοιχος συντελεστής Thiessen για κάθε σταθμό. Έτσι, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 5.1. Οι συντελεστές Thiessen για κάθε σταθμό.

Μετεωρολογικοί σταθμοί	Συντελεστές Thiessen
Βίλια	0.518
Πράσινο	0.327
Μάνδρα	0.155

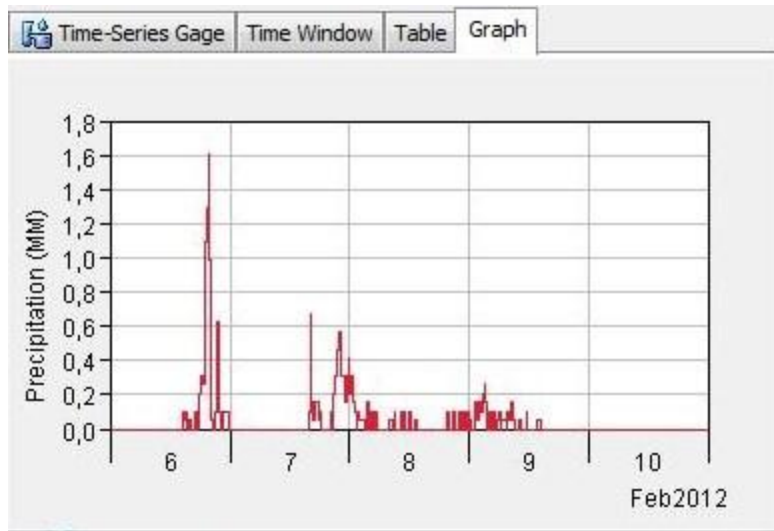
Το άθροισμα των συντελεστών πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα, όπου και ισχύει.

Από την *Εικόνα 5.2*, προκύπτει ότι ορισμένες υπολεκάνες επηρεάζονται από ένα και μόνο μετεωρολογικό σταθμό (π.χ. η υπολεκάνη 17). Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συντελεστής μένει ως έχει (*Πίνακας 5.1*). Στην περίπτωση όμως, που υπολεκάνες αποτελούν μέρος δύο ή και τριών πολυγώνων, ο συντελεστής Thiessen προκύπτει από το εμβαδόν που καταλαμβάνει το πολύγωνο ως προς τη συνολική έκταση. Έτσι, για κάθε υπολεκάνη, οι αντίστοιχοι συντελεστές βάρους είναι:

Πίνακας 5.2. Οι συντελεστές Thiessen για κάθε υπολεκάνη.

Υπολεκάνη	Βίλια	Πράσινο	Μάνδρα
17	0.518	-	-
14	0.518	-	-
19	0.518	-	-
29	0.4	0.6	-
22	0.4	0.6	-
20	-	0.327	-
15	-	0.327	-
21	-	0.327	-
34	-	0.300	0.7
23	-	0.327	-
33	-	0.155	-
25	0.6	0.2	0.2

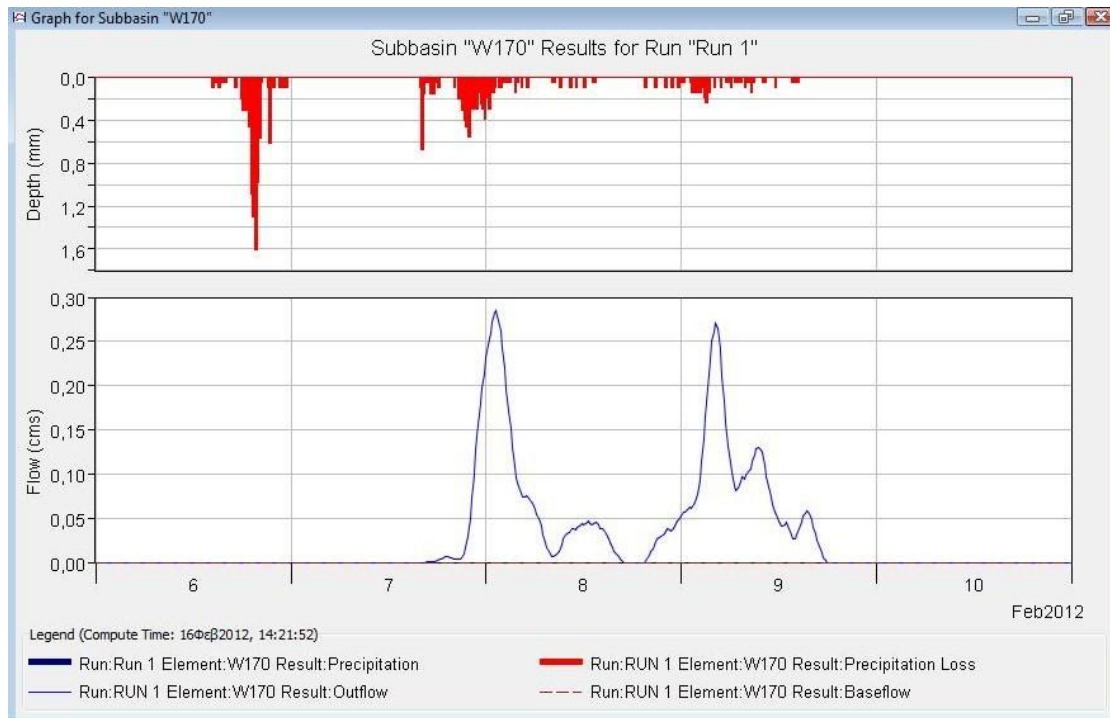
Τελικά, τα επεισόδια βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση (5.1.) και εισάγονται στο HEC-HMS με τη μορφή χρονοσειρών (Times Series Data, Κεφάλαιο 3). Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η βροχόπτωση σε μια τυχαία λεκάνη σε περιβάλλον HEC-HMS.



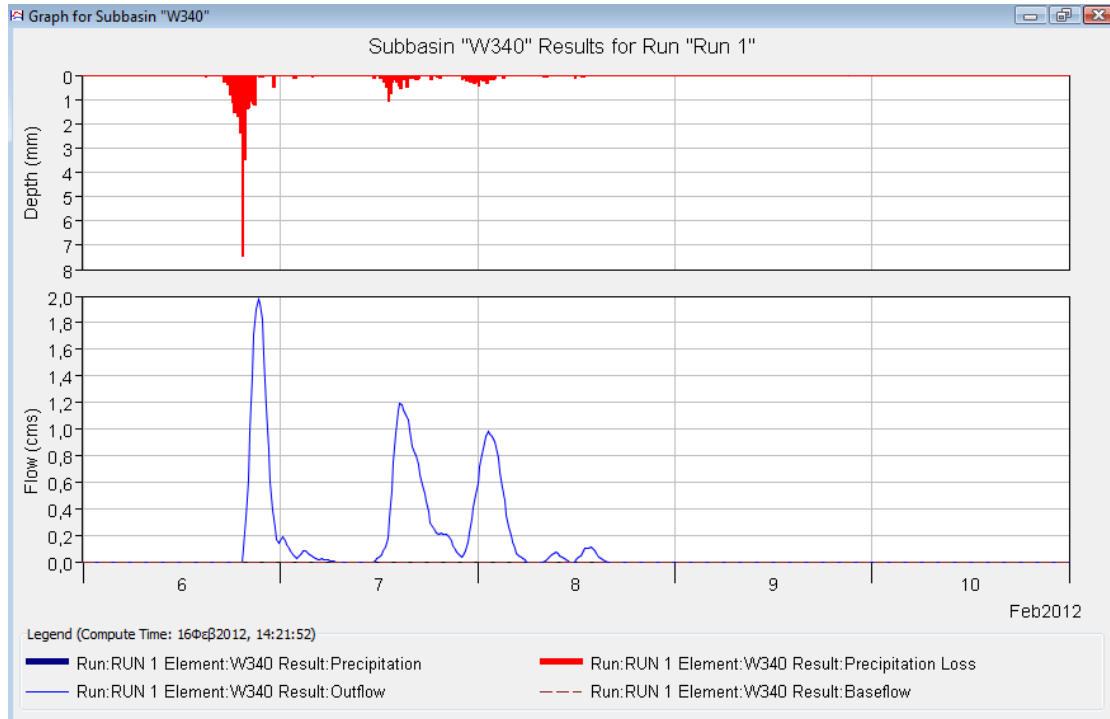
Εικόνα 5.3. Το παρατηρημένο νετόγραμμα σε μια τυχαία υπολεκάνη (14).

5.2.2. Αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης

Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πλημμυρογράφηματα στην πλέον ανάντη λεκάνη W170 και στην κατάντη λεκάνη W340 (βλ. Εικόνα 3.6 σελ. 30).

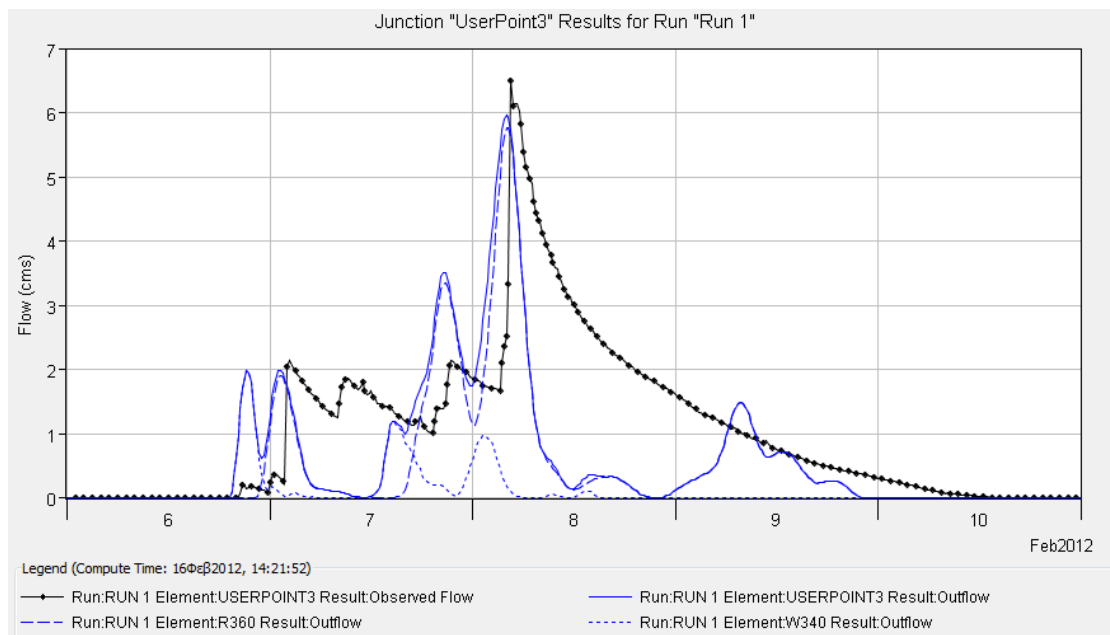


Εικόνα 5.4. Υετόγραμμα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 06/02/12-10/02/12 ανάντη υπολεκάνης.



Εικόνα 5.5. Υετόγραμμα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 06/02/12-10/02/12 κατάντη υπολεκάνης.

Στην κατάντη θέση μέτρησης (userpoint3) το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα συγκρίνεται με το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα, όπως έχει προκύψει από τις αντίστοιχες μετρήσεις. Εισάγονται οι μετρημένες παροχές, με τη μορφή χρονοσειράς με τις εντολές: Times Series Data → Discharge Gages, εκτελούνται ξανά οι υπολογισμοί και προκύπτει το ακόλουθο αποτέλεσμα:



Εικόνα 5.6. Το προσομοιωμένο και το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα για την κατάντη θέση μέτρησης.

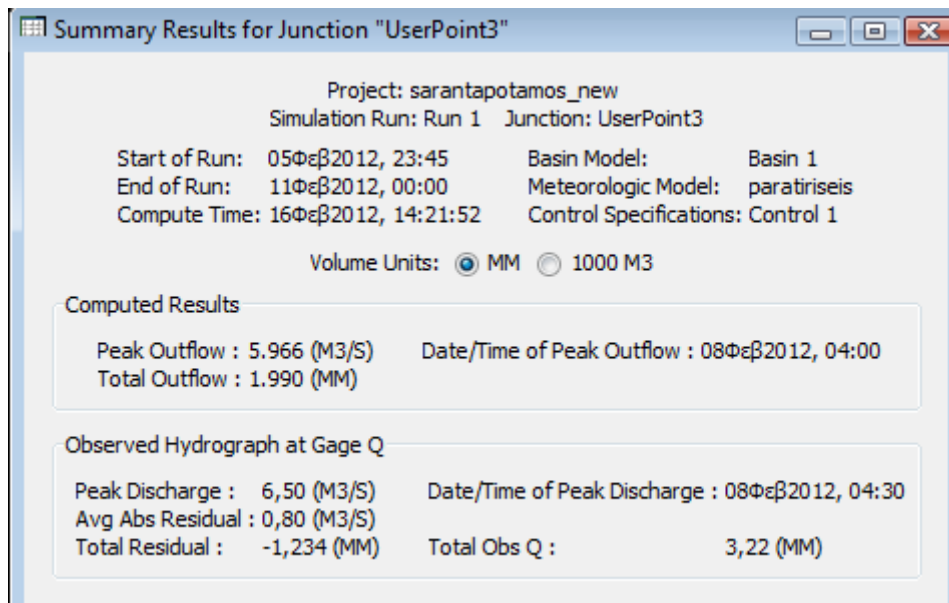
Παρατηρείται ότι, η παροχή αιχμής, σχεδόν ταυτίζεται χρονικά με μια διαφορά μισής ώρας στα δύο πλημμυρογράφηματα, και οι αντίστοιχες παροχές αιχμής έχουν μικρή διαφορά (Εικόνα 5.7). Ο κλάδος καθόδου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά, πρόβλημα το οποίο θα μπορούσε να επιλυθεί με την επιλογή άλλων μοναδιαίων υδρογραφημάτων για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής, συγκεκριμένα με μεγαλύτερο χρόνο βάσης και χρόνο ανόδου.

$Q_{αιχμ} = 5.966 \text{ m}^3/\text{s}$ για το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα

$Q_{αιχμ} = 6.50 \text{ m}^3/\text{s}$ για το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα

Η διαφορά των όγκων τους είναι της τάξης 38%, συγκεκριμένα:

$V_{\text{προσ.}} = 1122318 \text{ m}^3$ και $V_{\text{παρατ.}} = 1818628 \text{ m}^3$



Εικόνα 5.7. Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιωμένου και παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος για τη θέση μέτρησης.

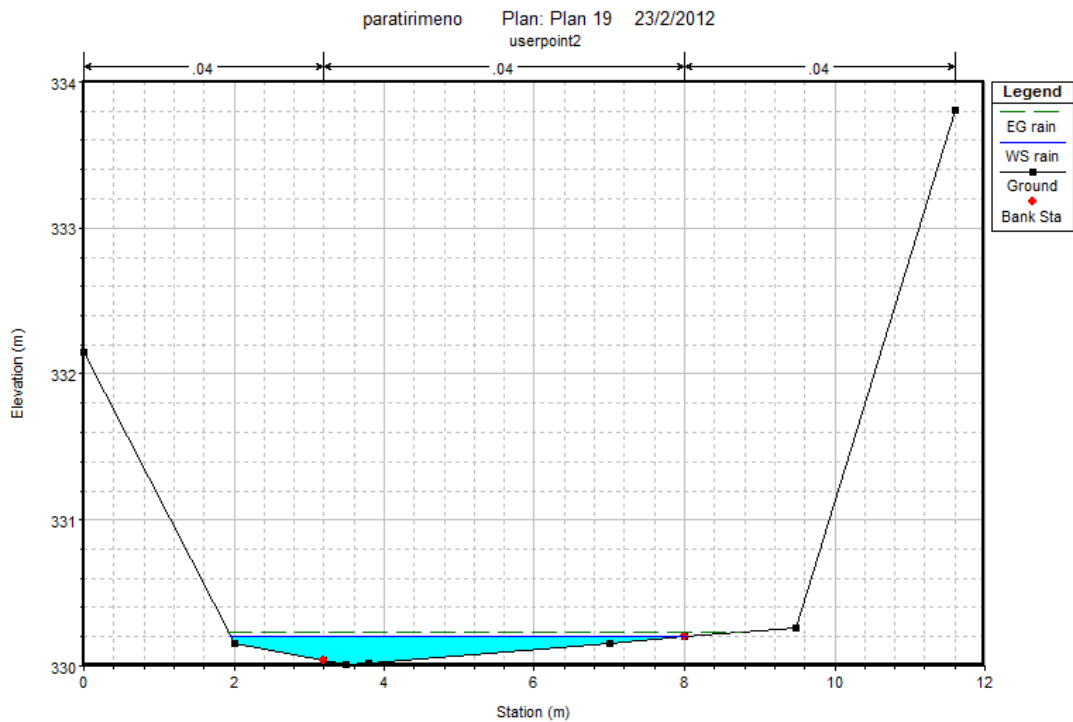
5.3. Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Δημιουργείται ένα νέο project, το οποίο έχει το ίδιο γεωμετρικό αρχείο (Geometric Data), όπως περιγράφηκε αναλυτικά η διαδικασία στο Κεφάλαιο 4, και ένα καινούριο υδρολογικό αρχείο (Steady Flow Data). Στο υδρολογικό αυτό αρχείο εισάγονται οι παροχές αιχμής όπως υπολογίστηκαν από την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS.

Για τον υπολογισμό, εισάγονται και εδώ ενδιάμεσες παροχές, βαθμιαίως αυξανόμενες. Οι οριακές συνθήκες εισήχθησαν τόσο στο ανάντη όσο και στο κατόντη σημείο, για μεικτή ροή.

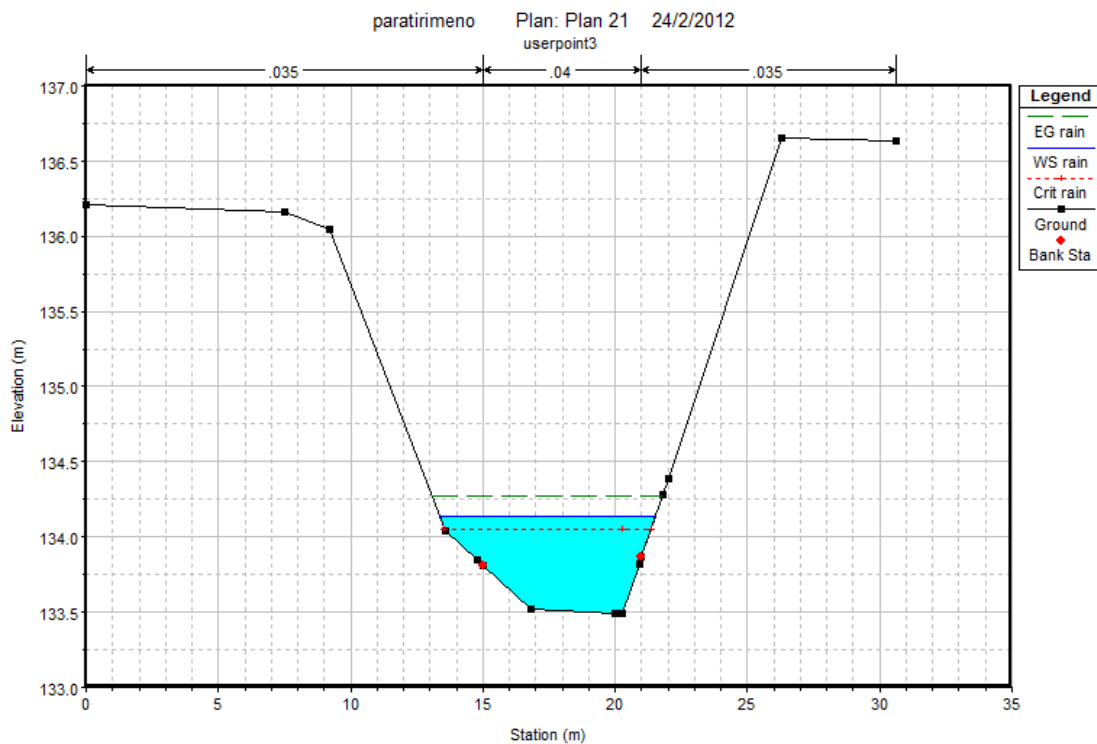
5.3.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

1. Η διατομή στη θέση Οινόη



Διάγραμμα 5.1. Η διατομή στη θέση Οινόη, για παρατηρημένο επεισόδιο βροχής (06/02/12-11/02/12).

2. Η διατομή στη θέση Μαγούλα.



Διάγραμμα 5.2. Η διατομή στη θέση Μαγούλα, για παρατηρημένο επεισόδιο βροχής (06/02/12-11/02/12).

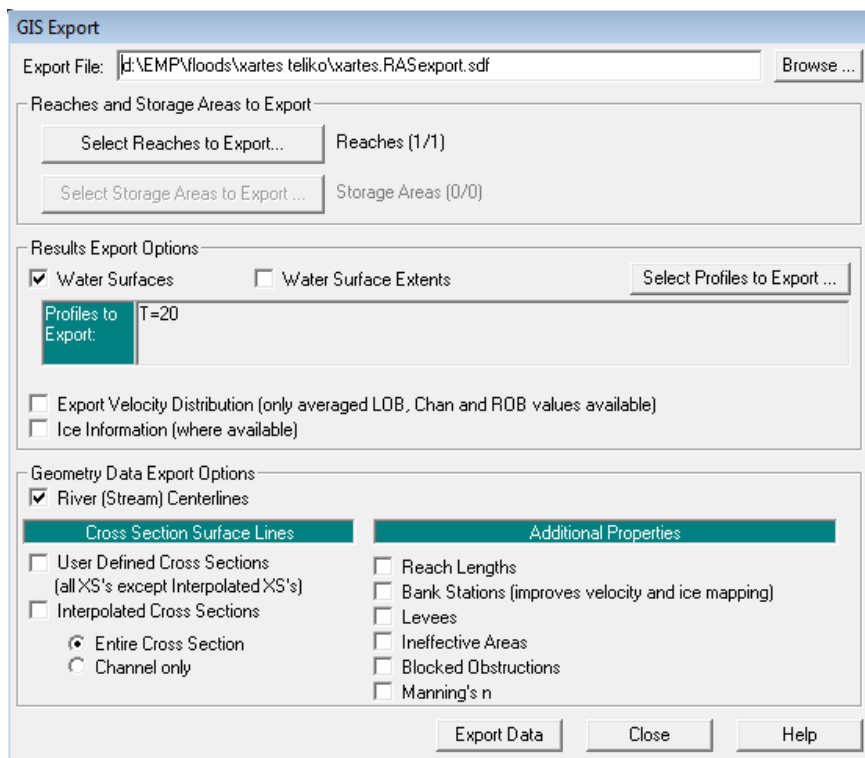
Η στάθμη νερού που προκύπτει από την υδραυλική προσομοίωση είναι ίση με 0.64 m, ενώ από τις μετρήσεις προέκυψε στα 0.644 m.

6

ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

6.1. ΓΕΝΙΚΑ

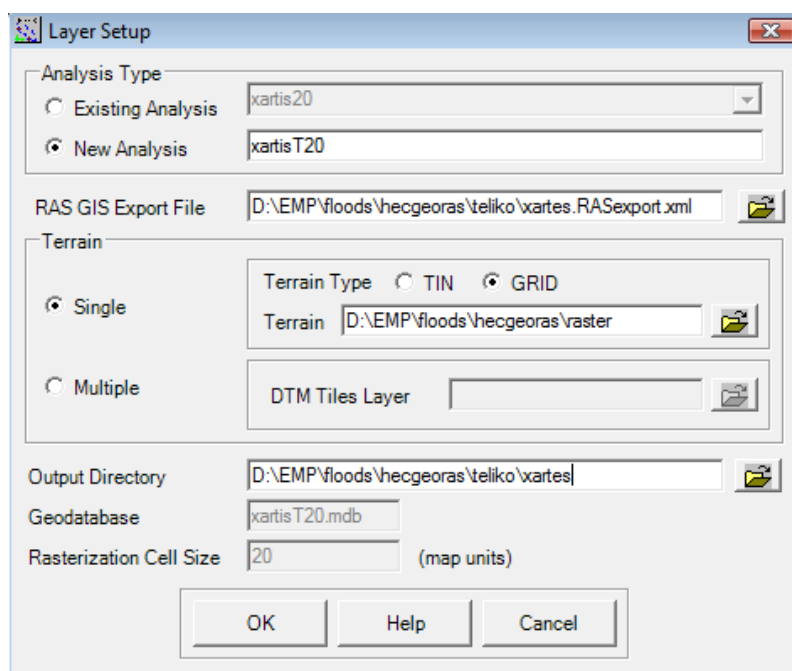
Αφού ολοκληρωθούν οι υδραυλικοί υπολογισμοί, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε περιβάλλον HEC-GeoRAS με σκοπό τη σύνθεση χαρτών με τα πιεζομετρικά βάθη και τα πολύγωνα των πλημμυρικών κατακλύσεων. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από το HEC-RAS στο HEC-GeoRAS εκτελείται με την εντολή File → Export GIS Data (Εικόνα 6.1. σελ.87). Στο παράθυρο αυτό επιλέγεται το προφίλ που θα εξαχθεί (T=20, T=100, T=1000).



Εικόνα 6.1. Εξαγωγή προσομοιωμένου αρχείου από το HEC-RAS στο HEC-GeoRAS.

Παράγεται ένα αρχείο τύπου .sdf, το οποίο μετατρέπεται σε μορφή .xml σε επόμενο βήμα. Ωστόσο, πριν την εξαγωγή των δεδομένων στο HEC-GeoRAS γίνεται μια τελευταία απαραίτητη ρύθμιση στα δεδομένα της προσομοίωσης. Οι διατομές στα σημεία μέτρησης (Οινόη και Μαγούλα), που δημιουργήθηκαν εξ ολοκλήρου στο HEC-RAS (δεν περιλαμβάνονταν στο γεωμετρικό αρχείο του HEC-GeoRAS), δεν θεωρούνται γεωαναφερμένες, ομοίως και οι ενδιάμεσες τους (interpolated) με αποτέλεσμα τη μη τελική εισαγωγή τους στο ArcGis, και κατ' επέκταση την ορθή δημιουργία πιεζομετρικών και πλημμυρικής κατάκλυσης χαρτών. Το πρόβλημα επιλύθηκε επιλέγοντας στο παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων του HEC-RAS την εντολή, GIS Tools → GIS Cut Lines → Accept Displayed Locations (as Georeferenced). Στο σημείο αυτό γίνεται η επιλογή των διατομών που δεν είναι γεωαναφερμένες.

Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων η διαδικασία μεταφέρεται σε περιβάλλον ArcGis. Το πρώτο βήμα είναι η μετατροπή του αρχείου ras sdf σε xml με την αντίστοιχη εντολή στην εργαλειοθήκη του HEC-GeoRAS. Στη συνέχεια, με την εντολή RAS Mapping → Layer Setup, δημιουργείται μια ανάλυση για το προφίλ που έχει επιλεχθεί, συμπληρώνοντας όλα τα απαραίτητα στοιχεία. Έχει ήδη γίνει μετατροπή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους από μορφή tin σε μορφή raster και με αυτή τη μορφή εισάγεται στο παράθυρο των εντολών (Εικόνα 6.2.). Επιλέγεται επίσης το μέγεθος του φατινίου ίσο με 20 m (όσο είναι η ισοδιάσταση των ισουψών από τις οποίες παρήχθη το ψηφιακό μοντέλο εδάφους), και ονομάζεται η βάση δεδομένων με το όνομα του αντίστοιχου προφίλ, μέσα στην οποία αποθηκεύονται τα πιεζομετρικά βάθη και τα πολύγωνα των πλημμυρικών κατακλύσεων.

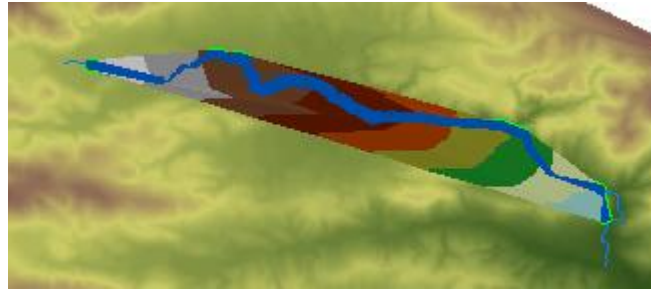


Εικόνα 6.2. Συμπλήρωση των απαραίτητων στοιχείων για την ανάλυση του προφίλ T=20 έτη.

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι πρέπει να έχει οριστεί το ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Μετά την ολοκλήρωση της προεπεξεργασίας των εισερχόμενων δεδομένων ακολουθεί η εισαγωγή των αποτελεσμάτων του HEC-RAS, με τις εντολές RAS Mapping → Import RAS Data.

6.2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

Με τις εντολές RAS Mapping → Inundation Mapping → Water Surface Generation δημιουργούνται οι πιεζομετρικές επιφάνειες για τα διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και ονομάζονται με το πρόθεμα «t» και το όνομα του κάθε προφίλ. Ουσιαστικά, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο της υδάτινης επιφάνειας από τις διατομές και το πιεζομετρικό φορτίο σε κάθε διατομή.



Εικόνα 6.3. Οι πιεζομετρικές επιφάνειες για περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη.

6.3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ

Η πιεζομετρική επιφάνεια, που έχει παραχθεί από την προηγούμενη διαδικασία, συνδυάζεται με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των ακριβών ορίων της κατάκλυσης και των βαθών του νερού για όλο το πλημμυρικό πεδίο. Με τις εντολές RAS Mapping → Inundation Mapping → Floodplain delineation, το ψηφιακό μοντέλο της πιεζομετρικής επιφάνειας συγκρίνεται με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στα σημεία όπου το υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερο από το υψόμετρο εδάφους, υπολογίζεται η διαφορά των δύο υψομέτρων, η οποία αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο βάθος του νερού στη θέση.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται αρχεία που περιέχουν τα βάθη του νερού για τα διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και ονομάζονται με το πρόθεμα «d» (depth). Παράλληλα, κατασκευάζονται πολύγωνα που περιέχουν τα ακριβή όρια της κατάκλυσης για το κάθε προφίλ, τα οποία ονομάζονται με το πρόθεμα «b» (boundary).



Εικόνα 6.4. Τα βάθη και η έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη.

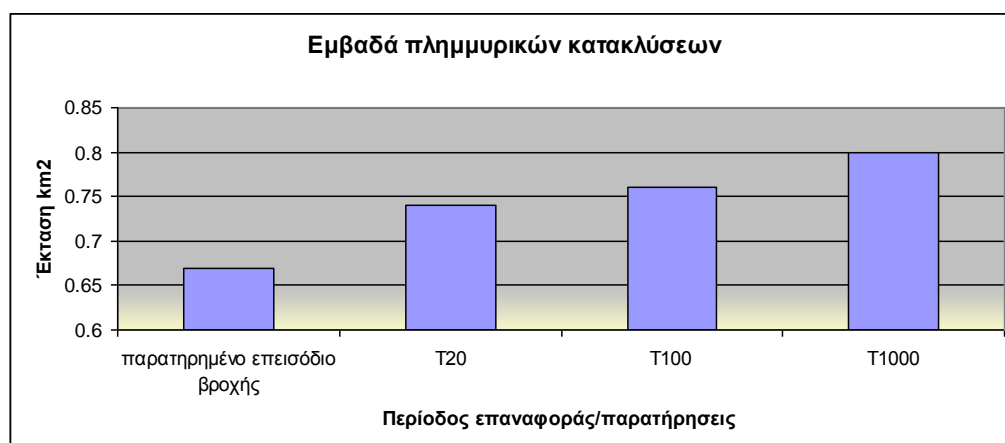
6.4. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΤΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι χάρτες πιεζομετρίας και των πλημμυρικών κατακλύσεων για τις τρεις περιόδους επαναφοράς ($T=20$, $T=100$ και $T=1000$ έτη) και για το παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης.

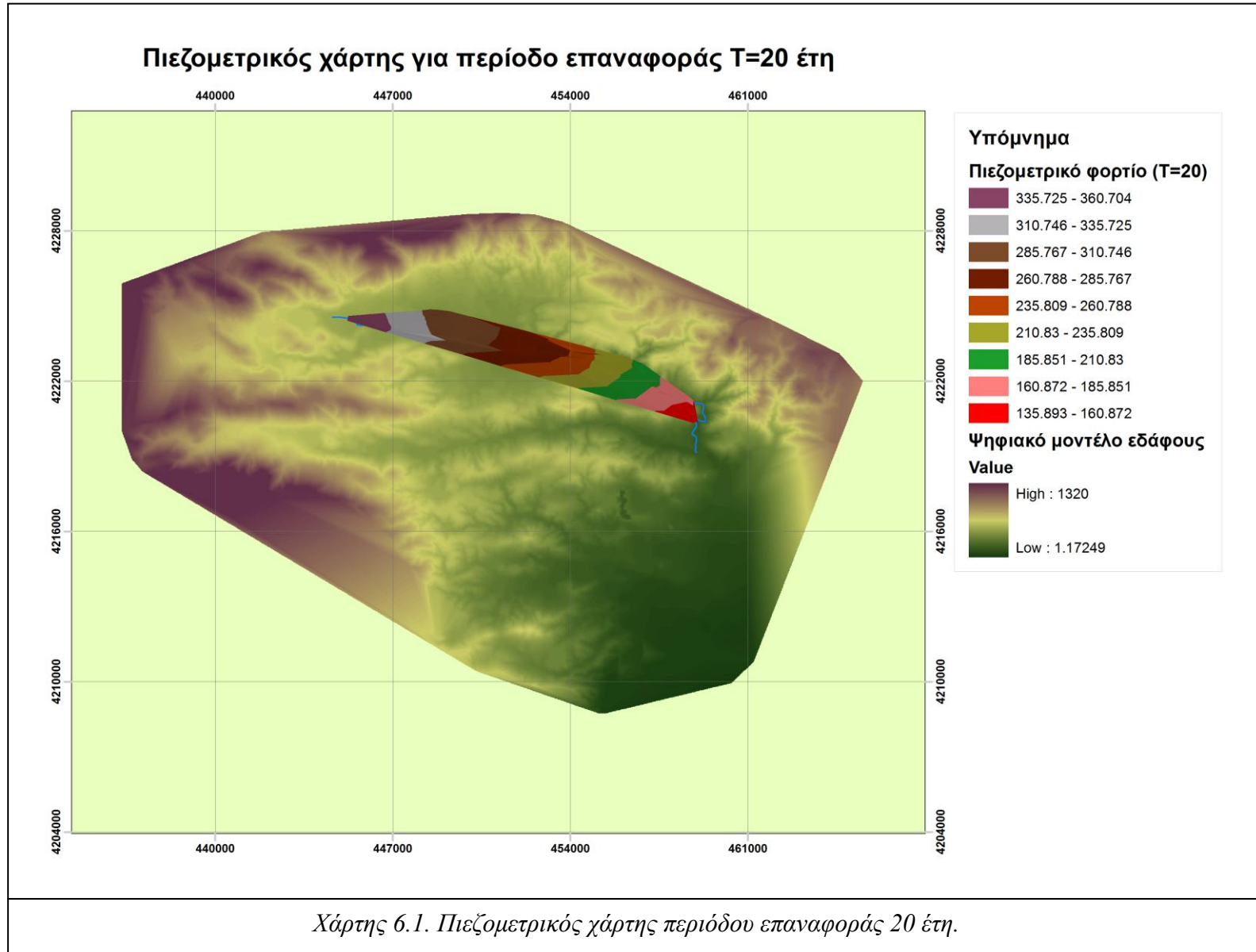
Παρατίθεται σε πίνακα και συγκριτικό διάγραμμα τα εμβαδά των πλημμυρικών κατακλύσεων για τις παραπάνω περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις εκτάσεις των πλημμυρικών κατακλύσεων για τις τρεις περιόδους επαναφοράς, έως 1 km^2 , γεγονός που εξηγείται από την περιορισμένη ανάλυση του χρησιμοποιημένου ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ισοϋψείς ισοδιάστασης 20 m).

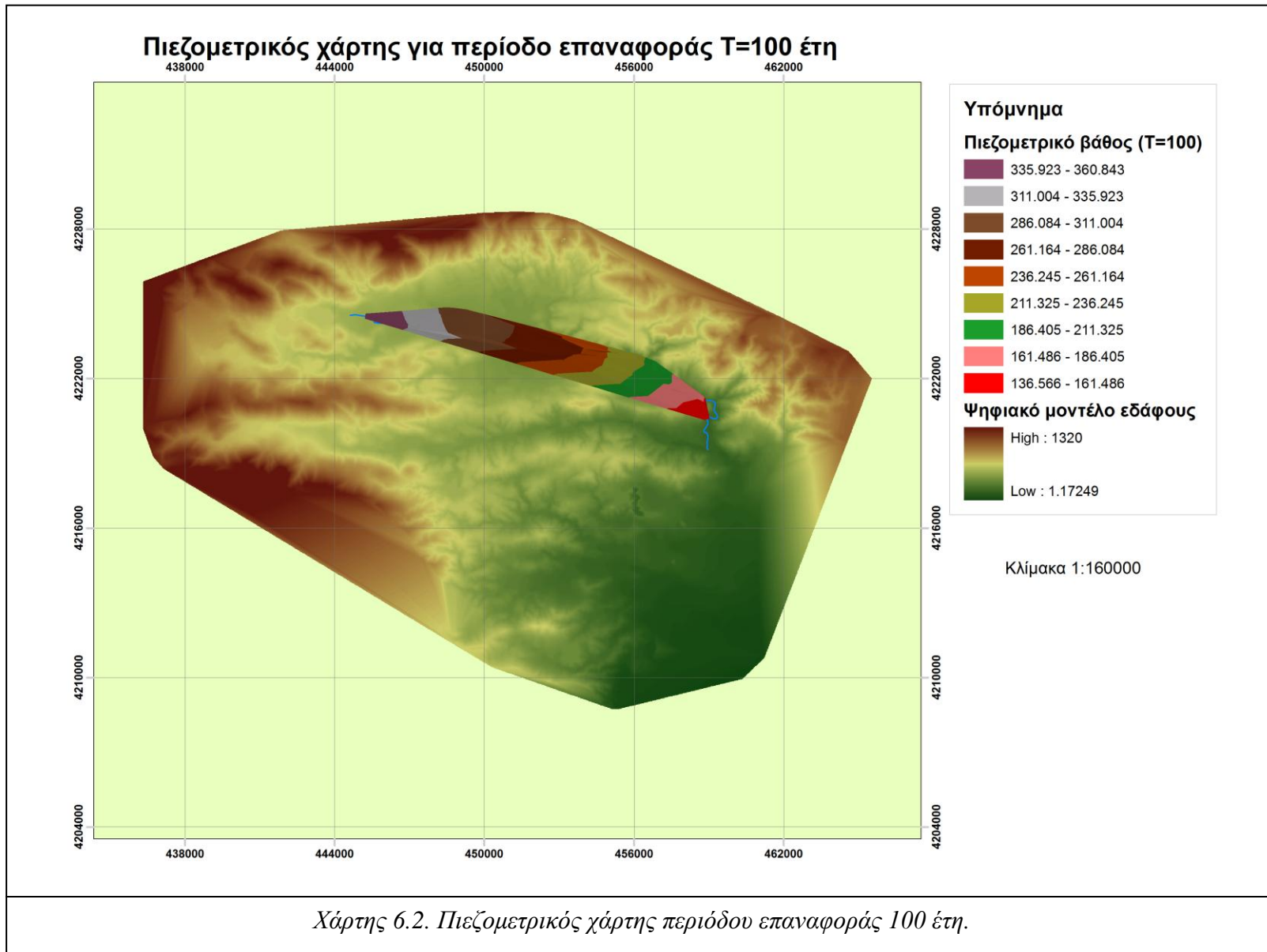
Πίνακας 6.1. Εμβαδά κατακλυζόμενων περιοχών.

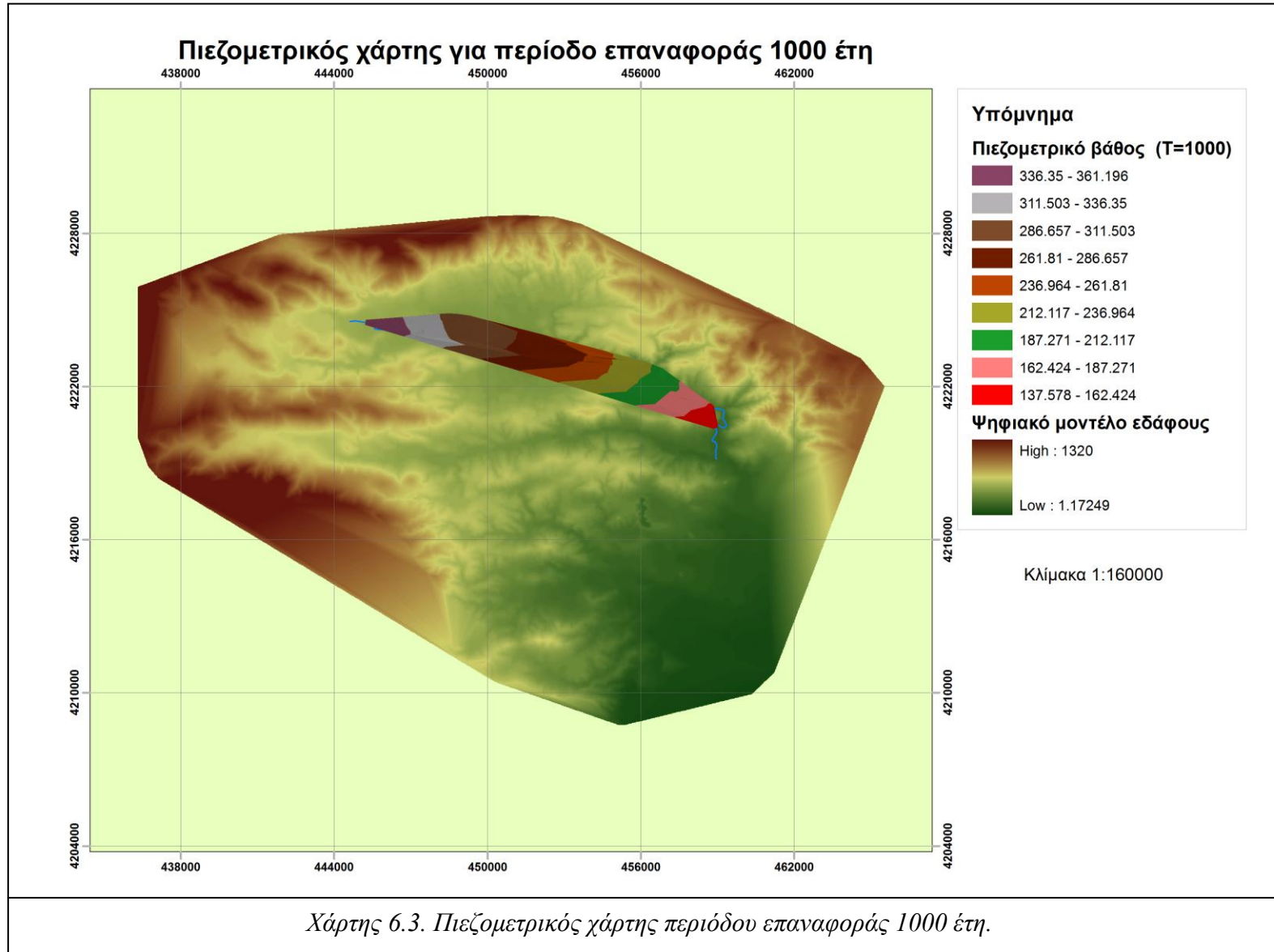
Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Έκταση (km^2)
T20	0.74
T100	0.76
T1000	0.8
παρατηρημένο επεισόδιο βροχής	0.67

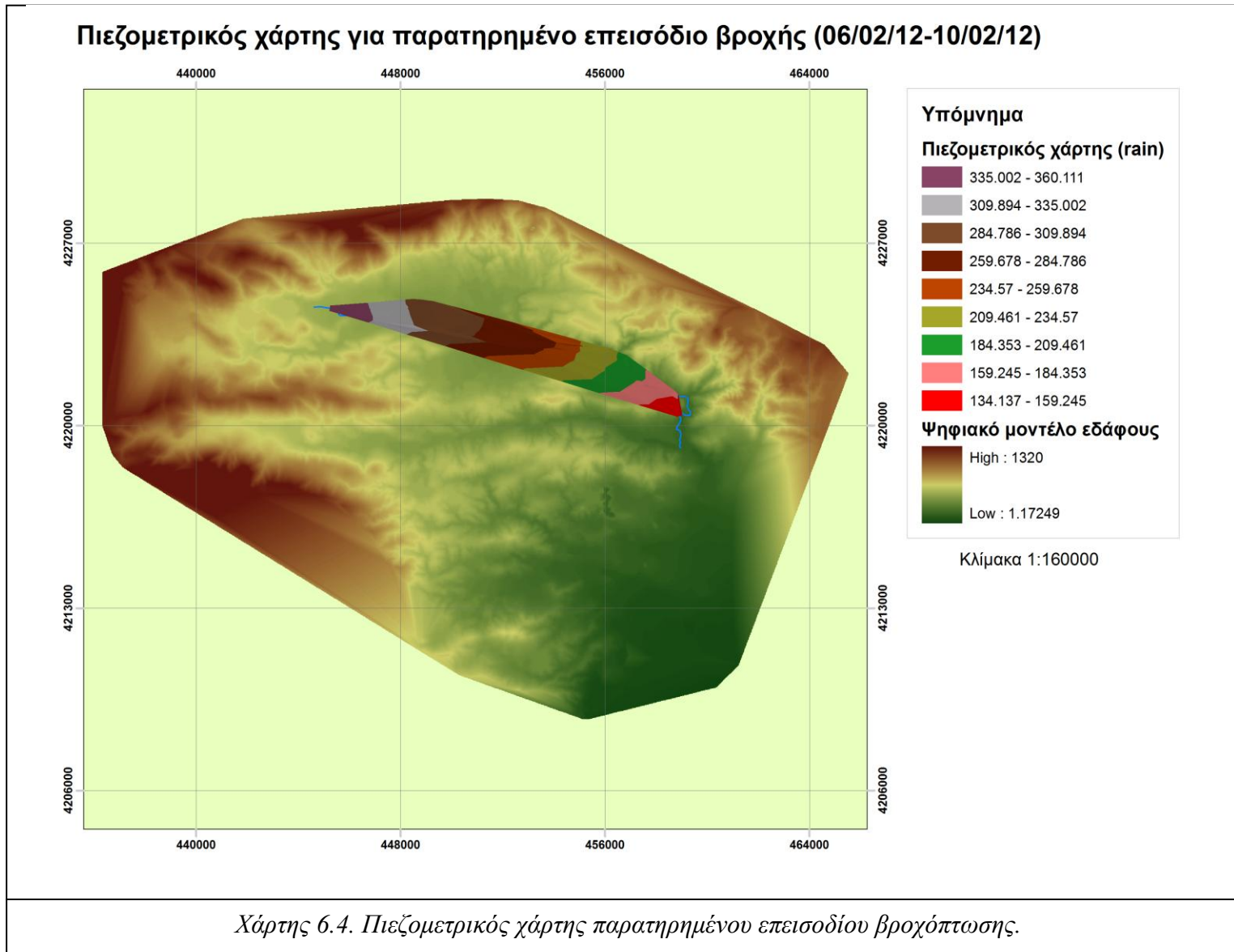


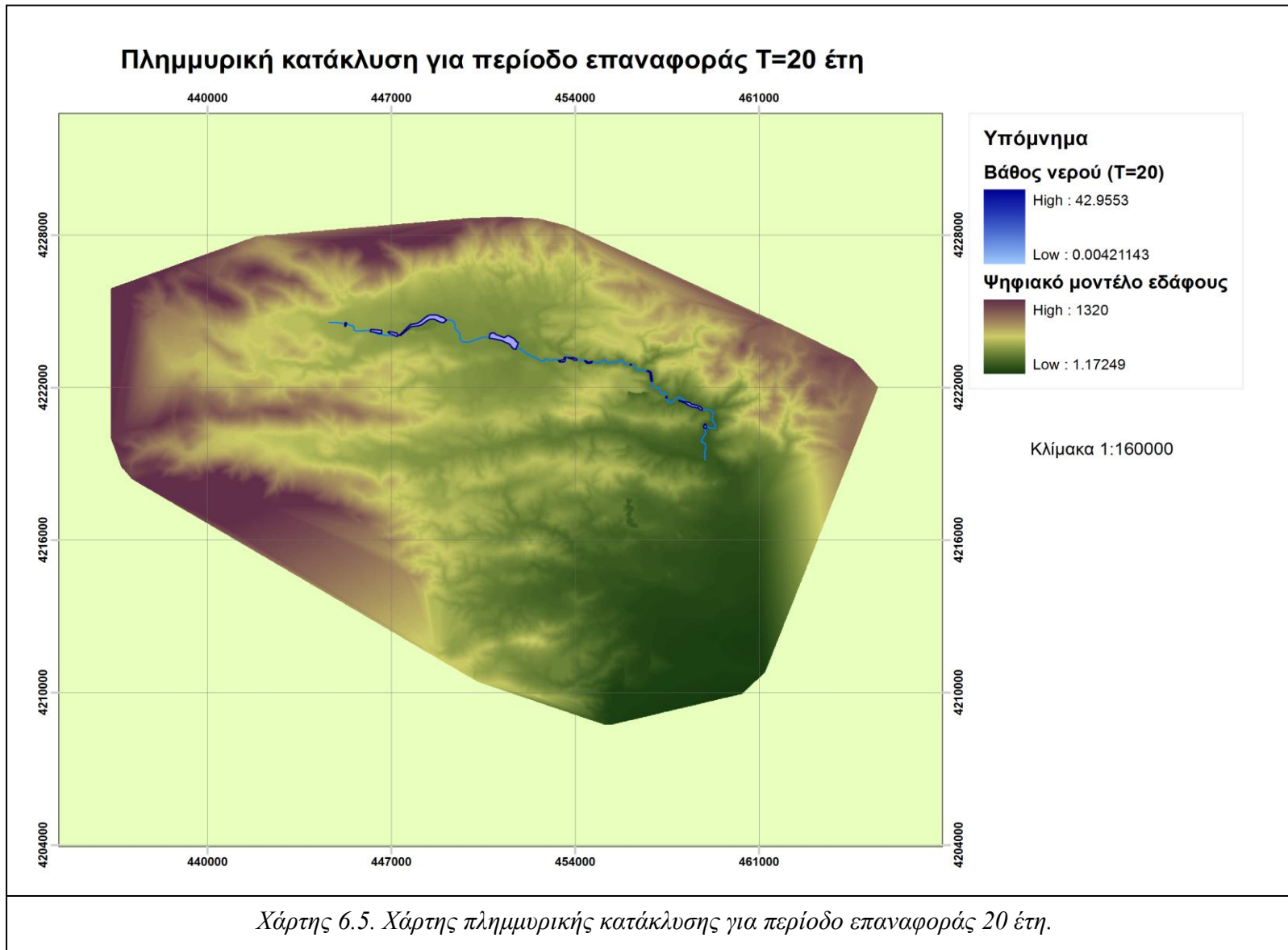
Διάγραμμα 6.1. Συγκριτική παρουσίαση κατακλυζόμενων περιοχών.

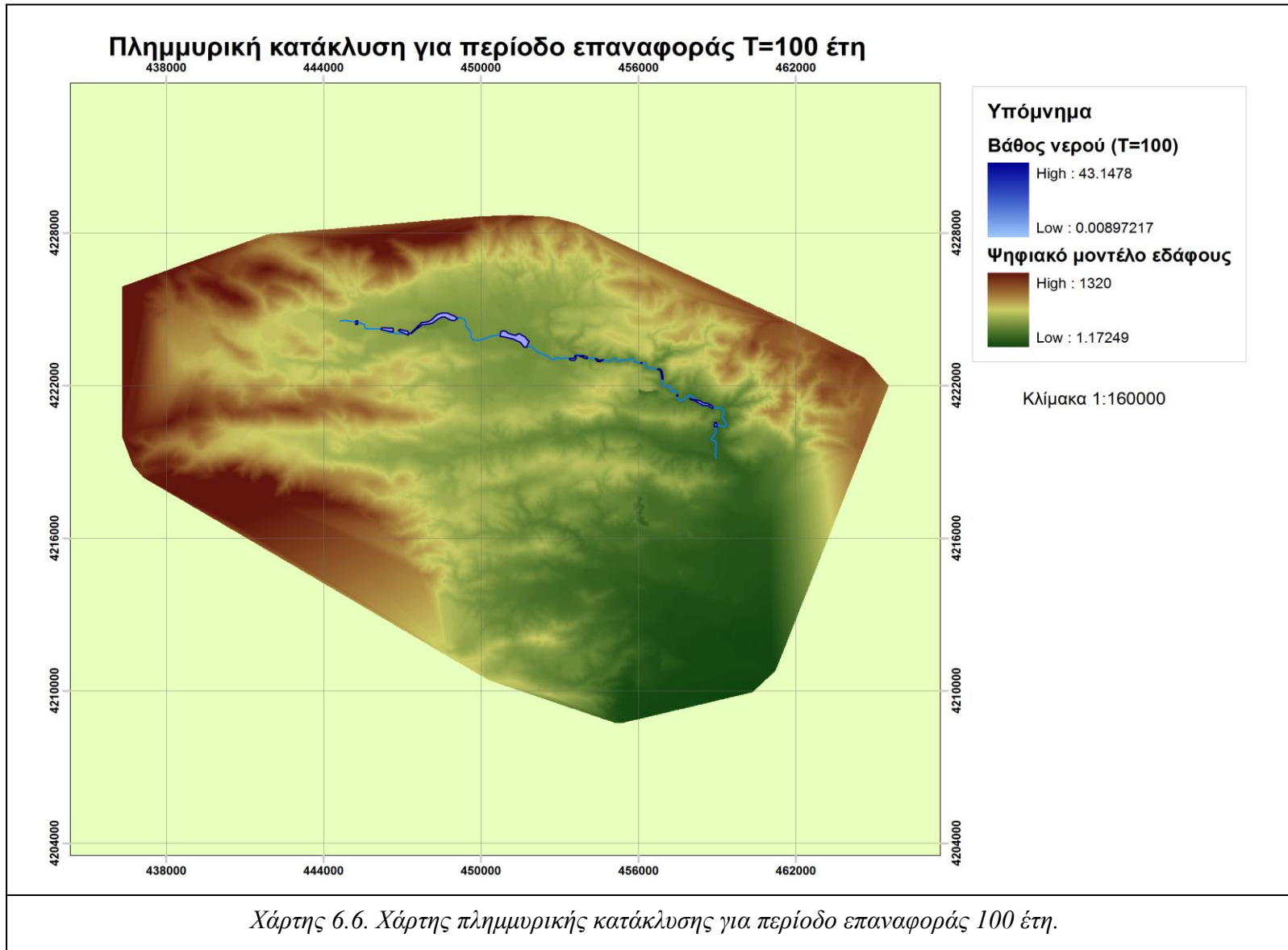


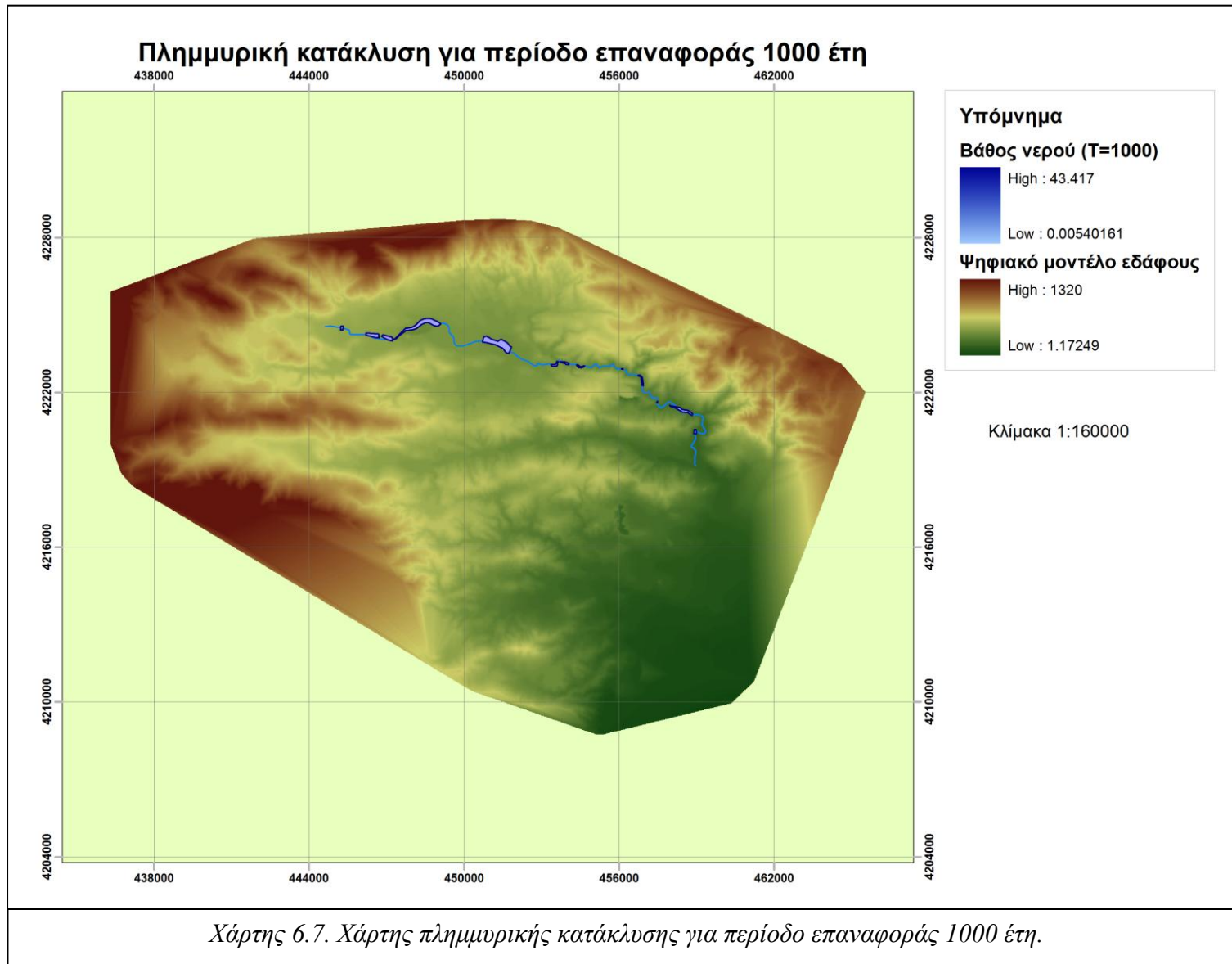


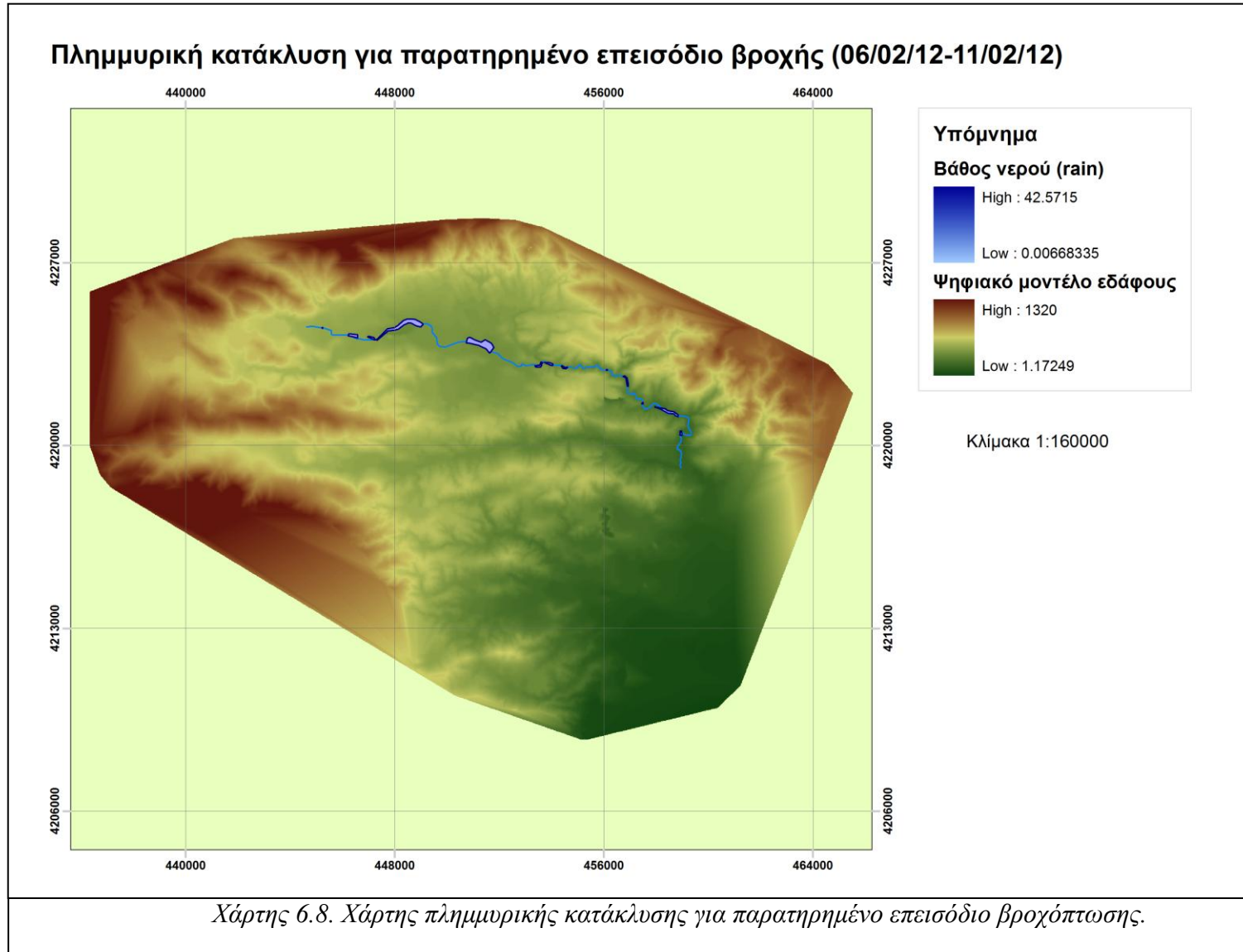












ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει το μεθοδολογικό πλαίσιο για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας με τη χρήση των ελεύθερων λογισμικών του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού, HEC-HMS και HEC-RAS. Η προεπεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων επιτυγχάνεται με το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGis και συγκεκριμένα με τις επεκτάσεις αυτού HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου στην περιοχή της Ελευσίνας, ήτοι 200 km². Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης αυτής πραγματοποιήθηκε για τρεις περιόδους επαναφοράς (T=20, 100, 1000 έτη) και ενός παρατηρημένου επεισοδίου βροχής (06/02/12-10/02/12). Η υδραυλική προσομοίωση εφαρμόστηκε για 20 km του βόρειου κλάδου του ποταμού σε συνθήκες μόνιμης ροής. Τα συμπεράσματα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής είναι τα ακόλουθα.

Η ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης εφαρμόστηκε στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS με την απαραίτητη προεπεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων στην επέκταση του προγράμματος ArcGis, HEC-GeoHMS.

Τα πρωτογενή δεδομένα, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο χάρτης χρήσεων γης και ο χάρτης γεωλογίας, οδήγησαν στη τελική χάραξη των υπολεκανών και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου επιλέγοντας το ανάλογο κατώφλι (threshold). Ουσιαστικά, στο HEC-GeoHMS δημιουργήθηκε το αρχείο της λεκάνης απορροής, το οποίο μετά από κατάλληλη επεξεργασία συμβατότητας εισήχθη στο HEC-HMS, μαζί με τα απαραίτητα τοπολογικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών απορροής και των αντίστοιχων υδρολογικών χαρακτηριστικών.

Στη συνέχεια, τίθεται στην κρίση του χρήστη η επιλογή των κατάλληλων μαθηματικών προτύπων για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής ροής και της διόδευσης πλημμύρας. Για τις απώλειες βροχής επιλέχθηκε η μέθοδος SCS, η οποία έχει ως δεδομένα εισόδου τον αριθμό καμπύλης απορροής CN, το αρχικό έλλειμμα και το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας. Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο λάμβανε ως αρχικό έλλειμμα το 20% της μέγιστης δυνατικής

κατακράτησης, όπως ορίζεται από τη βιβλιογραφία, ενώ στο δεύτερο τέθηκε ως αρχικό έλλειμμα 10 mm. Ακόμα, τα δύο αυτά σενάρια, διέφεραν ως προς τις αδιαπέρατες επιφάνειες. Τελικά, προέκυψαν πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού με μεγαλύτερες και πιο «λογικές» τιμές παροχών στο δεύτερο σενάριο.

Όσον αφορά στην επιλογή του προτύπου για το υπολογισμό της άμεσης απορροής, κρίθηκε κατάλληλο το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, μια παραλλαγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, προσαρμοσμένο στο χρονικό βήμα της καταγίδας σχεδιασμού, ήτοι 15 min. Για τη βασική ροή δεν επιλέχθηκε κάποια μέθοδος υπολογισμού, λόγω έλλειψης δεδομένων, ενώ για τη διόδευση πλημμύρας, στο δεύτερο σενάριο, επιλέχθηκε η μέθοδος lag time, που ουσιαστικά δεν προκαλεί μεγάλη διαφορά στα εξαγόμενα πλημμυρογραφήματα.

Το μετεωρολογικό μοντέλο, απαρτίζεται από υετογραφήματα σχεδιασμού για κάθε υπολεκάνη στην περιοχή μελέτης, όπως αυτά προέκυψαν από τη μέθοδο των εναλλασσόμενων τμημάτων, από τις εκτιμηθείσες όμβριες καμπύλες της περιοχής. Στην πορεία της εργασίας, προέκυψαν δεδομένα βροχόπτωσης, όποτε πραγματοποιήθηκε υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης και για το παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης (06/02/12-10/02/12). Συγκεκριμένα, στην κατάντη θέση της λεκάνης μελέτης (περιοχή Μαγούλα), έγινε σύγκριση του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις του σταθμηγράφου, με το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι, η διαφορά των όγκων είναι της τάξης του 38%, οι αιχμές χρονικά και ποσοτικά σχεδόν ταυτίζονται με πολύ μικρές διαφορές, ωστόσο τις μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάζει ο κλάδος καθόδου των πλημμυρογραφημάτων. Αυτό θα μπορούσε να εξαιρεθεί με τη χρήση διαφορετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, μεγαλύτερου χρόνου βάσης και χρόνου ανόδου.

Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η υδραυλική προσομοίωση εκτελέστηκε για 20 km του ποταμού Σαρανταπόταμου για τις τρεις περιόδους επαναφοράς και για το παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης.

Το γεωμετρικό αρχείο δημιουργήθηκε στο HEC-GeoHMS, και οι διατομές που επιλέχθηκαν να εισαχθούν στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS, βρίσκονται σε χαρακτηριστικές θέσεις των λεκανών απορροής (αρχή, μέση, τέλος). Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε, ήταν η αδυναμία αποτύπωσης του γεωγραφικού ανάγλυφου στην κοίτη, εξαιτίας της πολύ μικρής ανάλυσης (ισοδιάσταση ισούψων 20 m). Δυο από τις διατομές στην ανάντη θέση (περιοχή Οινόη) και στην κατάντη θέση (περιοχή Μαγούλα), σχεδιάστηκαν εκ νέου στο HEC-RAS, χάρη στην επιτόπου αποτύπωση

από τοπογραφικό συνεργείο και χάραξη μηκοτομής, από την οποία προκύπτουν τα υψόμετρα του πυθμένα σε κάθε σημείο του υδατορεύματος.

Μετά την ολοκλήρωση του γεωμετρικού αρχείου και την εισαγωγή στο HEC-RAS, ακολουθεί η δημιουργία του υδρολογικού αρχείου, το οποίο περιλαμβάνει τις παροχές αιχμής όπως αυτές προέκυψαν από το HEC-HMS. Η υδραυλική προσομοίωση εκτελέστηκε για μόνιμη ροή, σε συνθήκες μεικτής ροής (εναλλαγή υποκρίσιμης/ υπερκρίσιμης ροής). Σε πολλά σημεία, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή νέων διατομών με βαθμιαίως αυξανόμενες παροχές προς αποφυγή και εξάλειψη των παρουσιαζόμενων σφαλμάτων και προειδοποιητικών μηνυμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση του παρατηρημένου επεισοδίου βροχής στην κατάντη θέση Μαγούλα όπου έχει τοποθετηθεί σταθμηγράφος, η παρατηρημένη τιμή στάθμης μετρήθηκε 0.644 m και η προσομοιωμένη τιμή υπολογίστηκε στα 0.64 m.

Τέλος, τα αποτελέσματα από την προσομοίωση αυτή, εξάγονται εκ νέου στο HEC-GeoRAS, για τη σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών και χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης.

ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Η χαρτοσύνθεση έγινε σε περιβάλλον HEC-GeoRAS για τις τρεις περιόδους επαναφοράς και το παρατηρημένο επεισόδιο βροχής.

Εξάγονται τα πιεζομετρικά βάθη σε κάθε διατομή, όπως υπολογίστηκαν στην υδραυλική προσομοίωση, και στη συνέχεια αυτά συγκρινόμενα με τα υψόμετρα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, δίνουν τα βάθη της πλημμυρικής κατάκλυσης και τις αντίστοιχες εκτάσεις.

Τα εμβαδά των κατακλυζόμενων περιοχών δεν έχουν μεγάλες διαφορές για τις τρεις περιόδους επαναφοράς, δεν παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση του εμβαδού κατακλυζόμενης έκτασης με την αυξανόμενη μέγιστη πλημμυρική παροχή (ανά περίοδο επαναφοράς). Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η μικρή ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση των χαρτών πλημμύρας.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαδικασία των προσομοιώσεων, υδρολογική και υδραυλική, πραγματοποιήθηκαν με το ελεύθερο λογισμικό HEC. Σε γενικές γραμμές, πρόκειται για ένα μοντέλο στο οποίο, αν εξαιρεθούν τα λειτουργικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν (π.χ. τρόπος εισαγωγής δεδομένων), ανταποκρίνεται σε

ικανοποιητικό βαθμό στις ανάγκες των εν λόγω διαδικασιών. Τα εγχειρίδια χειρισμού καθοδηγούν το χρήστη σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο αρκετά κωλύματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας επιλύθηκαν με την αναζήτηση σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές. Για τις ανάγκες που πιθανόν θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό, οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα, όπως έχει παρατηρηθεί και από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Σε συνδυασμό με την ευκολία εύρεσης του, και του μηδενικού κόστους του, αξίζει να χρησιμοποιηθεί από τους ενδιαφερόμενους χρήστες.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, η εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας αποτελεί το πρώτο στάδιο πριν την εκπόνηση των ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου. Φυσικό επακόλουθο είναι η εκπόνηση χαρτών κινδύνων πλημμύρας, δηλαδή, ένας συνδυασμός των χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης και των χρήσεων γης, όπου θα απεικονίζονται πλέον οι επιπτώσεις των πλημμυρών τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και σε ανθρώπινο δυναμικό. Συνεπώς, μια αναμενόμενη χρήσιμη εξέλιξη της παρούσας εργασίας είναι η κατάρτιση ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας που να απεικονίζουν τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των πλημμυρών.

Ενδιαφέρον βέβαια παρουσιάζει, η διερεύνηση και η εφαρμογή και άλλων μεθόδων υπολογισμού των μαθηματικών προτύπων για τις απώλειες βροχής, την άμεση απορροή, τη βασική ροή και τη διόδευση πλημμύρας, που προσφέρει το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση των εξαγόμενων πλημμυρογραφημάτων και να εφαρμόζεται δεδομένου των συνθηκών η βέλτιστη μέθοδος υπολογισμού των αντίστοιχων διεργασιών.

- Γαλιουνά, Ε., 2011. *Διερεύνηση εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση των πλημμυρικών αιχμών στην Κύπρο*. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 169 σελίδες.
- Γιαννόπουλος, Σ., 2005. *Μαθήματα Τεχνικής Υδρολογίας*. Έκδοση Τμήμα εκδόσεων 2005-2006, 154 σελίδες. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
- Γκιόκας, Ε.-Α. 2009. *Κατάρτιση Μεθοδολογικού Πλαισίου για την Εκπόνηση Χαρτών Πλημμύρας. Εφαρμογή στον Νομό Αρκαδίας*. Μεταπτυχιακή εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 95 σελίδες.
- Ευστρατιάδης, Α., 2008. *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*. Διδακτορική διατριβή. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 391 σελίδες.
- Ευστρατιάδης, Α. και Μαμάσης, Ν., 2011. *Η Οδηγία πλαίσιο 2007/60 για την εκτίμηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης*. Παρουσίαση για το μάθημα «Διαχείριση υδατικών πόρων» του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών πόρων. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κοζώνης, Δ., 1995. *Κατάρτιση όμβριων καμπυλών με ελλιπή δεδομένα. Εφαρμογή στην περιοχή της Στερεάς Ελλάδας*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία*. Έκδοση 3, 418 σελίδες. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Μαμάσης, Ν., 2001. *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριάσιου πεδίου*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2011. *Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης*. Έκδοση 4, 193 σελίδες. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Λέκκας, Ε., 2009. *Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές - Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης στελεχών τοπικής αυτοδιοίκησης*, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

- Μαμάσης, Ν., 2011. *Υδρογραφήματα*. Παρουσίαση στο μάθημα «Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα» του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών πόρων. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ. και Μπαλτάς, Ε., 2003. *Τεχνική Υδρολογία* γ έκδοση 297 σελίδες. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ντοανίδης, Λ., 2007, *Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC HMS σε ενιαία και ημικατανεμημένη μορφή στη λεκάνη του ποταμού Καλαμά*. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 111 σελίδες.
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2007, για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, EL, 6.11.2007: L288/27-L288/34.
- Οργανισμός Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος Αθήνας (ΟΡΣΑ), 2011. *Οριοθέτηση ζωνών προστασίας και καθορισμός όρων και περιορισμών δόμησης κατά ζώνη στους ορεινούς Όγκους Δυτικής Αττικής*. Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Συνεδρίαση 10. Αριθμός πράξης 4.
- Ράμπιας, Ε., 2007. *Υδραυλική προσομοίωση ποταμού Αλιάκμονα με χρήση του μοντέλου HEC-RAS*. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 147 σελίδες.
- Στάμου, Λ. και Σκοπελίτη, Α., 2009. Παρουσίαση στο μάθημα «Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους» του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Εργαστήριο Υδρολογίας και αξιοποίησης υδατικών πόρων. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Φαρμακάκη, Αι., 2012. *Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας*. Μεταπτυχιακή εργασία. ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ackerman, P.E., Cameron, T., 2011. HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC RAS using Arc GIS User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- Bedient, P., Huber, W. and Vieux, B., 1992. *Hydrology and floodplain analysis*. Addison-Wesley, New York, N.Y.

Brunner, G., 2008. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

Doan, J. H., and Fleming, M. J., 2010. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension Version 5.0 User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

European Environmental Agency (EEA), 2003. *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe*. Environmental issue report No 35. EEA. Copenhagen, Denmark.

EXCIMAP, 2007, Handbook on good practices for flood mapping in Europe.

Fleming, M. J., and Scharffenberger, W. A., 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

Διαδικτυακοί τόποι

<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr>

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=246>