



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ – ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΥΡΩΤΑ ΠΟΤΑΜΟ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μαχαιράς Δημήτριος

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ε. Καθηγητής ΕΜΠ

Δ.Π.Μ.Σ.
«Επιστήμη
& Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ – ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΥΡΩΤΑ ΠΟΤΑΜΟ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μαχαιράς Δημήτριος

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ε. Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής Επιτροπή:
Μπαλτάς Ε. Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
Χονδρός Μ. Καθηγητής ΕΜΠ
Τσιχριντζής Β. Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας μια μεγάλη προσωπική προσπάθεια έφτασε στο τέλος της. Θέλω να αποδώσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Μπαλτά Ευάγγελο για τις πολύτιμες και αστείρευτες γνώσεις που μας μεταλαμπάδευσε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Η συμβολή του ήταν καθοριστική καθώς συνέβαλε αποτελεσματικά στην προσωπική μου εξέλιξη, μόρφωση και στην αλλαγή της επαγγελματικής μου πορείας με απόλυτη επιτυχία.

Επίσης αποδίδω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Διδάκτωρ Μπουρνά Απόλλωνα για την θερμή του υποστήριξη και την πολύτιμη βοήθεια του κατά το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Οι εις βάθος γνώσεις του και η σχολαστική επίβλεψη της προόδου της εργασίας, αποτέλεσαν τον ακρογωνιαίο λίθο μιας άριστης συνεργασίας.

Τέλος θέλω να αποδώσω ευχαριστίες στην οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια αυτής της προσπάθειας και στον καλό μου φίλο Φράγκο Θεόδωρο, ο οποίος τοποθέτησε το δικό του λιθαράκι, κατά την διάρκεια της προσωπικής αυτής εξέλιξης και επαγγελματικής επιτυχίας.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εν λόγω διπλωματική εργασία του μεταπτυχιακού φοιτητή Μαχαιρά Δημητρίου έχει ως στόχο την λεπτομερή περιγραφή και παρουσίαση των μεθόδων Φυσικών λύσεων για την αντιμετώπιση και πρόληψη πλημμυρικών επεισοδίων, που βασίζονται στη Φυσική Διαχείριση Πλημμυρών (Nature Flood Management). Ο όρος Φυσικές λύσεις περιγράφει αυτές τις τεχνικές που αξιοποιούν φυσικά υλικά, μακριά από τις παρεμβάσεις της κλασσικής μηχανικής, έχοντας ως στόχο την επιβράδυνση και μείωση του μεγέθους της πλημμυρικής αιχμής, αυξάνοντας τον χρόνο συγκέντρωσης, σε μια υδρολογική λεκάνη απορροής.

Αναλυτικότερα, εξετάζεται η περίπτωση του Ευρώτα ποταμού και πιο συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις πλημμυρικών επεισοδίων, προερχόμενες από βροχοπτώσεις διαφορετικών περιόδων επαναφοράς, στην περιοχή της Σκάλας Λακωνίας. Δεδομένου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) πραγματοποιήθηκε πλήρης γεωμορφολογική ανάλυση, επί της συνολικής λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού, διαμέσου των λογισμικών συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας ArcGis PRO και QGIS αντίστοιχα. Συμπληρωματικά, σχεδιάστηκαν υετογραφήματα διαφορετικών περιόδων επαναφοράς, χρησιμοποιώντας την προγενέστερη αλλά και την επικαιροποιημένη σχέση όμβριων καμπυλών και εφαρμόστηκαν διαφορετικά μοντέλα βροχής-απορροής προς σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε πλήρης υδρολογική και υδραυλική ανάλυση, διαμέσου των λογισμικών HEC-HMS και HEC-RAS, τα οποία αναπτύχθηκαν στο κέντρο υδρολογίας του σώματος μηχανικών του Αμερικανικού στρατού. Ακολούθως, εφαρμόστηκαν μερικές από τις τεχνικές Φυσικών λύσεων (Nature-Based Solutions), σε επίπεδο λεκάνης απορροής, επισημαίνοντας τις διαφορές που προκύπτουν κατά περίπτωση και απεικονίστηκαν γραφικά οι μεταβολές των μελετώμενων μεγεθών κάθε προσομοιωμένου πλημμυρικού επεισοδίου ξεχωριστά.

Τέλος, αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα των φυσικών αυτών παρεμβάσεων έναντι πλημμυρικών επεισοδίων διαφορετικών περιόδων επαναφοράς και παρατέθηκαν τα συμπεράσματα στα οποία οδηγήθηκε ο γραφών με τη πρόοδο της μελέτης.

Λέξεις Κλειδιά: Πολυκριτηριακή Ανάλυση, Μέθοδοι Φυσικών λύσεων (Nature-Based Solutions), Γεωμορφολογική Ανάλυση, Υδρολογική Ανάλυση, Υδραυλική Ανάλυση, Ευρώτας ποταμός, Σκάλα Λακωνίας, ArcGis PRO, QGIS, HEC-HMS, HEC-RAS.

ABSTRACT

The diploma work of the postgraduate student Machairas Dimitrios aims at the detailed description and presentation of the methods of Nature-Based Solutions for dealing with and preventing flood events, based on Nature Flood Management. The term Nature-Based Solutions describes those techniques that utilize natural materials, far from classical engineering interventions, with the aim of slowing down and reducing the size of the flood peak, increasing the concentration time, in a hydrological catchment.

In more detail, the case of the Evrotas river is examined and more specifically, simulations of flood events, resulting from rainfall of different return periods, were implemented in the area of Skala Lakonias. Given the digital terrain model (DEM), a complete geomorphological analysis was carried out on the entire Eurotas river basin, through the geographic information software systems ArcGis PRO and QGIS respectively. In addition, hydrographs of different return periods were plotted using both the previous and the updated relationship of rainfall curves and different rainfall-runoff models were applied to compare the resulting results.

In addition, a full hydrologic and hydraulic analysis was performed using HEC-HMS and HEC-RAS software developed at the US Army Corps of Engineers Hydrology Center. Subsequently, some of the Nature-Based Solutions techniques were applied, at the watershed level, highlighting the differences that arise on a case-by-case basis and graphically depicting the changes of the studied sizes of each simulated flood episode separately.

Finally, the effectiveness of these natural interventions against flood events of different recovery periods was evaluated and the conclusions to which the writer was led by the progress of the study were listed.

Keywords: Multicriteria Analysis, Nature-Based Solutions, Geomorphological Analysis, Hydrological Analysis, Hydraulic Analysis, Evrotas River, Skala Lakonias, ArcGis PRO, QGIS, HEC-HMS, HEC-RAS.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
EXTENDED ABSTRACT	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	36
1.1 Φυσικοί κίνδυνοι και καταστροφές	36
1.2 Πλημμύρες	37
1.3 Αντιπλημμυρική προστασία	40
1.3.1 Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ για τις πλημμύρες.....	40
1.3.2 Διαχείριση πλημμυρών με λύσεις βασισμένες στη Φύση.....	42
1.4 Αντικείμενο της Εργασίας	43
1.5 Δομή Εργασίας	44
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – NATURE BASED SOLUTIONS.....	45
2.1 Εισαγωγή	45
2.2 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων για αντιπλημμυρική προστασία	48
2.2.1 Αποκατάσταση των μαιανδρισμών ποταμών	48
2.2.2 Δεξαμενές ανάσχεσης και λίμνες συγκράτησης πλημμυρικών υδάτων .	50
2.2.3 Τοποθέτηση Ξύλινων Φραγμών-Leaky Barriers	53
2.2.4 Δενδροφύτευση επί της υδρολογικής λεκάνης απορροής ποταμού	55
2.2.5 Ενίσχυση πρανών ποταμού	58
2.2.6 Αποκατάσταση επανασύνδεσης ποταμού-πλημμυρικής πεδιάδας	62
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	70
3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	70
3.1.1 Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)	70
3.1.2 Ποταμοί Υδατικού Διαμερίσματος (EL03).....	71
3.1.3 Κωμόπολη Σκάλας-Νομός Λακωνίας	74

3.1.4	Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Ευρώτα	75
3.1.5	Χρήσεις και Κάλυψη Γης	76
3.2	Εισαγωγή και επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM).....	78
3.3	Γεωμορφολογία ΛΑΠ Ευρώτα	87
3.4	Θέση προσομοίωσης	89
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	91
4.1	Εισαγωγή – Γενικό Πλαίσιο	91
4.2	Πολυκριτηριακή ανάλυση	92
4.2.1	Διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP)	92
4.3	Μοντέλα βροχής – απορροής	95
4.3.1	Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder.....	95
4.3.2	Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Soil Conservation Service (SCS)	98
4.3.3	Μέθοδος Ισόχρονων Καμπυλών	99
4.3.4	Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης κατά Giandotti	104
4.4	Υδρολογικές απώλειες κατά Soil Conservation Service (SCS).....	106
4.5	Μέθοδος Υδρολογικής Διόδευσης	110
4.6	Υετογράφημα Σχεδιασμού.....	110
4.6.1	Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών.....	111
4.6.2	Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες.....	112
4.6.3	Άμεση επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακής βροχοπτώσης - Μέθοδος πολυγώνων Thiessen	113
4.6.4	Χρονική κατανομή βροχοπτώσεων – Η μέθοδος των Εναλλασσόμενων Υψών βροχής.....	115
4.7	Ανάλυση εφαρμογής μεθόδων Φυσικών λύσεων.....	116
5.	ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ..	119
5.1	Υδρολογική προσομοίωση με το λογισμικό HEC-HMS	119
5.1.1	Δημιουργία μοντέλου λεκάνης απορροής.....	120
5.2	Υδραυλική προσομοίωση με το λογισμικό HEC-RAS.....	122
5.2.1	Εισαγωγή δεδομένων	122
5.2.2	Σχεδιασμός γεωμετρίας περιοχής προσομοίωσης	123
5.2.3	Εισαγωγή δεδομένων οριακών συνθηκών και χαρακτηριστικών προσομοίωσης.....	124
5.2.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	125

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	126
6.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση.....	126
6.1.1 Εφαρμογή αναλυτικής ιεράρχησης (AHP).....	126
6.1.2 Σύνθεση κριτηρίων – Αποτελέσματα	134
6.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Βροχής-Απορροής	135
6.2.1 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder.....	135
6.2.2 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS.....	137
6.2.3 Μοντέλο Ισόχρονων Καμπυλών.....	139
6.2.4 Συγκριτική Αξιολόγηση.....	144
6.2.5 Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων υπολογισμού Χρόνου Συγκέντρωσης.....	144
6.3 Υετογράφημα Σχεδιασμού.....	145
6.3.1 Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών.....	145
6.3.2 Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες.....	148
6.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	149
6.4 Υδρολογική Ανάλυση – Πλημμυρογραφήματα	150
6.4.1 Πλημμυρογραφήματα προγενέστερης μορφής όμβριων καμπυλών ...	150
6.4.2 Πλημμυρογραφήματα επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών.....	152
6.5 Εφαρμογή μεθόδων Φυσικών λύσεων	155
6.5.1 Μέθοδος δένδροφύτευσης επί της λεκάνης απορροής ποταμού.....	155
6.5.2 Μέθοδος αποκατάστασης μαιανδρισμών ποταμών	156
6.5.3 Μέθοδος δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων.....	158
6.5.4 Ενημερωμένοι χρόνοι συγκέντρωσης υπολεκανών απορροής κατά Giandotti	159
6.5.5 Πλημμυρογραφήματα Δένδροφύτευσης και Αποκατάστασης Μαιανδρισμών ποταμών	159
6.5.6 Πλημμυρογραφήματα με επιπρόσθετη εφαρμογή μεθόδου λεκανών ανάσχεσης	161
6.6 Χάρτες πλημμυρικού πεδίου	163
6.6.1 Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών.....	163
6.6.2 Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες.....	166
6.6.3 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων	168
6.6.4 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων και Δεξαμενών Ανάσχεσης	169
6.6.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	171

6.7 Συγκριτική Αξιολόγηση μεθόδων – Τελικό πλημμυρογράφημα λεκάνης απορροής Ευρώτα ποταμού	172
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	174
7.1 Σύνοψη	174
7.2 Συμπεράσματα	174
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	177
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	178

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Floods affect people worldwide more than any other natural hazard. They can cause extensive damage to property and lead to loss of human life and various organisms. Furthermore, as the planet continues to diversify due to climate change, the intensity and frequency of floods will likely increase. EU Directive 2007/60 defines flooding as 'the temporary covering of land by water, not normally covered by it, which includes flooding from rivers, mountain streams, Mediterranean ephemeral watercourses and flooding from the sea in coastal areas, excluding flooding from drainage systems' (European Union 2007). The object of this work is the identification and application of the most appropriate methods of Nature-Based Solutions, within the hydrological basin of the Evrotas River, with the aim of reducing the effects of an upcoming flood in the wider area of Skala Lakonias.

More specifically, hydraulic control simulations will take place in the section of the river, upstream of the area where the Skala Lakonias bridge is located, emphasizing at the same time the importance of the quality of the construction, since it joins the two sides of the Prefecture of Lakonias. Following a geomorphological, hydrological and hydraulic analysis, certain methods of natural solutions will be applied in the bed, in the tributary zone of the river and in general throughout the area of the basin and the effect of each method in reducing the flood risk to the downstream areas will be evaluated.

Nature-Based Solutions methods

Nature Flood Management (NFM) and Working with Natural Processes (WWNP) aim to reduce the risk of flooding and coastal erosion, include the implementation of measures that help protect, restore and mimic the natural functions of watersheds, of floodplains, rivers and coasts. WWNP takes many different forms and can be applied to urban and rural areas, as well as rivers, estuaries and coastlines. NFM achieves the reduction of the maximum water volume of a flood (peak flood discharge) by aiming to delay the arrival of the flood peak downstream increasing the time available

for preparation and disaster mitigation. The term Nature-Based Solutions (NBS) is given to the measures and techniques used to reduce flood risks as it represents nature-based solutions, a multi-benefit approach to restoring and protecting ecosystems, responsive to social change and improves biodiversity and human well-being. Nature-Based Solutions include techniques based on natural processes, a watershed approach, with the goal of preserving natural water storage capabilities within the landscape. Specifically, NBS techniques aim to:

- i. Reducing the flood supply, reducing the size and impact of a flood on downstream areas.
- ii. The delay in the arrival of the flood supply at the outlet of the basin, providing sufficient preparation time.
- iii. Maintaining the storage of the flood volume within the river, contributing to the reduction of sediment deposition within the channel.

The NBS flood protection methods on which the said study was based and which will be evaluated for use as natural flood protection projects are as follows:

- i. **Restoration of meandering rivers**
- ii. **Retention ponds and flood water retention ponds**
- iii. **Installation of wooden barriers (Leaky Barriers)**
- iv. **Tree planting on the river watershed**
- v. **Reinforcement of river slopes**
- vi. **Restoration of river-floodplain reconnection**

Study Area and Data

The Eastern Peloponnese water division has an area of 8,442 km² and consists of three (3) River Basins (RBAs), those of the Tripoli Plateau (GR30), the Streams of the Argolic Gulf (GR31) and the Evrotas River (GR33) (Figure 1). The area of the basin of the Tripoli plateau is 907 km² and is located in the center of the Peloponnese. The basin in question extends to the Regional Unit of Arcadia, except for a very small part of it, which is located in the Regional Unit of Laconia. The area of the basin of the Streams of the Argolic Gulf is 5296 km² and occupies the eastern part of the Peloponnese. It extends to the Regional Units of the Islands of Attica, Argolis, Arcadia and

Lakonia. The area of the RBA of the river Evrotas is 2239 km². The RBA in question extends to the Regional Unit of Lakonia. In the northern part of the basin there is a part that belongs to the Regional Unit of Arcadia while in the west the basin occupies a small area of the Regional Unit of Messinia.

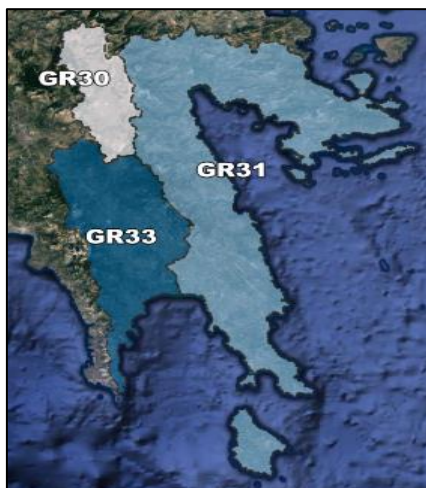


Figure 1: Eastern Peloponnese water compartment watershed subbasins

The main rivers of the Eastern Peloponnese Water Division are Evrotas, Inachos, Tanos, Vrsiatis, Marioremma and Rados (Figure 2). Evrotas is the largest river of the Water Division and the 2nd largest in the entire Peloponnese. Its important contributing branches are the Kapelas stream, the Kardari stream, the Oinoundas river (Kelefina stream), the Knakion river (Magulitsa), the tributary Vassilopotamos, the Xerias stream, the Bathyrema, the Rasina stream and the Levetsiotiko stream. The river Evrotas originates from the plateau of Arcadia, south of Mantinea, near Megalopolis and passing between the mountain ranges of Taygetus and Parnon, enters Lakonia, passes through Sparta, and empties into the Lakonic Gulf.

Skala is a town in the Prefecture of Lakonia and seat of the Municipality of Evrota. The settlement is located 38 kilometers south-east of the town of Sparta and has a population of 2902 inhabitants according to the 2021 census. The name of the community comes from the Vassilopotamos wharf that existed at this location when the river was built to become navigable and serve the movement of goods during the Venetian period. The plain of Skala is crossed by two rivers, Vassilopotamos and Evrotas, which contribute to it being one of the most fertile areas of Lakonia.

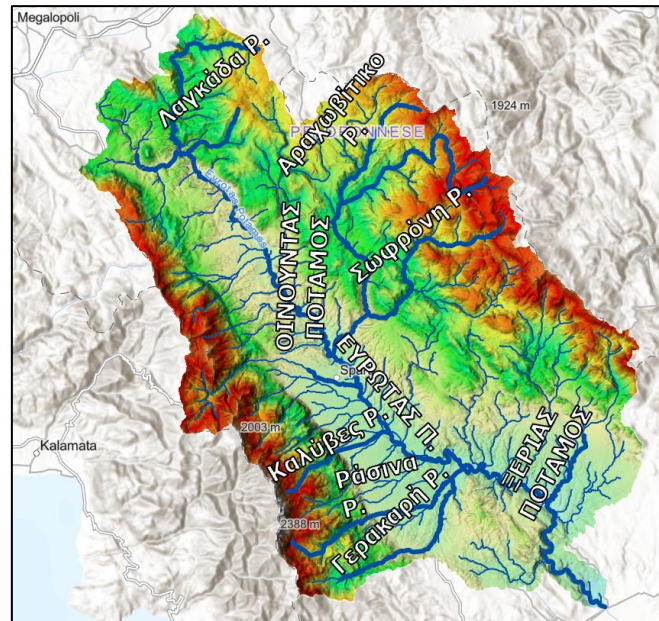


Figure 2: Terrain and the main tributaries of the river Evrotas



Figure 3: Evrotas river next to the town of Skala Lakonias

The initial stage of the geomorphological analysis of the Evrotas river basin is the definition of the study area with strong flood and historical interest and consequently an immediate need for anti-flood shielding. One such point is located in the area of Skala Lakonias, as mentioned above, and more specifically on the old bridge that connects one side of Lakonia to the other (Figure 3), over the river Evrotas, with an initial construction year of 1896. Although the construction of a of new infrastructure, to meet the requirements for safe transport, in the area the recorded historical flooding events prove its vulnerability due to the rushing waters of the river during periods of heavy rainfall.

The entire process of geomorphological analysis (Figure 4) was implemented in a GIS environment and more specifically in the ArcMap, ArcGis Pro and QGIS platforms. The Digital Terrain Model of the Eastern Peloponnese Watershed, also known as DEM (Digital Elevation Model), was used as data. In our study, the DEM file was converted from the ETRS89 ETRS LAEA projective system to the GGRS 87/Greek Grid (EPSG:2100) since the source of our file download, the site <https://www.copernicus.eu/en>, provided us with it in the original projective system mentioned. In addition, we mention that the dimensions of the cells of which it is composed are 25mx25m.

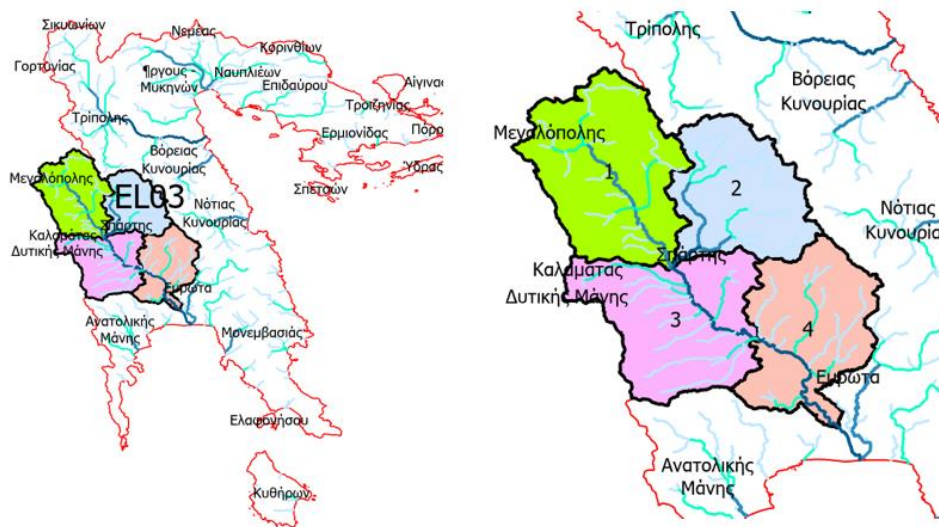


Figure 4: Evrotas river main RBA and subbasins

Methodology

Multi-criteria Analysis

One of the most important and widespread methods of multi-criteria analysis is the Analytical Hierarchy Process (AHP). AHP promotes procedures to assign the weights and scores achieved by the alternatives based on pairwise comparisons, between criteria and between options, respectively. So, in order to calculate the weights, certain questions are asked to the decision-maker, about the importance - comparability of the criteria with each other (how important is one criterion in relation to another), aimed at the decision-maker making the best possible decision. AHP is a method of dividing the problem into sub-problems (hierarchy method) so that they can be evaluated and understood better. The estimates obtained are converted into

numerical values and processed in order to rank each alternative on a numerical scale. Areas of high flood risk are shown in red color and the black circle including our study area (Figure 5).

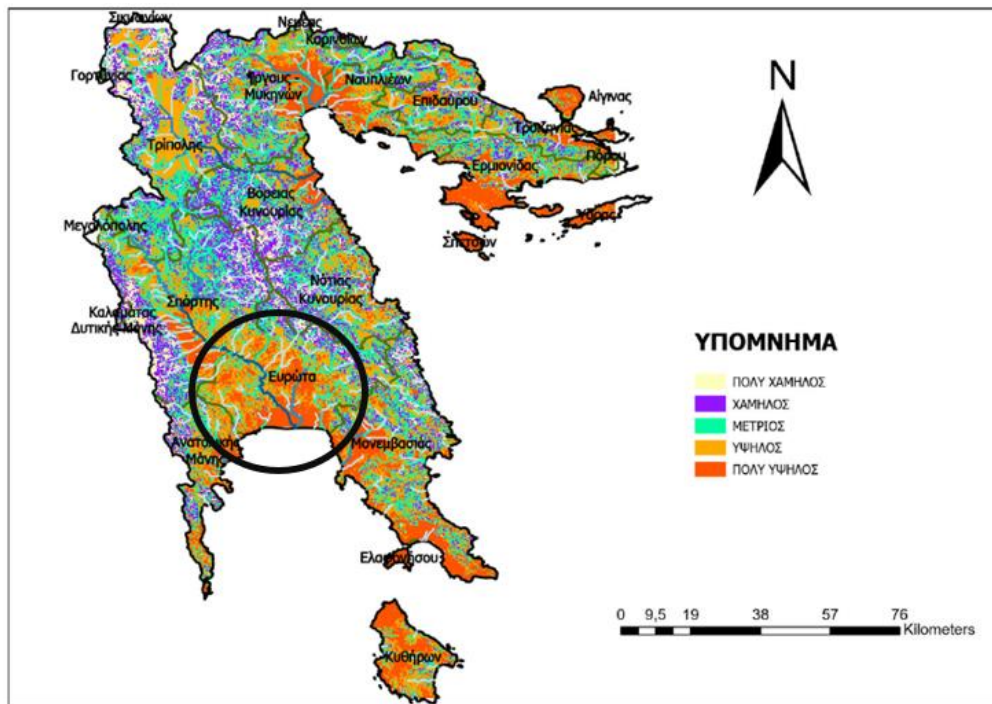


Figure 5: Results of multi-criteria analysis, flood risk, water division of Eastern Peloponnese (EL03)

Rainfall Run-Off Models

Three different rainfall runoff models were applied in the study to compare their results. Snyder unit hydrograph, Soil Conservation Service unit hydrograph and Isochronous curve calculation model more accurately applied. The curves that identify points in the basin from which the rainwater reaches its outlet at exactly the same time are called isochronous curves. The time it takes water to reach the outlet of the basin depends on the path it will follow (distance), the slopes and the characteristics of the surface on which it moves (Vafeiadis et al 2004). The peak discharge of each runoff model is shown in the Table 1.

Table 1: Discharge values (m³/s) for each subbasin of river Evrotas

	SUBBASIN 1	SUBBASIN 2	SUBBASIN 3	SUBBASIN 4
Snyder	63.50	41.47	73.08	57.04
SCS	39.53	43.47	44.93	36.40
Isochronous	43.07	36.89	69.50	42.88

Hydrological losses – Curve Number Calculation (Soil Conservation Service)

The Soil Conservation Service (SCS) has developed a widely used procedure that uses the Curve Number (CN) to calculate runoff. It incorporates the effects of land use and exploitation. The SCS process involves selecting a storm and calculating direct runoff using curves generated from field studies of the amount of observed runoff in various soil combinations. The Curve Number (CN) takes values from 0 to 100, usually 30 to 98 (Figure 6), is extracted from tables and depends on many factors such as soil type, land use, percentage and type of plant cover and initial soil moisture status. The Curve Number is additionally differentiated into three separate categories depending on the prevailing soil moisture conditions. Condition I: The condition in which the soils are dry, Condition II: The average case for annual floods and Condition III: If heavy rainfall or light rainfall and low temperatures have occurred in the last 5 days prior to the given storm and the soil is nearly saturated.

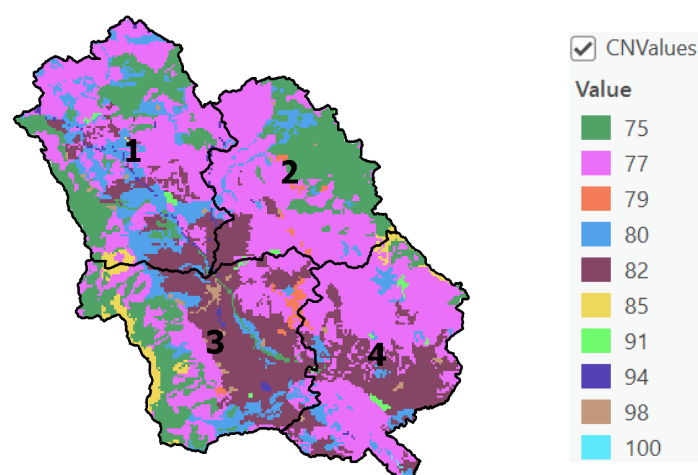


Figure 6: Curve Number values for Evrotas river subbasins

Hyetograph calculation

The estimation and measurement of rain for large areas is carried out through a network of weather stations. These are caged ground installations that contain a variety of measuring devices and meteorological instruments to measure various atmospheric variables such as precipitation. Rain gauges and rain gauges are most commonly used as the most widely used instruments for measuring point precipitation. For the study and description of heavy rainfall, it is necessary to process time series of annual maximum rainfall in multiple time scales (10min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h). The time series of maxima result from processing the records of the rain gauges (in continuous time) and the daily observations of the rain gauges. The primary data of all stations and corresponding instruments are formed in the form of a time series of annual maxima as maximum values of rain heights per hydrological year (Floods Ypeka et al. 2019).

Subsequently, statistical processing and analysis of the values in multiple measurements of years of different duration is carried out and then the rainfall curves are drawn up for rain gauge stations where such measurements are available. It is therefore easy to see that such rains are point measurements and require the application of a surface integration method, with spatial interpolation of the data, such as the Thiessen method.

Estimating flood graphs assuming that the rain has a constant intensity throughout its duration is considered incorrect because rains lasting several hours are too long to assume this. As long as the height of the rainfall and its duration are known, there are many methods that can be applied to calculate the shape of the hydrograph and by extension the temporal distribution of the rain. The most well-known ones used in hydrological planning are: SCS, Triangular Rain Chart, Alternating Rain Heights and the worst combination method. In the study in question, we will apply the method of alternating rain heights (Alternative Block Method), based on which the distribution of rain, within its known duration, is structured by the intensity-duration-return period relationship (Rain Curve). The largest height is placed in the central time interval and the immediately smallest in the next time interval to the right of the central one as it is followed by immediately next smaller to the left of this etc (Figure 8). The Figure 7 also shows the rain heights

according to the previous rain curve calculation equation while the Figure 8 shows rain heights according to the updated rain curve calculation equation.

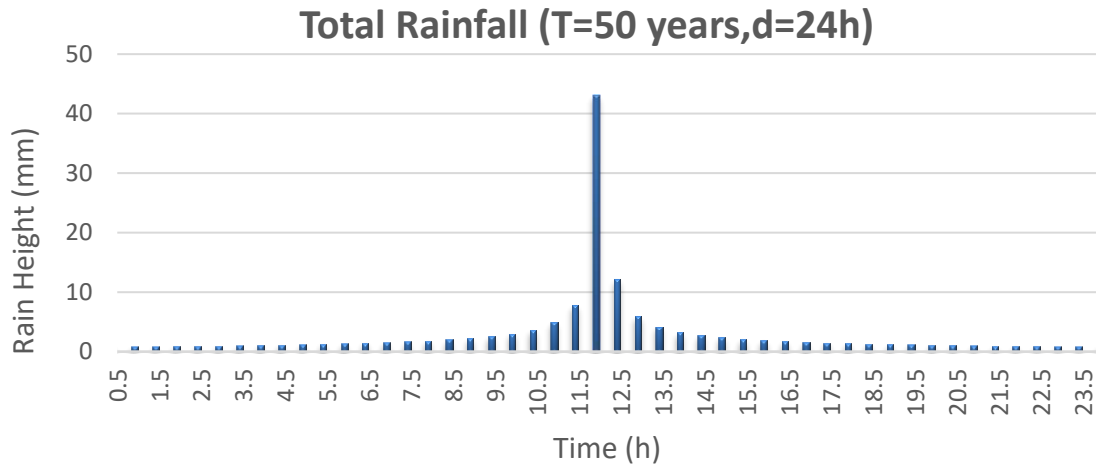


Figure 7: Hyetogram of flood designing for rain gauge station ‘Sellasia’ at Lakonia – Previous rain curve calculation equation

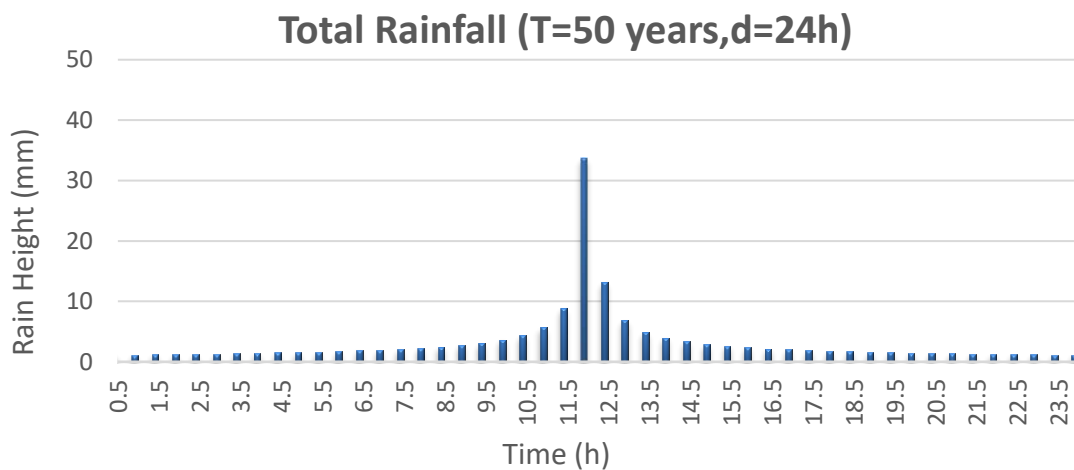


Figure 8: Hyetogram of flood designing for 1st subbasin - Updated rain curve calculation equation

Application of Nature-Based Solutions methods

1. River basin tree planting method

As part of the study, land use categories with an increased CN factor will be modified. Areas with Agricultural Pasture and Meadows (231), Complex Cultivation Patterns (242) and Land Commonly Occupied by Agriculture (243) were mainly selected. The land uses that will replace them are 312 describing Coniferous Forests as well as 313 - Mixed Forests, since both are characterized by lower runoff coefficient values. The total area required for the planning and implementation of the new land uses reached 27.14 Km² (Figure 9).

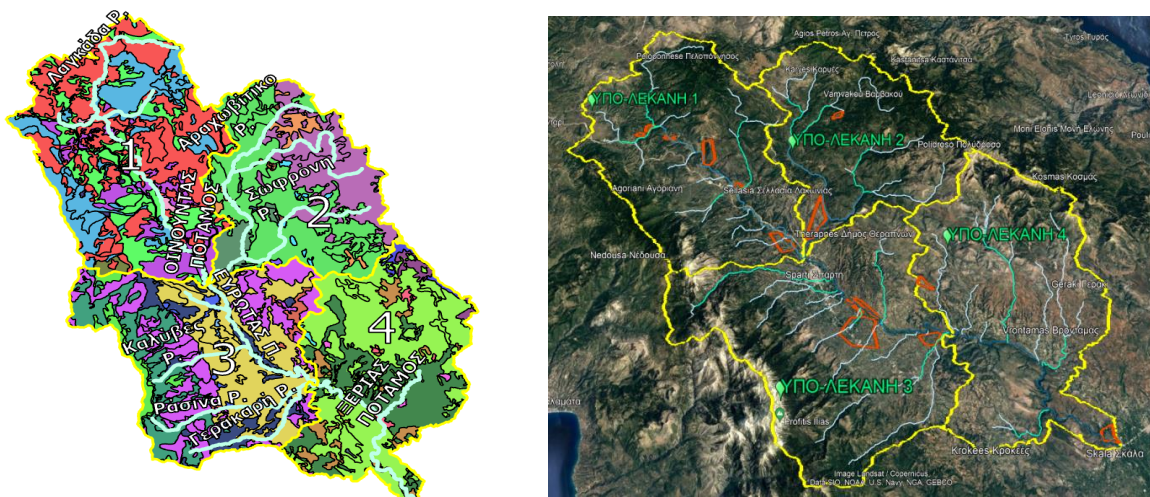


Figure 9: Existing land uses and CN values for each subbasin/Areas of application method

2. River Meandering Restoration

The meandering restoration technique causes an increase in the length of the river which effectively contributes to the increase of the lag time and the concentration time of the watershed under study. This translates into a reduction in flood volume since the length of the river is one of the key quantities in calculating the time of concentration upon which the entire hydrological analysis is based. In the present study, sections of the river were selected for restoration after investigating the existence or non-existence of a historical bed. According to the aerial photographs of the Hellenic Land Registry (Figure 10), the current state of the bed does not show significant deviations in terms of its position in relation to the past. In some cases, areas of suitable

height differences were identified, where they support the constructions of meanderings, causing an increase in the total length of the river. The total length of river sections where meandering restoration was applied corresponds to 8.53 Km.

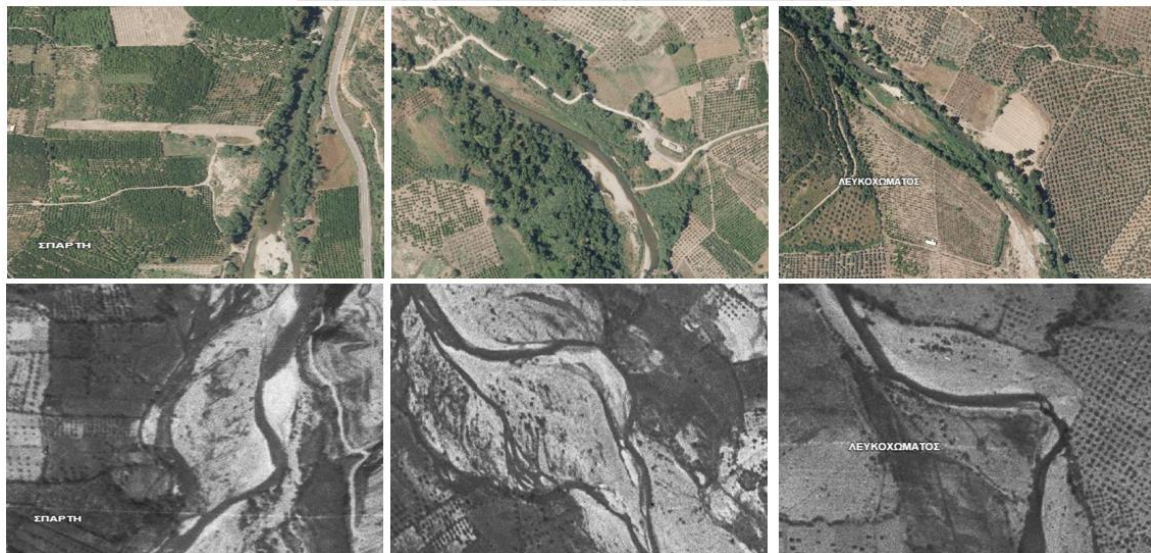


Figure 10: Investigation of the historical bed of the river Evrotas

3. Floodwater retention ponds method

In recent years, the goal in flood risk management is to minimize flood disasters by using flood water retention tanks. Their function is based on flood containment, since the main flood volume is discharged into them (Setty, 2007). Their use is considered as an effective measure for a modern flood risk management model. Detention basins are one of the best flood management practices to limit runoff caused by heavy rainfall. During the use of retention tanks in the case of the Evrotas River, a total land area of 1.06 Km² was required. After investigating the slopes as well as the land uses of the basin, upstream of the point of interest, it was found that the maximum volume that can be ensured for the creation of retention basins is 2,121,615 m³, given that the average depth of excavations within and outside the river is 2 m. The Figure 11 below show the effectiveness of the method for 5 and 50 years return periods respectively.

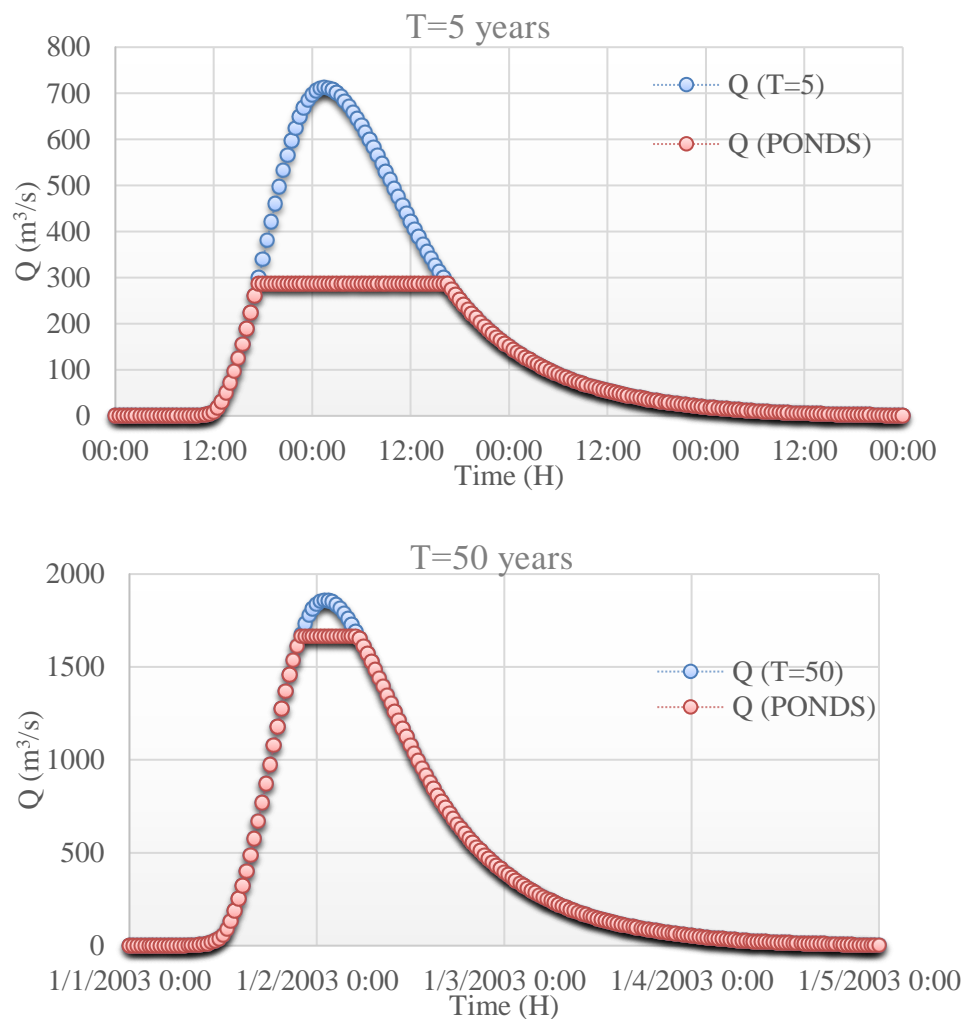


Figure 11: Flood hydrographs of different return periods without and with the use of retention ponds

Hydrological and Hydraulic model setup

Hydrological simulation with HEC-HMS Software

HEC-HMS was developed by the US Army Corps of Engineers and was designed to simulate rainfall-runoff processes in hydrological watersheds. It finds direct application in a wide range of geographical areas, solving a wide range of problems, such as the drainage channels of large river basins in small urban areas or smaller natural watersheds. It allows the selection of different models to calculate each individual component of the hydrological simulation. The software produces hydrographs that can be used directly or in conjunction with other software (HEC-RAS) for urban

flood management, river flow estimation, reservoir spillway design, flood mitigation, wetland hydrology etc.

In our case (Figure 12), we have defined 4 subbasins of the wider watershed where, through the hydrographic network, they will collectively end up at outlet 1 (Sink 1). The runoff of the 1st and 2nd subbasins will be directed to the 1st Junction from where it will pass through the Muskingum method to the 2nd Junction. In the 2nd Junction, the runoff of the 3rd subbasin will also end up, where together with the runoff of the 4th subbasin, they will now be channeled towards outlet 1 (Sink 1). We carried out simulations based on design rainfall of different return periods and more specifically for 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years, based on which flood graphs were calculated for each of the 4 subbasins separately. The Figure 13 shows the final flood graph of the watershed using the previous rain curve calculation equation and the Figure 14 displays the flood graph according to the updated rain curve calculation equation. Finally, the Figure 15 shows the effect of two firsts applied NBS methods on the Hydrograph.



Figure 12: Watershed model of river Evrotas

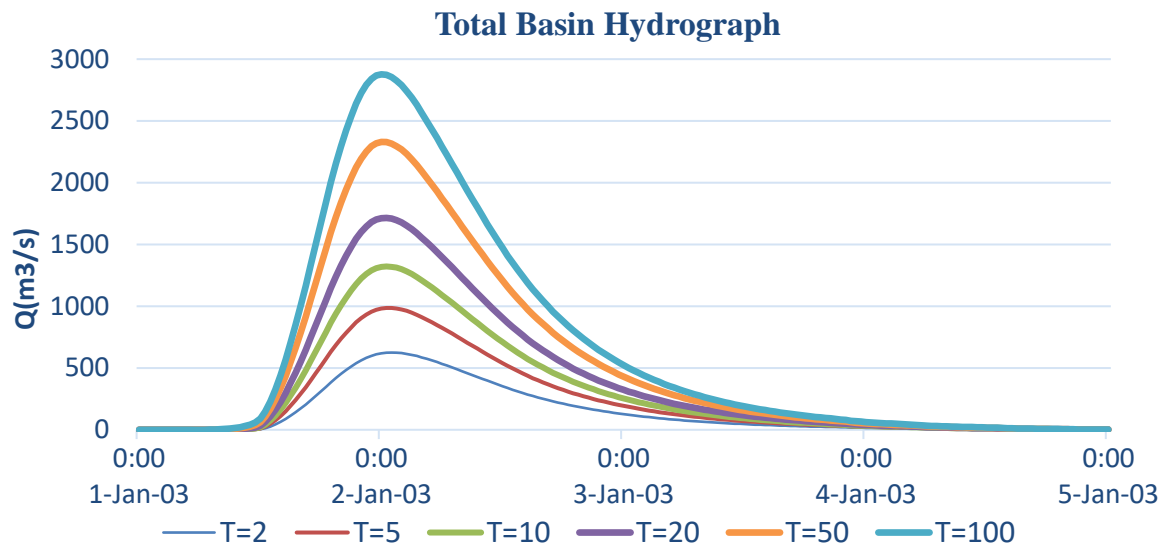


Figure 13: Hydrograph of Evrotas basin for different return periods - Previous rain curve calculation equation

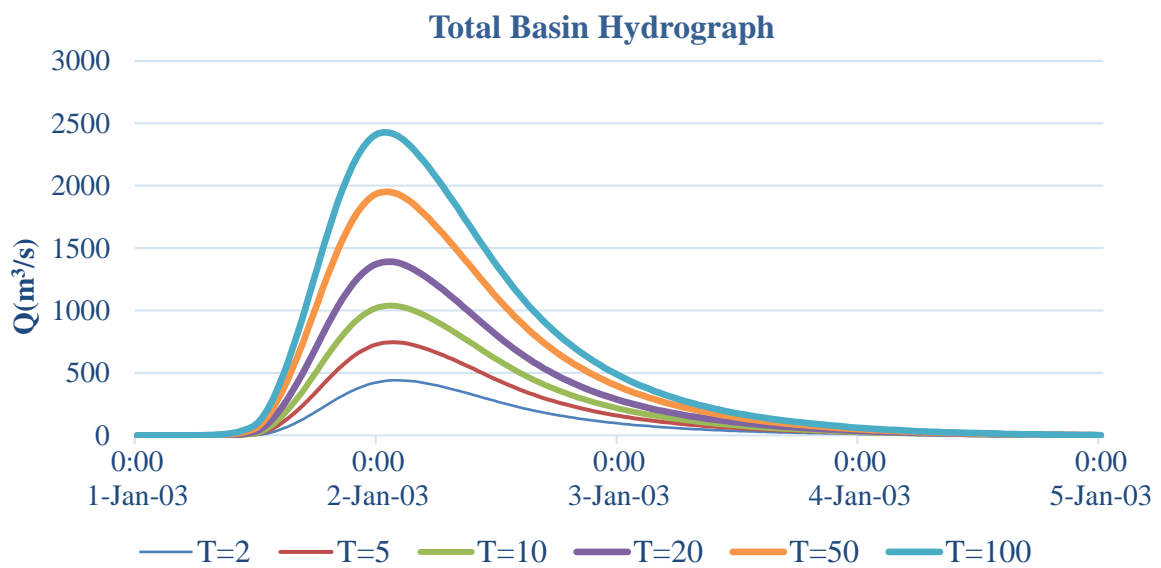


Figure 14: Hydrograph of Evrotas basin for different return periods - Updated rain curve calculation equation

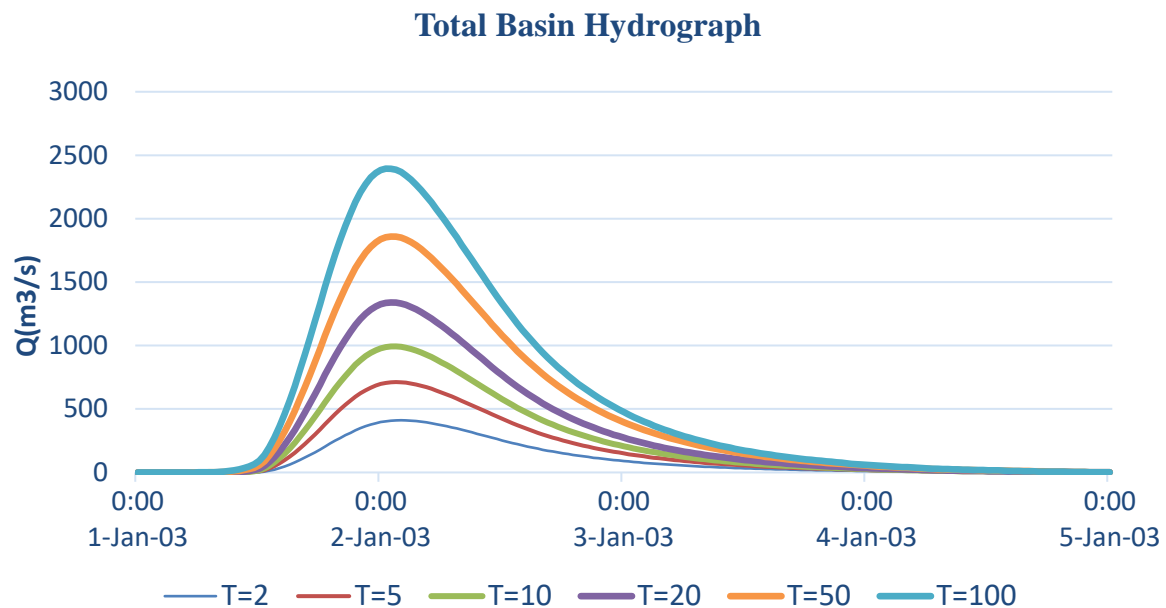


Figure 15: Hydrograph of Evrotas basin for different return periods with application of two firsts Nature-Based Solutions methods

Hydraulic simulation with HEC-RAS Software

HEC-RAS software was developed by the US Army Corps of Engineers as was HEC-HMS. It is widely known for its use in hydraulic analysis of rivers. It can perform one-dimensional (1D) or two-dimensional (2D) hydraulic controls while simulating steady or unsteady flow conditions in both dimensions. It makes use of Saint-Venant's equations of continuity and motion in both 1D and 2D analysis cases. In order to carry out a hydraulic simulation it is necessary to have at our disposal elements of the cross-sections of a watercourse or a digital terrain model (DEM) in the cases of two-dimensional analysis. Additionally, we are required to define a specific area within which the flood simulation will evolve. This is done through the 2D Flow Area command where the software constructs a grid, of some of our dimensions, based on which the hydraulic analysis will be performed (Figure 16).



Figure 16: Geometry of hydraulic control area at Skala Lakonias bridge

As boundary condition data we define the flow control points upstream and downstream of the simulation area. As for the upstream area, water inflow usually takes place from there through a flood graph that we have calculated in the HEC-HMS software during the hydrological analysis stage. Downstream of the study area, we define the flow depth and substrate slope value essentially determining whether it is a subcritical or supercritical flow case. We report that in small soil slopes the normal flow depth is greater than the critical one while in large slopes it is less than the critical one. Finally, in order to run the process correctly and without errors, we need to set the exact duration of the simulation in the software.

It is considered necessary that the exact time step of the calculations is identical to the time step of the flood graph that we have entered. In the Figure 17 and Figure 18 we observe values for depth flow (m) and flow velocity (m/s) obtained from the 2D simulation in HEC-RAS for different return periods using the hyetogram that calculated by the previous rain curve equation.

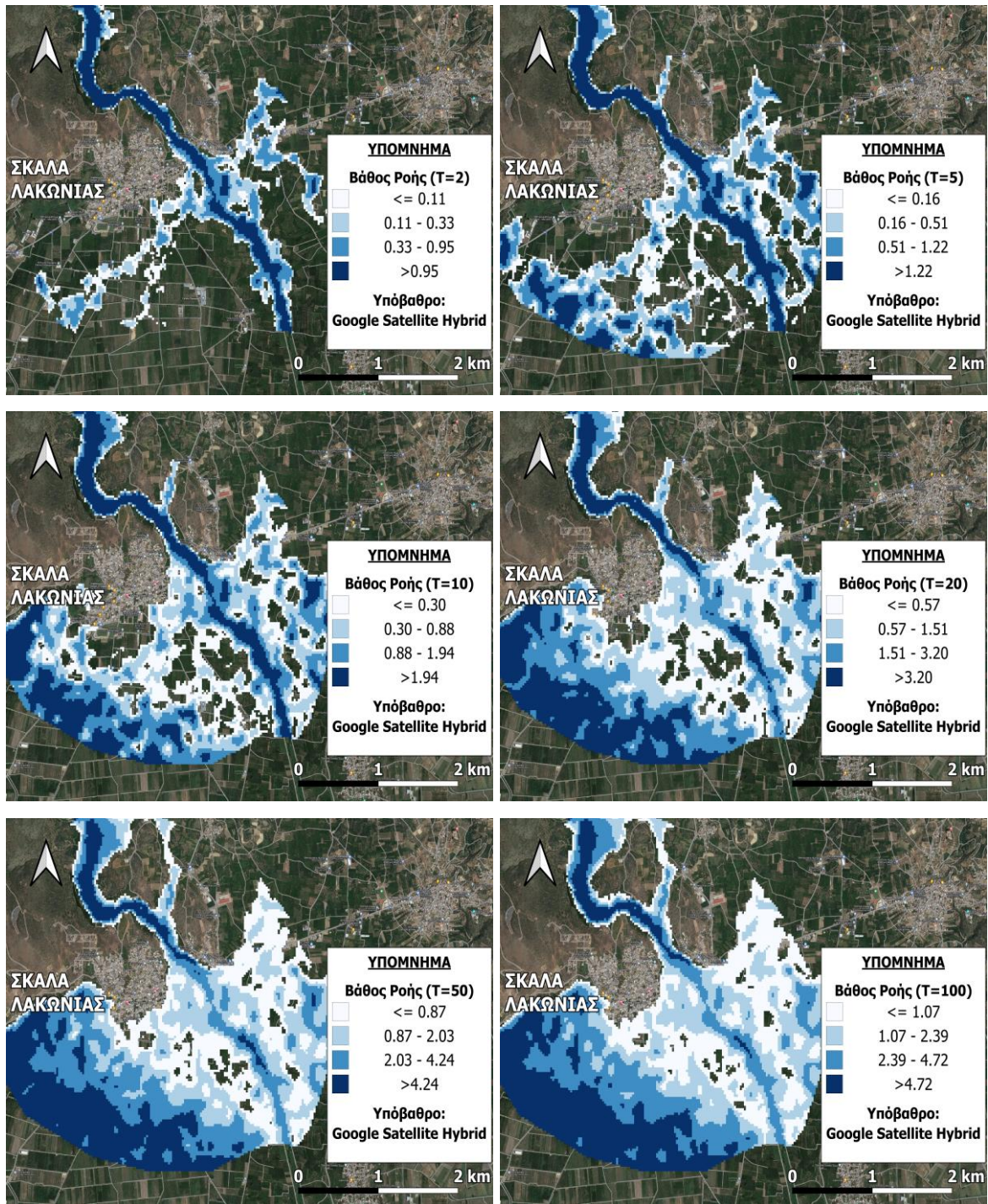


Figure 17: Skala Lakonias flood field flow depths of different return periods

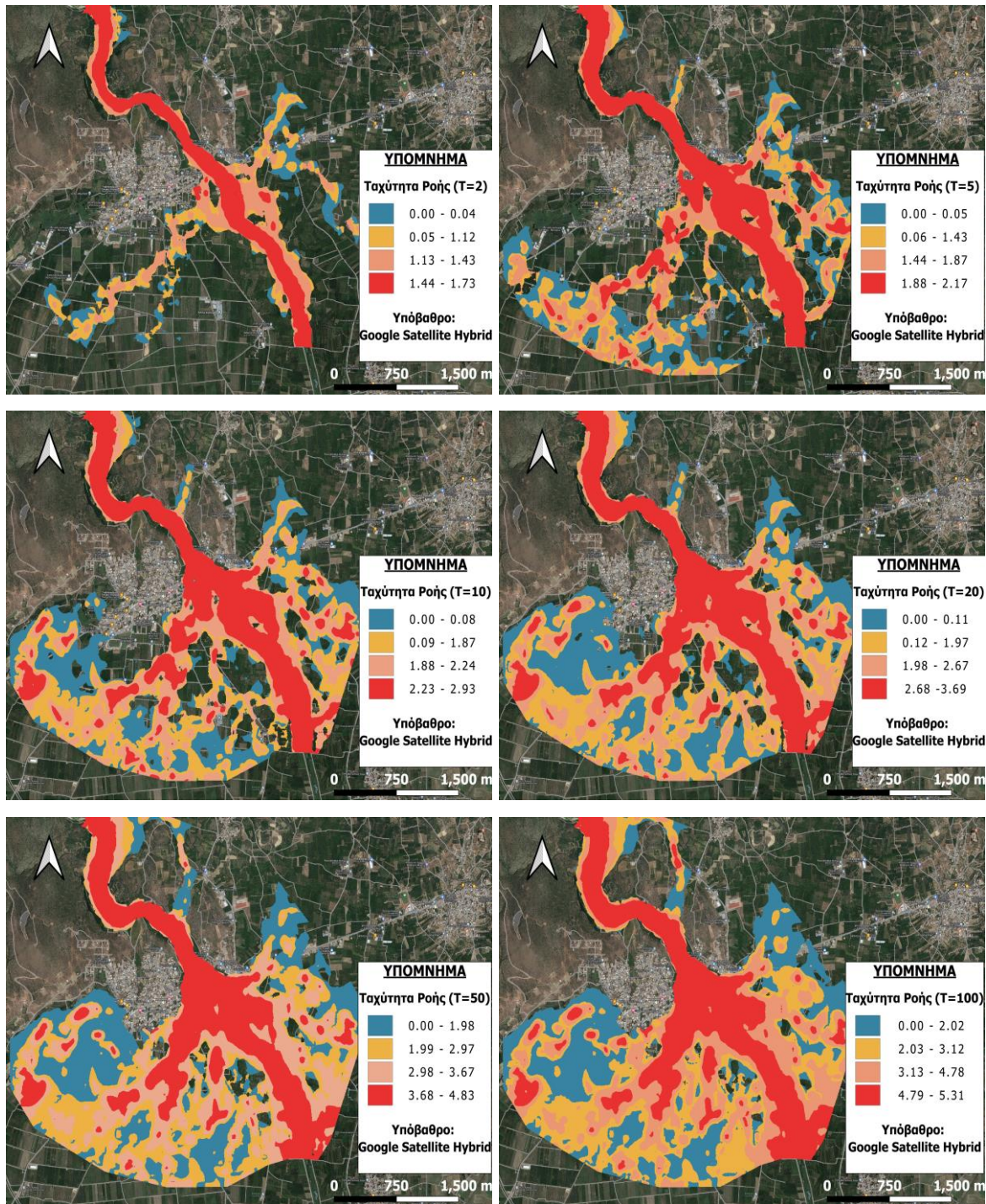


Figure 18: Skala Lakonias flood field flow velocities of different return periods

Results and Discussion

Using the hyetogram given by the updated rainfall curve equation, we observe that the maximum flow depth for a 50-year return period flood event reaches 3.76 m, while the maximum flow velocity ranges from 3.57 m/s – 4.12 m/s (Figure 19).

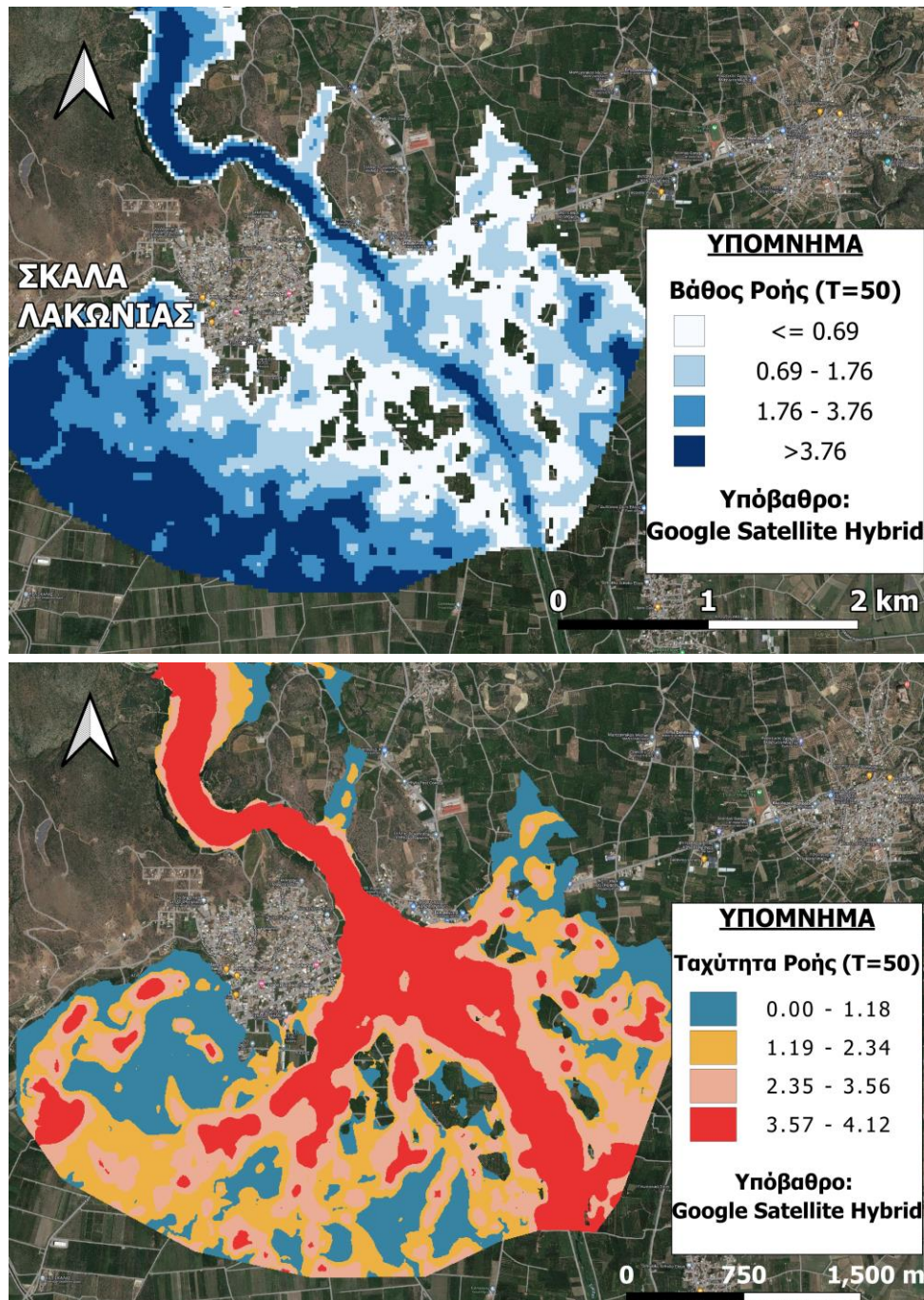


Figure 19: Depth flow and flow velocity of a 50-year return period rainfall flood of updated rainfall curves

The flood maps in the area of Skala Lakonias after the application of the two firsts Nature-Based Solutions methods are shown at Figure 20, emphasizing the reduction observed in the flow depth and flow speed respectively.

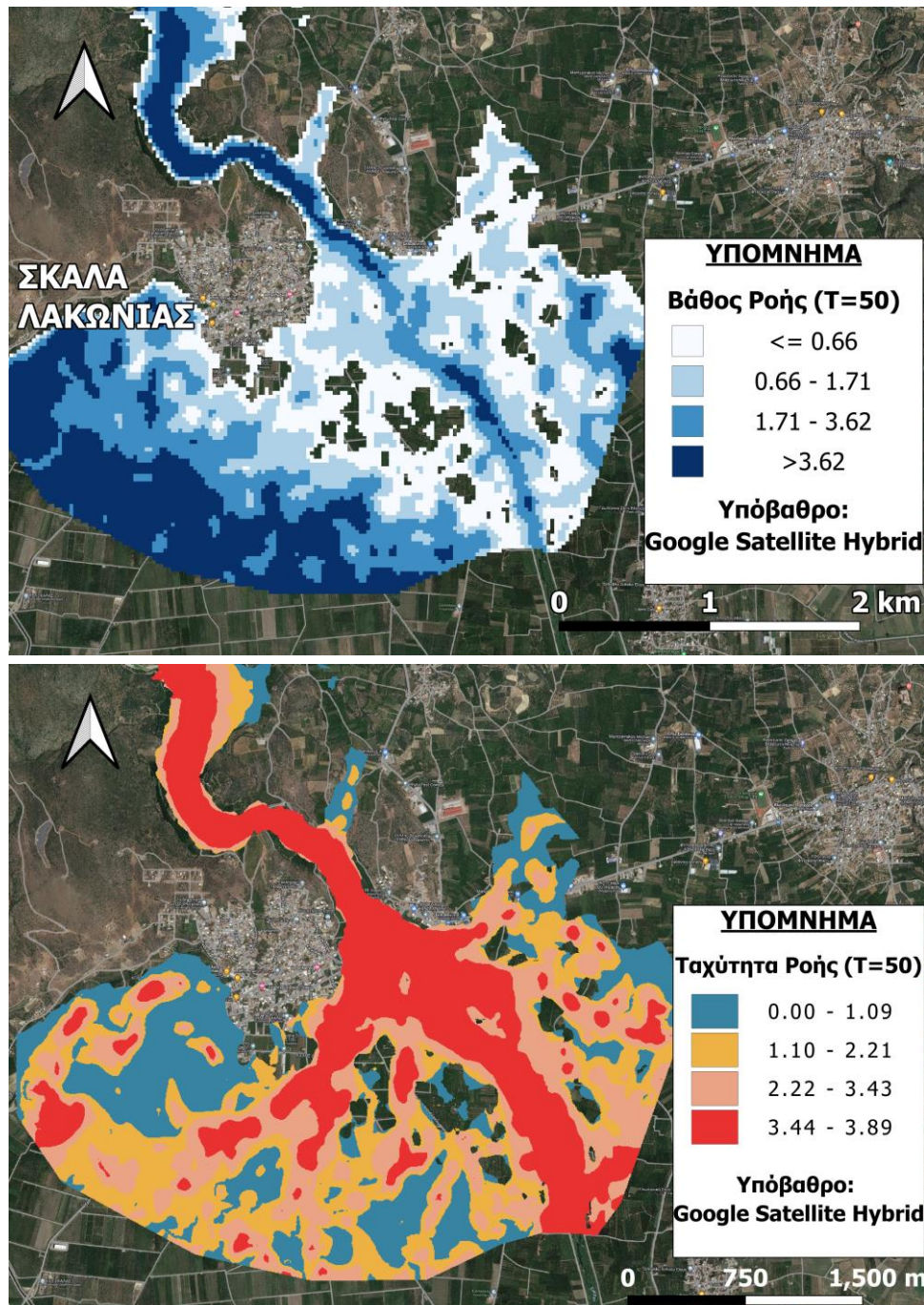


Figure 20: Depth flow and flow velocity of a 50-year return period rainfall flood after application of Nature-Based Solutions methods

The area of land that is inundated each time by flood waters with the simultaneous use of the NBS methods and Retention ponds is shown at Figure 21.

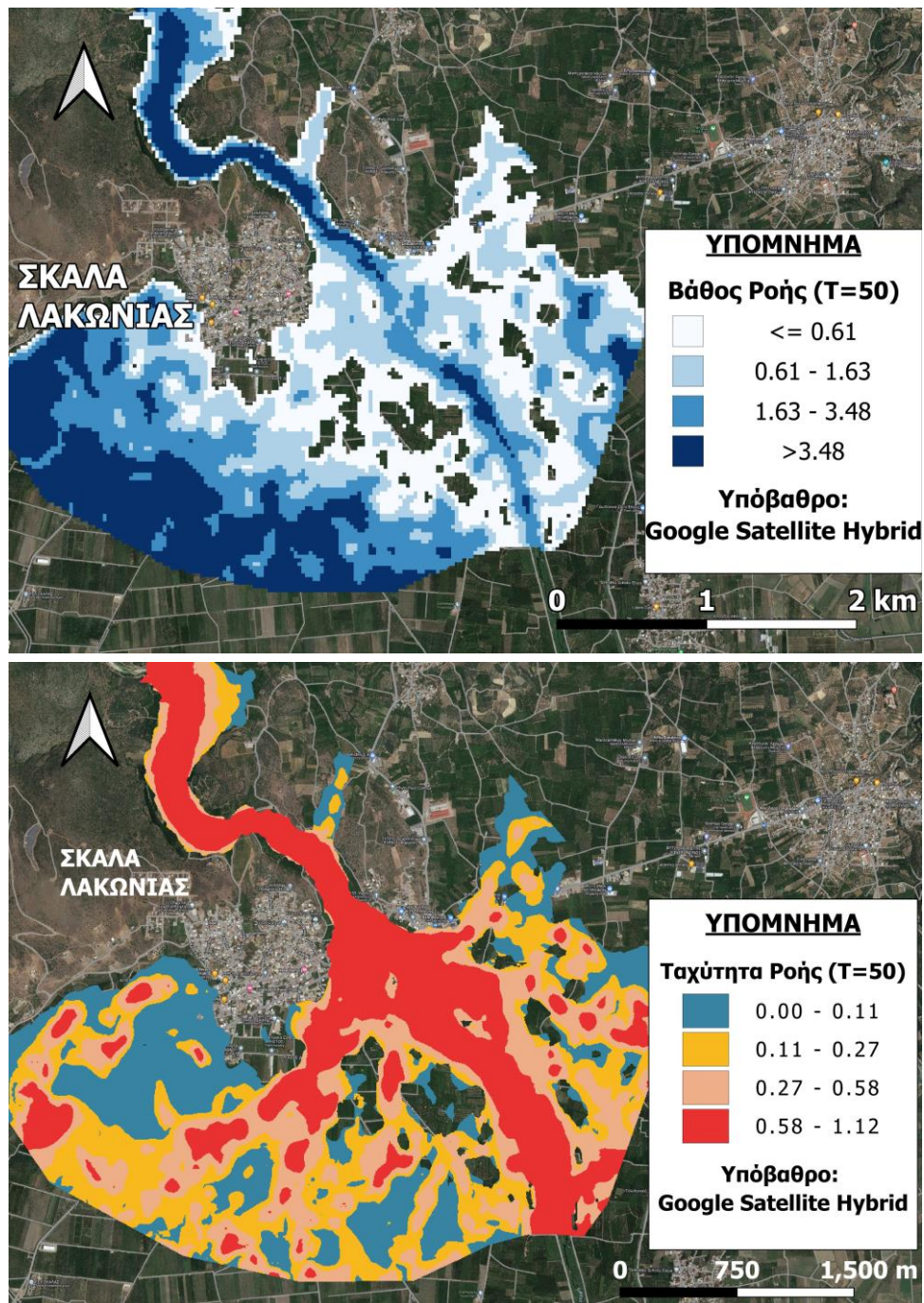
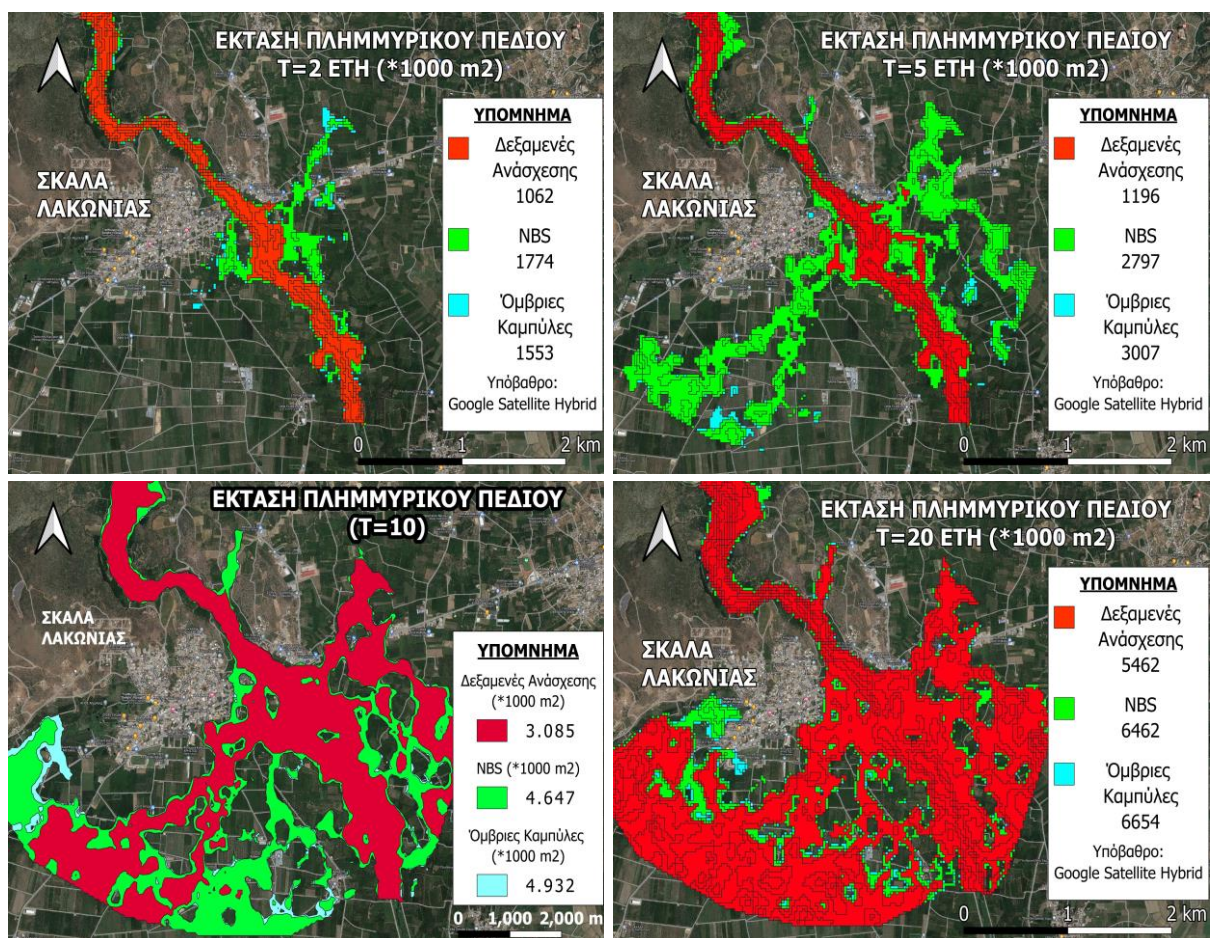


Figure 21: Depth flow and flow velocity of a 50-year return period rainfall flood field after the construction of flood retention ponds

In conclusion, the total flood graph, calculated at the exact location of the bridge in Skala Lakonias, of the total catchment area of the Evrotas River, as obtained by applying all three Nature-Based Solutions methods, is presented (Figure 23). The method of flood water retention ponds, has been able to effectively reduce the peak flood discharge by storing and delaying the runoff of a significant amount of water. The Figure 22 show the change in the extent of the flood filed using the two firsts NBS methods in green color compared to Retention ponds method in red color. Finally, the current state of the flood field is shown in cyan color.



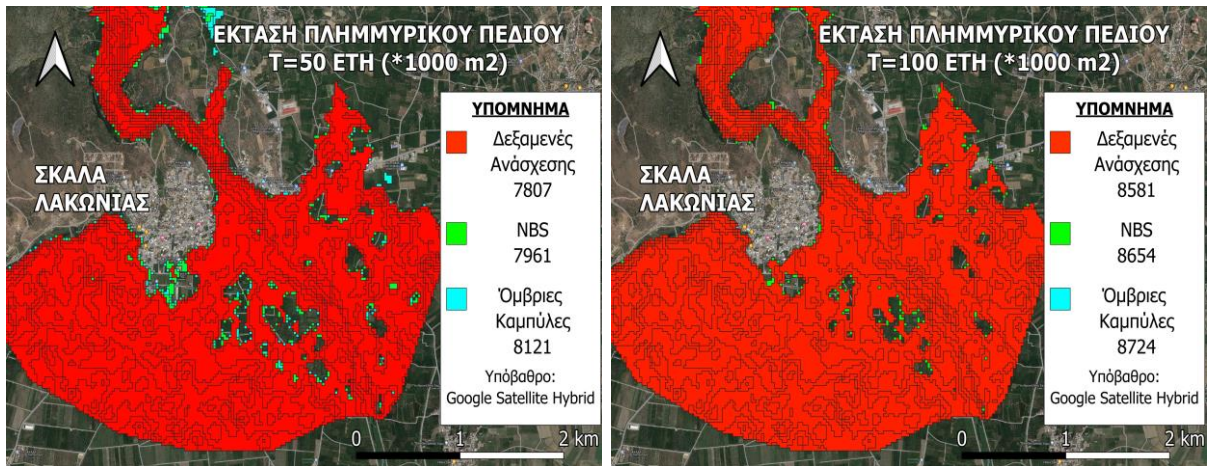


Figure 22: Change in simulated flood field extent of different return periods for multiple NBS methods

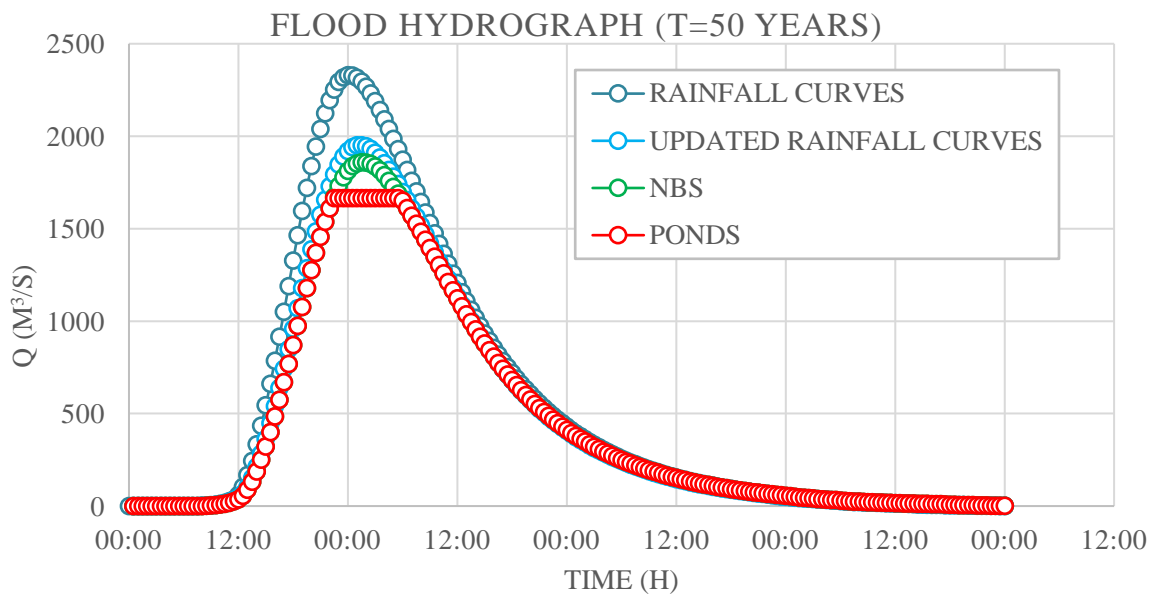


Figure 23: Flood hydrograph of Evrotas river basin for different methods

The main conclusions reached after the end of the study are the following:

- Through the method of multi-criteria analysis and decision-making, we were able to effectively identify the vulnerable areas, against flooding phenomena, of the Water Division of the Eastern Peloponnese (EL03), which includes the town of Skala in the prefecture of Lakonia. The cities of Argos (Inachos river), Gytheio (Platys river / Ardelolagado stream), Sparti (Eurotas river), Astros Kynourias (Tanos river) and the settlement of Iria (Rados river) were also identified as areas of high flood risk.
- Applying the rain-runoff models Snyder's, SCS and Isochronous Curves we come to the safe conclusion that the Soil Conservation Service model calculates the most favorable values of peak benefits, with the Isochronous Curves method following and Snyder's calculates the worst of them.
- The updated rain curves projected more favorable rainfall compared to their earlier form. A decrease of up to **16%** was noted in the amount of rain.
- Given the updated Giandotti catchment time calculation relationship there was a sharp time reduction of up to **28%**.
- The methods of Nature-Based Solutions against flood phenomena are an environmentally friendly human intervention, since they simulate the natural functions of ecosystems.
- The effectiveness of these techniques increases rapidly by simultaneously applying different methods to the watershed, avoiding their individual implementations. In addition, they are considered more efficient when they play a preventive role, intervening in a hydrological basin, with the aim of modifying the accumulation time and weakening the flood peak. Finally, a large area is required for their application and they are mostly applied to smaller watercourses as they are simultaneously used as anti-corrosion projects.
- Following the implementation of the Nature-Based Solutions methods, there was a **5%** reduction in flood peak, based on the relationship of the updated rainfall curves, as well as reductions in flow depths and flood flow velocities. Specifically, the flow depth saw a decrease in its maximum value from 3.76 m to 3.62 m, while for the flow speed a decrease was observed from 4.12 m/s to 3.89 m/s. With the installation of the detention tanks, the

values reached 3.48 m for the flow depth while the maximum value of the flow velocity decreased significantly to 1.12 m/s. Characteristically, it is mentioned that the methods of tree planting on the watershed and restoration of meanderings required 27.14 Km² of surface and 8.53 Km of riverbed length respectively. The time period during which the flood peak occurs has increased, which works quite beneficially in terms of reducing the flood risk.

- Retention ponds were found to be much more efficient for flood events of short return periods (2,5,10,20 years), since long return periods (50,100 years) had a lower rate of reduction of flood peaks. In particular, the method requires a smaller application area compared to the previous Nature-Based Solutions methods, achieving storage and retardation of 2,121,615 m³ of flood water in just 1.06 Km² of land area, to reduce the flood peak by **10%** overall at the outlet of the watershed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Φυσικοί κίνδυνοι και καταστροφές

Οι Φυσικοί κίνδυνοι είναι σοβαρά και ακραία καιρικά και κλιματικά φαινόμενα που μπορεί δυνητικά να προκαλέσουν υπερβολικές αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή, την κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή, ένας φυσικός κίνδυνος μετονομάζεται σε φυσική καταστροφή. Το Γραφείο των Ηνωμένων Εθνών για την Μείωση Κινδύνου Καταστροφών (UNDRR) ορίζει την καταστροφή ως μια «σοβαρή διαταραχή της λειτουργίας μιας κοινότητας ή μιας κοινωνίας σε οποιαδήποτε κλίμακα λόγω επικίνδυνων γεγονότων που αλληλοεπιδρούν με συνθήκες έκθεσης, ευπάθειας και χωρητικότητας, που οδηγούν σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω: ανθρώπινες, υλικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές απώλειες και επιπτώσεις» (UNDRR 2017). Αν και ένας φυσικός κίνδυνος είναι συνήθως το αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών το πώς αλληλοεπιδρούν οι άνθρωποι με το περιβάλλον συμβάλλει στο να προκαλούν φυσικές καταστροφές. Επομένως, οι βαθύτερες αιτίες του κινδύνου καταστροφής και των καταστροφών πηγάζουν από τις δομικές συνθήκες ενός συγκεκριμένου τρόπου ανάπτυξης (Oliver-Smith et al. 2017).

Οι Φυσικοί κίνδυνοι μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες. Η ταξινόμηση τους γίνεται συνήθως έχοντας ως βάση την πηγή της φυσικής αιτίας. Αυτή μπορεί να είναι είτε α) Γεωφυσική, π.χ. σεισμοί και ηφαίστεια, β) είτε να σχετίζεται με το κλίμα (υδρομετεωρολογικά), π.χ. πλημμύρες, υγρή μετακίνηση μαζών, καταιγίδες, ακραίες θερμοκρασίες, ξηρασία και πυρκαγιές είτε αιτίες γ) βιολογικές, π.χ., επιδημικές, λοιμώξεις από έντομα (Leaning and Guha-Sapir 2013). Παγκοσμίως, φυσικοί κίνδυνοι, π.χ. τροπικοί κυκλώνες (άνεμος και καταιγίδα), σεισμοί, τα τσουνάμι και οι πλημμύρες αναμένεται να προκαλέσουν μέση ετήσια απώλεια 314 δισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ στο δομημένο περιβάλλον. Αυτό το ζήτημα απειλεί σοβαρά την παγκόσμια ατζέντα της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι μεγάλες, υψηλού εισοδήματος, εκτεθειμένες σε κινδύνους οικονομίες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας μέσης ετήσιας απώλειας σε απόλυτες τιμές. Οι πιο σημαντικές συγκεντρώσεις κινδύνου απαντώνται σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος, ιδιαίτερα

των αναπτυσσόμενων μικρών νησιών σε σύγκριση με τις ετήσιες επενδύσεις κεφαλαίου ή τις κοινωνικές δαπάνες.

1.2 Πλημμύρες

Οι πλημμύρες επηρεάζουν περισσότερο τους ανθρώπους παγκοσμίως από οποιονδήποτε άλλο φυσικό κίνδυνο. Μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη καταστροφή σε περιουσίες και να οδηγήσουν σε απώλεια της ανθρώπινης ζωής και διαφόρων οργανισμών. Επιπλέον, καθώς ο πλανήτης συνεχίζει να διαφοροποιείται λόγω της κλιματικής αλλαγής, η ένταση και η συχνότητα των πλημμυρών πιθανότατα θα αυξηθούν. Η οδηγία της ΕΕ 2007/60 ορίζει την πλημμύρα ως «την προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό, που δεν καλύπτεται συνήθως από αυτό, το οποίο περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, μεσογειακά εφήμερα υδάτινα ρεύματα και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, εξαιρώντας τις πλημμύρες από τα αποχετευτικά συστήματα» (Ευρωπαϊκή Ένωση 2007). Υπάρχουν τρεις κοινοί τύποι πλημμύρας: οι **ποτάμιες πλημμύρες**, επίσης γνωστές ως πλημμύρες ποταμών ή ρεμάτων, οι **αιφνίδιες πλημμύρες** και οι **παράκτιες πλημμύρες**. Κάθε είδος πλημμύρας συμβαίνει και προβλέπεται με διαφορετικούς τρόπους. Οι επιπτώσεις κάθε τύπου πλημμύρας είναι επίσης διαφορετικές, όπως και οι ενέργειες που απαιτούνται για την αποφυγή ή την ελαχιστοποίηση των ζημιών από αυτές.

Ποτάμιες Πλημμύρες (Fluvial - Riverside)

Μια ποτάμια πλημμύρα, συμβαίνει όταν η στάθμη του νερού σε ένα ποτάμι, μια λίμνη ή ένα ρέμα ανεβαίνει και ξεχειλίζει στη γειτονική γη αυτού. Η άνοδος της στάθμης του νερού του ποταμού θα μπορούσε να οφείλεται σε υπερβολικό υετό ή λιώσιμο του χιονιού. Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος πλημμύρας που συναντάται σε ένα τυπικό ποτάμιο σύστημα. Η ζημιά από μια πλημμύρα ποταμού μπορεί να είναι εκτεταμένη καθώς η υπερχειλίση επηρεάζει μικρότερα ποτάμια κατάντη, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν αστοχίες φραγμάτων και αναχωμάτων σε κοντινές περιοχές. Η σοβαρότητα μιας πλημμύρας ποταμού καθορίζεται από το προφίλ του εδάφους, τη διάρκεια και την ένταση των βροχοπτώσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού. Άλλοι παράγοντες περιλαμβάνουν τον κορεσμό του εδάφους με νερό και επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη διάρκεια και την ένταση των

βροχοπτώσεων. Σε επίπεδες περιοχές, τα νερά της πλημμύρας τείνουν να ανεβαίνουν αργά και να χαρακτηρίζονται γενικότερα από μικρότερο βάθος ροής, αλλά συχνά μπορεί να παραμείνουν λιμνάζοντα για μέρες. Σε λοφώδη ή ορεινές περιοχές, πλημμύρες μπορεί να συμβούν μέσα σε λίγα λεπτά μετά από μία δυνατή βροχόπτωση, να αποστραγγιστούν πολύ γρήγορα και να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές λόγω της έντονης απορροής φερτών υλικών και μετακίνησης των μαζών.

Αιφνίδιες Πλημμύρες (Pluvial - Flash Floods)

Μια αιφνίδια πλημμύρα συμβαίνει όταν έντονες βροχοπτώσεις δημιουργούν μια πλημμύρα σε ένα ήδη πληρωμένο με νερό υδάτινο σώμα. Πλημμύρες μπορεί να συμβούν σε οποιαδήποτε τοποθεσία, αστική ή αγροτική, ακόμη και σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στους υδάτινους αποδέκτες. Υπάρχουν δύο συνήθεις τύποι πλημμυρών: οι επιφανειακές και οι αιφνίδιες πλημμύρες. Η πρώτη συμβαίνει όταν ένα αστικό σύστημα αποχέτευσης κατακλύζεται και δημιουργείται έντονη απορροή νερού σε δρόμους και δομικές κατασκευές. Σε μια τέτοια περίπτωση, η πλημμύρα συμβαίνει σταδιακά, άρα υπάρχει επαρκής χρόνος προετοιμασίας για την αντιμετώπιση του προβλήματος με χαμηλό επίπεδο κινδύνου. Η στάθμη του νερού είναι συνήθως χαμηλή και δεν δημιουργεί άμεση απειλή για ζωές, αλλά μπορεί να προκαλέσει σημαντικές οικονομικές απώλειες λόγω εκτεταμένων καταστροφών στις υποδομές.

Η δεύτερη περίπτωση είναι οι αιφνίδιες πλημμύρες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα ακαριαία και περιγράφονται ως ταχέως αναπτυσσόμενες δεδομένου ότι χαρακτηρίζονται από άμεση έναρξη και υψηλή ένταση. Οι αιφνίδιες πλημμύρες συμβαίνουν συνήθως σε περιοχές με απότομες εδαφικές κλίσεις, αστικά περιβάλλοντα με ελλιπή αποχετευτικά συστήματα, άνυδρες περιοχές όπου το έδαφος δεν μπορεί να απορροφήσει γρήγορα το νερό και μέρη γενικώς επιρρεπή στις έντονες βροχοπτώσεις. Συνήθως μπορεί να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, όπως η γρήγορη τήξη χιονιού, οι αστοχίες φραγμάτων ή αναχωμάτων και από ξαφνική απορροή μεγάλης ποσότητας υδάτων από δεξαμενές. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν είναι τα γεωμορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως το μέγεθος και η κλίση αυτής, η ικανότητα διείσδυσης των υδάτων εντός των

εδαφών καθώς και οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους (Merz and Blöschl 2003, Houze Jr. et al. 2015, Velásquez et al. 2020). Ως αιφνίδιες πλημμύρες θεωρούνται επίσης τα γεγονότα τοπικής κλίμακας, καθώς σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με καταιγίδες συναγωγικού τύπου όπου μειώνεται η χωρική κάλυψη των πληγέντων περιοχών (Houze Jr. et al. 2015). Δύναται επίσης να προκληθούν από απορροές μαζών και κατολισθήσεων (Posner and Georgakakos 2015). Η ανεξέλεγκτη αστικοποίηση και η έντονη αποψίλωση των δασών είναι από τις πρώτες αιτίες που βρίσκονται πίσω από αυτές, ενώ οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η συχνότερη εμφάνιση και η ένταση των βροχοπτώσεων, έχουν αλλάξει την περιοδικότητα εκδήλωσης αυτών των γεγονότων (Alfieri et al. 2012, Gaur και Simonovic 2015, Rogger et al. 2017, Caloiero et al. 2017).

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες συνηγορούν στο χαρακτηρισμό των αιφνίδιων πλημμυρών ως μια εξελισσόμενη απειλή, καθώς περιοχές που κάποτε δεν πλημμύριζαν θεωρούνται πλέον άμεσα επιρρεπείς σε αυτές. (Μπουρνάς και Μπαλτάς 2021α). Συμπληρωματικά, οι αιφνίδιες πλημμύρες συμβαίνουν μέσα σε ένα συνοπτικό χρονικό πλαίσιο, συχνά μέσα σε λίγες ώρες ή και λεπτά μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Μια πλημμύρα που συμβαίνει σε λιγότερο από έξι ώρες ταξινομείται συνήθως ως αιφνίδια (Flash Flood). Η απρόβλεπτη ικανότητα τους να σχηματίζονται άμεσα οδηγούν σε καταστροφικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινότητες και στο φυσικό περιβάλλον, καθιστώντας αυτές μεταξύ των πιο θανατηφόρων κινδύνων που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες παγκοσμίως. Οι Μεσογειακές, ξαφνικές πλημμύρες προκάλεσαν πρόσφατα σημαντικές οικονομικές ζημιές και τεράστιο κόστος στις ανθρώπινες ζωές (Diakakis et al. 2012, Pereira et al. 2017, Feloni et al. 2019, Varlas et al. 2019, Σπύρου 2020).

Παράκτιες πλημμύρες (Coastal Floods)

Παράκτιες πλημμύρες περιγράφονται ως οι πλημμύρες χερσαίων περιοχών κατά μήκος της ακτής προερχόμενες από θαλάσσια ύδατα. Χαρακτηριστικές αιτίες των παράκτιων πλημμυρών είναι οι έντονες ανεμοθύελλες που συμβαίνουν ταυτόχρονα με τις υψηλές παλίρροιες (κύμα καταιγίδας) και τα τσουνάμι. Οι έντονοι κυματισμοί, που προκαλούνται από τις καταιγίδες, δημιουργούνται όταν πνέουν ισχυροί άνεμοι οι οποίοι ωθούν το νερό στην

ξηρά και αποτελούν την κύρια αιτία των παράκτιων πλημμυρών και συχνά την μεγαλύτερη σημαντική απειλή που σχετίζεται με τους τυφώνες. Οι επιπτώσεις αυξάνονται ανάλογα με το μέγεθος της παλίρροιας ενώ οι ανεμοθύελλες κατά τη διάρκεια αυτής μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές πλημμύρες από καταιγίδες. Διάφοροι άλλοι παράγοντες, όπως η δύναμη, το μέγεθος, η ταχύτητα και η κατεύθυνση πνοής των ανέμων, προσδιορίζουν καθοριστικά τη σοβαρότητα μιας παράκτιας πλημμύρας. Η χερσαία και υπεράκτια τοπογραφία παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και της κλιματικής αλλαγής, περισσότερες παράκτιες πόλεις και κοινότητες τείνουν να γίνονται πιο ευάλωτες στις πλημμύρες.

1.3 Αντιπλημμυρική προστασία

1.3.1 Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ για τις πλημμύρες

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει δημιουργήσει ένα πλαίσιο για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και τη χαρτογράφηση μέσω της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ (Ευρωπαϊκή Ένωση 2007). Εκτός από τον ορισμό για τις πλημμύρες, η οδηγία εισάγει τον όρο «Κίνδυνος πλημμύρας», που ορίζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας ενός συμβάντος πλημμύρας και των πιθανών δυσμενών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα που σχετίζεται με ένα πλημμυρικό συμβάν (Ευρωπαϊκή Ένωση 2007). Ο ορισμός του κινδύνου πλημμύρας ακολουθεί τον κίνδυνο πλημμύρας, την έκθεση και το πλαίσιο ευπάθειας. Ο κίνδυνος πλημμύρας αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικού γεγονότος και στα χαρακτηριστικά του, όπως το μέγεθος, η συχνότητα και η διάρκεια. Αντίθετα, η έκθεση σε πλημμύρες και η ευπάθεια αναφέρονται στον βαθμό ευαισθησίας ενός συστήματος στις επιπτώσεις ενός κινδύνου πλημμύρας. Ο συνδυασμός των παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τον κίνδυνο πλημμύρας, που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να συμβεί ένα συμβάν και τις επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτό το γεγονός. Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, κάθε κράτος μέλος της ΕΕ υποχρεούται να προχωρήσει με την παρακάτω αναφορές:

- **Προκαταρκτική Εκτίμηση Κινδύνου Πλημμύρας:** Η αξιολόγηση εστιάζει στον εντοπισμό περιοχών με δυνητικό κίνδυνο, στην αξιολόγηση ιστορικών γεγονότων πλημμύρας και των δυσμενών μελλοντικών επιπτώσεων για τον άνθρωπο, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και οικονομική δραστηριότητα.
- **Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας:** Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιέχουν τη δυνητική έκταση, το βάθος και την ταχύτητα ροής για διαφορετικά σενάρια πιθανοτήτων, π.χ. περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1000 ετών, ενώ περιγράφουν τις πιθανές αρνητικές συνέπειες που σχετίζονται άμεσα με τα σενάρια.
- **Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας:** Αυτά τα σχέδια στοχεύουν στη μείωση του κινδύνου πλημμύρας μέσω μέτρων πρόληψης, προστασίας και ετοιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον, τους κοινωνικούς και τους οικονομικούς παράγοντες. Επιπλέον, η οδηγία για τις πλημμύρες αναγνωρίζει την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον κίνδυνο έναντι των πλημμυρών.

Ως εκ τούτου, οι παραπάνω εκθέσεις δεν απαιτείται μόνο να επανεξετάζονται κάθε έξι χρόνια, αλλά ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής στην πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρών αναφέρεται επίσης ότι πρέπει να αντιμετωπιστεί, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή στις αξιολογήσεις και τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας. Αυτό τονίζει την ανάγκη για προσαρμοστικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των μεταβαλλόμενων προτύπων πλημμύρας και των πιθανών επιπτώσεων τους. Επιπρόσθετα, ενθαρρύνεται ο συντονισμός και η συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών που μοιράζονται κοινές λεκάνες απορροής ή παράκτιες περιοχές, κάτι που οδηγεί σε μια ολοκληρωμένη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, λαμβάνοντας υπόψη την διασυνδεδεμένη φύση των συστημάτων νερού. Επίσης, η οδηγία τονίζει τη σημασία της συμμετοχής του κοινού, των ενδιαφερομένων και των αρμόδιων αρχών στην διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας, ενθαρρύνοντας τα κράτη μέλη να προωθήσουν την ανταλλαγή πληροφοριών και την συνεργασία σε διάφορα επίπεδα για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Όσον αφορά την εφαρμογή της Οδηγίας, ο πρώτος κύκλος υλοποιήθηκε κατά τα έτη 2010- 2015, ενώ ο δεύτερος κύκλος κάλυψε την περίοδο 2016-2021. Η επιτροπή αξιολόγησε

τις προκαταρκτικές εκτιμήσεις κινδύνου πλημμύρας του δεύτερου κύκλου όπως εκπονήθηκαν από τα μέλη κράτη στα τέλη του 2021 στην 6η έκθεση εφαρμογής τον Δεκέμβριο του 2021 (Ευρωπαϊκή Ένωση 2021). Ο τρίτος κύκλος είναι σε εξέλιξη και καλύπτει τα έτη 2022-2027. Όλα τα κράτη έχουν ολοκληρώσει τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του πρώτου κύκλου, ενώ τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του δεύτερου κύκλου έχουν κατατεθεί στην Επιτροπή από τα περισσότερα κράτη μέλη. Συγκεκριμένα, από τα 27 κράτη της Ε.Ε., τα οκτώ δεν έχουν στείλει ακόμη τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του δεύτερου κύκλου τους, με τη διαδικασία να βρίσκεται σε εξέλιξη καθώς ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2023.

1.3.2 Διαχείριση πλημμυρών με λύσεις βασισμένες στη Φύση

Η Φυσική Διαχείριση Πλημμυρών (**Nature Flood Management - NFM**) και η Εργασία με Φυσικές Διεργασίες (**WWNP**) αποσκοπούν στην μείωση του κινδύνου πλημμύρας και διάβρωσης των ακτών, περιλαμβάνουν την εφαρμογή μέτρων που βοηθούν στην προστασία, αποκατάσταση και μίμηση των φυσικών λειτουργιών των λεκανών απορροής, των πλημμυρικών εκτάσεων, των ποταμών και των ακτών. Το **WWNP** έχει πολλές διαφορετικές μορφές και μπορεί να εφαρμοστεί σε αστικές και αγροτικές περιοχές, καθώς και σε ποτάμια, εκβολές ποταμών και ακτές. Η **NFM** επιτυγχάνει τη μείωση του μέγιστου όγκου νερού μιας πλημμύρας (μέγιστη απορροή πλημμύρας) στοχεύοντας στην καθυστέρηση της άφιξης της πλημμυρικής αιχμής κατόντη αυξάνοντας τον διαθέσιμο χρόνο προετοιμασίας και λήψης μέτρων προς ελάττωση των καταστροφών. Υπάρχουν 4 βασικοί, υποκείμενοι μηχανισμοί με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί αυτό:

- **Αύξηση αποθήκευσης:** δημιουργία προσωρινής αποθήκευσης που θα γεμίζει κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας και θα αδειάζει αργά (π.χ. επανασύνδεση λειτουργικών πλημμυρικών πεδιάδων και κατασκευή δεξαμενών ανάσχεσης).
- **Αύξηση της τραχύτητας της υδρολογικής λεκάνης απορροής και της φυσικής κοίτης του ποταμού ή του υδατορέματος:** αυτό «επιβραδύνει τη ροή» αυξάνοντας την αντίσταση στην επιφανειακή και ενδοκαναλική ροή νερού (π.χ. φύτευση δέντρων και συστοιχίες, αποκατάσταση μαιανδρισμών των ποταμών και εγκατάσταση ξύλινων φραγμών).

- **Αυξανόμενες απώλειες:** αυξάνει την ποσότητα του νερού που διεισδύει στο έδαφος ή χάνεται πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής (π.χ. αλλαγή γεωργικών πρακτικών για τη βελτίωση της δομής του εδάφους και τη μείωση της συμπίεσης του καθώς και εγκατάσταση βιώσιμων αστικών συστημάτων αποστράγγισης (SUDS)).
- **Αποσυγχρονισμός παροχών αιχμής από παραπόταμους:** Η επιβράδυνση της ροής ενός παραπόταμου σε σύγκριση με έναν άλλο μπορεί να μειώσει σημαντικά τις πλημμυρικές αιχμές κατάντη.

Η Φυσική Διαχείριση Πλημμυρών δεν αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση έναντι των πλημμυρικών επεισοδίων, αλλά είναι ένα από τα πολλά εργαλεία που απαιτούνται για την επιτυχή διαχείριση αυτών. Σε συνδυασμό με άλλες λύσεις διαχείρισης πλημμύρας, όπως τα μέτρα σκληρής μηχανικής και κοινοτικής ανθεκτικότητας, η φυσική διαχείριση πλημμυρών μπορεί να έχει ευεργετικό αντίκτυπο στη μείωση του κινδύνου πλημμύρας κατάντη.

1.4 Αντικείμενο της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί ο εντοπισμός και η εφαρμογή των καταλληλότερων μεθόδων φυσικών λύσεων, εντός της υδρολογικής λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού, έχοντας ως στόχο την μείωση των επιπτώσεων μιας επερχόμενης πλημμύρας στην ευρύτερη περιοχή της Σκάλας Λακωνίας.

Πιο συγκεκριμένα θα λάβουν χώρα προσομοιώσεις υδραυλικού ελέγχου στο τμήμα του ποταμού, ανάντη της περιοχής όπου εδράζεται η γέφυρα της Σκάλας Λακωνίας, τονίζοντας ταυτόχρονα την σπουδαιότητα της αρτιότητας της κατασκευής, εφόσον ενώνει τις δύο πλευρές του Νομού Λακωνίας. Κατόπιν γεωμορφολογικής, υδρολογικής και υδραυλικής ανάλυσης θα εφαρμοστούν ορισμένες μέθοδοι φυσικών λύσεων στην κοίτη, στην παραρεμάτια ζώνη του ποταμού και γενικότερα σε όλη την έκταση της λεκάνης και θα αξιολογηθεί η επίδραση της κάθε μεθόδου στην μείωση του πλημμυρικού κινδύνου προς τις κατάντη περιοχές.

1.5 Δομή Εργασίας

Συνοπτικά παρουσιάζονται τα κεφάλαια που συνθέτουν την μελέτη παρέχοντας μια πρώτη εικόνα, για την συνέχεια, στον αναγνώστη. Η εργασία ακολουθεί την παρακάτω δομή δεδομένου των κεφαλαίων:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι Φυσικών Λύσεων – Nature Based Solutions

Κεφάλαιο 3: Περιοχή μελέτης και δεδομένα

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

Κεφάλαιο 5: Ρύθμιση Υδρολογικού και Υδραυλικού Μοντέλου

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – NATURE BASED SOLUTIONS

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος Φυσικές λύσεις (Nature-Based Solutions) δίνεται στα μέτρα και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των κινδύνων πλημμύρας καθώς εκπροσωπεί τις λύσεις που βασίζονται στη φύση, μια προσέγγιση πολλαπλών οφελών για την αποκατάσταση και προστασία των οικοσυστημάτων, που ανταποκρίνεται στις κοινωνικές αλλαγές και βελτιώνει τη βιοποικιλότητα και την ευημερία των ανθρώπων. Οι μέθοδοι Φυσικών λύσεων περιλαμβάνουν τεχνικές βασισμένες σε φυσικές διεργασίες (Σχήμα 2-1), μια προσέγγιση της λεκάνης απορροής, με στόχο τη διαφύλαξη των φυσικών δυνατοτήτων αποθήκευσης νερού εντός του τοπίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποκατάσταση ή την ενίσχυση των φυσικών χαρακτηριστικών των υδροτόπων, των ποταμών και των πλημμυρικών περιοχών, καθώς και με την αύξηση της συγκράτησης των υδάτων του εδάφους και του τοπίου. Η εξασθένιση των πλημμυρών αναφέρεται στην αποθήκευση, την εξάπλωση και την επιβράδυνση των υδάτων πλημμύρας, μειώνοντας έτσι τις επιπτώσεις και τις καταστροφές που δύναται να προκαλέσουν σε περιοχές κατάντη των ποταμών.

Τα χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών θα πρέπει να θεωρούνται ως "οικολογική υποδομή" που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή χρήσιμων υπηρεσιών και περιλαμβάνουν τεχνικές που στοχεύουν στις φυσικές υδρολογικές και μορφολογικές διεργασίες, στα χαρακτηριστικά διαχείρισης των πηγών και των διαδρομών που ακολουθούν τα ύδατα ενός πλημμυρικού επεισοδίου. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την αποκατάσταση, τη βελτίωση και την αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών αλλά αποκλείουν την παραδοσιακή μηχανική αντιπλημμυρικής άμυνας που λειτουργεί ενάντια σε αυτές τις φυσικές διεργασίες ή τις διαταράσσει. Υπάρχουν ορισμένες βασικές γενικές κατηγορίες μεθόδων φυσικών λύσεων που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας μιας περιοχής, θέτοντας ως στόχο:

- i. Τη μείωση της πλημμυρικής παροχής, ελαττώνοντας το μέγεθος και της επιπτώσεις μιας πλημμύρας στις κατάντη περιοχές.
- ii. Την καθυστέρηση άφιξης της πλημμυρικής παροχής στην έξοδο της λεκάνης, παρέχοντας αρκετό χρόνο προετοιμασίας.
- iii. Την διατήρηση της αποθήκευσης του πλημμυρικού όγκου εντός του ποταμού, συμβάλλοντας στην μείωση της απόθεσης των φερτών εντός του καναλιού.

Οι κατηγορίες αυτές αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

Τεχνικές εδαφικής διαχείρισης

- Διατήρηση καλλιεργειών
- Ζώνες ανάσχεσης που περιβάλλουν γεωργικές εκτάσεις
- Διαχείριση βλάστησης και δασικών εκτάσεων

Αποθήκευση νερού αποστράγγιση

- Τοποθέτηση ξύλινων φραγμάτων
- Δεξαμενές ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων όπως και μόνιμες ή προσωρινές λίμνες και υγρότοποι
- Εδαφικές ζώνες

Αποκατάσταση ποταμών

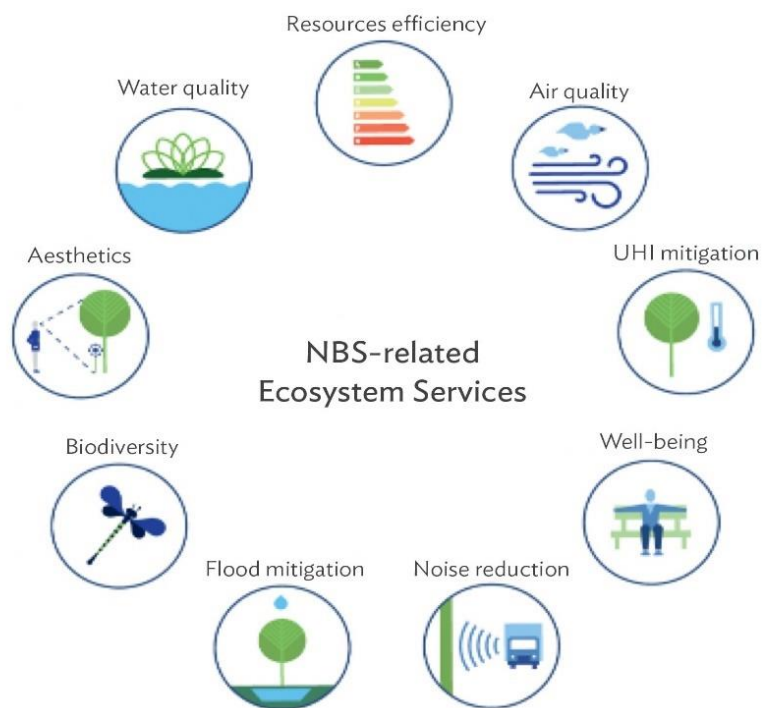
- Αποκατάσταση μαιάνδρων
- Φύτευση παρόχθιας ζώνης
- Ανάδειξη μορφολογίας ποταμού
- Απομάκρυνση φραγμών – εμποδίων

Επανασύνδεση / ενίσχυση πλημμυρικών περιοχών

- Υδρολογική συνδεσιμότητα μεταξύ ποταμού και πλημμυρικής πεδιάδας
- Επαρκής χωρική κλίμακα για να λάβουν χώρα και να εκδηλωθούν οι πλημμύρες
- Αφαίρεση αναχωμάτων
- Αντιμετώπιση των αιτιών στην αλλαγή της ροής στο ρου ενός ποταμού

Ειδικότερα οι μέθοδοι Φυσικών λύσεων όπου βασίστηκε η εν λόγω μελέτη και που θα αξιολογηθούν προς χρήση ως φυσικές παρεμβάσεις αντιπλημμυρικής προστασίας είναι οι εξής:

- i. Αποκατάσταση των μαιανδρισμών ποταμών
- ii. Δεξαμενές ανάσχεσης και λίμνες συγκράτησης πλημμυρικών υδάτων
- iii. Τοποθέτηση ξύλινων φραγμών (Leaky Barriers)
- iv. Δενδροφύτευση επί της υδρολογικής λεκάνης απορροής ποταμού
- v. Ενίσχυση πρηνών ποταμού
- vi. Αποκατάσταση επανασύνδεσης ποταμού - πλημμυρικής πεδιάδας



Σχήμα 2-1: Υπηρεσίες οικοσυστήματος που σχετίζονται με λύσεις που βασίζονται στη φύση

(Πηγή: Sarah Clement et al. 2021)

2.2 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων για αντιπλημμυρική προστασία

2.2.1 Αποκατάσταση των μαιανδρισμών ποταμών

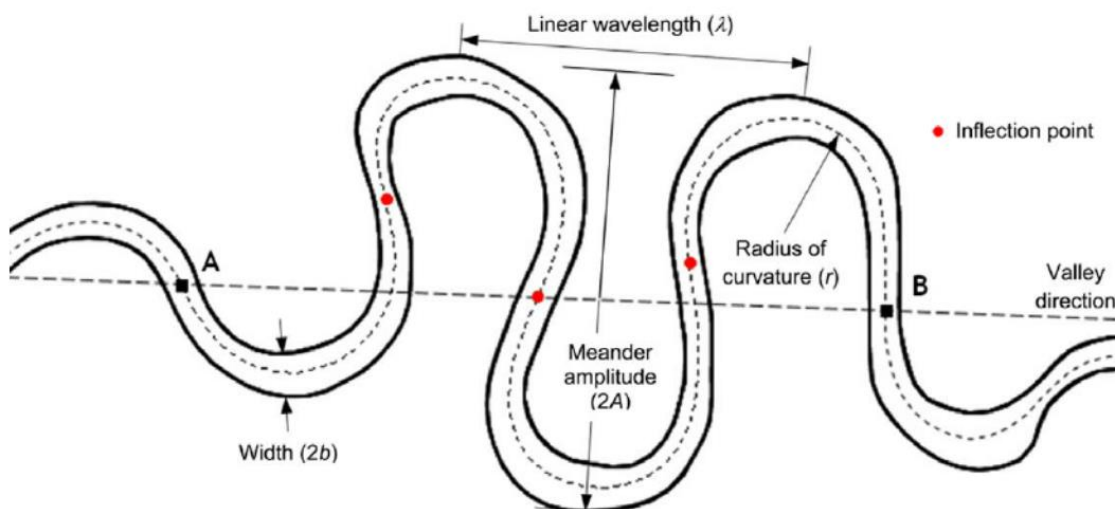
Ως ορισμός ο όρος μαιανδρισμός αφορά την συνολική διαδρομή που διανύει ένας ποταμός περιγράφοντας τις έντονα διευρυμένες και ελικοειδής στροφές που εντοπίζονται διαδοχικά σε ένα κανάλι υδατορεύματος. Πρόκειται για μια γενική μορφή προσαρμογής της κλίσης του ποταμού, με τα ευθύγραμμα τμήματα του, να οδηγούν σε πρηνή μειωμένων κλίσεων. Οι ποτάμιες και οικολογικές λειτουργίες ενός υδατορέματος σχετίζονται αναπόσπαστα με τα εξαιρετικά διαφορετικά χωρικά και χρονικά μοτίβα βάθους, ταχύτητας, υλικών υποστρώματος και εδαφικής κάλυψης που εντοπίζονται στους μαιάνδρους.

Η αποκατάσταση των μαιάνδρων ενός ποταμού θεωρείται μια εξαιρετικά χρήσιμη τεχνική ειδικά όταν τα κανάλια αυτά έχουν ευθυγραμμιστεί, διοχετευτεί ή μεταφερθεί σε διαφορετική τοποθεσία εξαιτίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων και παρεμβάσεων (Σχήμα 2-2). Ωστόσο, απαιτείται χερσαία έκταση για να αποκατασταθεί η διέλευση του μαιάνδρου και η τοπογραφία της κοιλάδας πρέπει να είναι συμβατή με την αποκατάσταση αυτού. Σε πολλές περιπτώσεις, η ευθυγράμμιση των καναλιών στο παρελθόν συνδεόταν άμεσα με την εκβάθυνση τους, καθώς οι κοίτες των παλαιών μαιάνδρων ήταν αρκετά μέτρα ψηλότερα από τα τρέχοντα υποστρώματα των καναλιών.



Σχήμα 2-2: Όψη ποταμού πριν και μετά την αποκατάσταση των μαιανδρισμών
(Πηγή: Laure Delcour et al. 2018)

Με άλλα λόγια πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται στα ευθύγραμμα τμήματα των ποταμών προς αποκατάσταση της συνέχειας τους. Υπάρχουν περιπτώσεις που ο ποταμός διαθέτει από μόνος του την κατάλληλη ενέργεια για να αποκαταστήσει τη συνοχή του μέσω υδρομορφολογικών διεργασιών (διάβρωση και εναπόθεση) ενώ συνάμα έχουν εντοπιστεί περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση. Με την αποκατάσταση των μαιανδρισμών ενός ποταμού (Σχήμα 2-3) προκαλείται επίσης αύξηση του μήκους αυτού κάτι το οποίο επηρεάζει άμεσα τον χρόνο υστέρησης και τον χρόνο συγκέντρωσης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Τα δύο αυτά μεγέθη αυξάνονται με την αύξηση του μήκους μιας και συσχετίζονται άμεσα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίδιας της λεκάνης. Εφόσον το χρονικό διάστημα άφιξης της πλημμύρας διευρύνεται γίνεται κατανοητή η συμβολή της εν λόγω τεχνικής στην αποτελεσματικότερη διαχείριση έναντι των πλημμυρικών φαινομένων, παρέχοντας στον ανθρώπινο παράγοντα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για προετοιμασία.



Σχήμα 2-3: Βασικά χαρακτηριστικά των μαιανδρισμών ενός ποταμού

Πηγή: (Güneralp and Mastron, 2012)

Στην πλημμυρική πεδιάδα ενός τροποποιημένου ποταμού, εντοπίζονται αρκετά συχνά ορατά κατάλοιπα ή ίχνη παλιών καναλιών που μας φανερώνουν την ιστορική θέση και τη μορφή του ποταμού. Σε περιπτώσεις που η ιστορία ενός ποταμού δεν είναι διαθέσιμη, πρέπει να επικαλεστούμε ορισμένες υδρομορφολογικές αρχές (ενέργεια, ίζημα, μορφή καναλιού) που είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό των μαιάνδρων. Η μοντελοποίηση της ενέργειας του

ποταμού και της μεταφοράς ιζημάτων είναι επίσης ένα χρήσιμο εργαλείο για να επιτευχθεί αυτό. Επιπρόσθετα, η κατασκευή μαιάνδρων δύναται να συμβάλει έντονα για τη δημιουργία ενός φυσικού αισθητικού τοπίου, με υψηλότερη περιβαλλοντική αξία.

2.2.2 Δεξαμενές ανάσχεσης και λίμνες συγκράτησης πλημμυρικών υδάτων

Οι δεξαμενές ανάσχεσης και οι λίμνες συγκράτησης είναι υδάτινα σώματα τα οποία αποθηκεύουν ουσιαστικά την αυξημένη επιφανειακή απορροή διασφαλίζοντας έναν επιθυμητό ρυθμό ροής των υδάτων. Μπορούν να αποθηκεύσουν και να μεταφέρουν αργά τον πλημμυρικό όγκο καθώς και τα ιζήματα, που υπερπηδούν στα πρηνή των ποταμών κατά τη διάρκεια εκδήλωσης πλημμυρών, προκαλώντας έντονες διαβρώσεις σε αυτά. Μια δεξαμενή κατακράτησης είναι απαλλαγμένη από νερό κατά την διάρκεια μιας ξηρής περιόδου, ενώ μια λίμνη συγκράτησης περιέχει νερό όλο τον χρόνο και είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να συγκρατεί ακόμη περισσότερο όταν πραγματοποιούνται έντονες βροχοπτώσεις.

Σε ένα έντονα αστικό περιβάλλον οι δεξαμενές κατακράτησης είναι σημαντικές για την αποθήκευση και την επιβράδυνση της απορροής των όμβριων υδάτων, λόγω της αυξημένης χρήσης δομικών υλικών όπως η ασφαλτος και το σκυρόδεμα, όπου προκαλούν αυξημένης έντασης απορροή σε σχέση με περιοχές φυσικής κάλυψης όπως τα δάση. Οι δεξαμενές αυτές χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά σε περιοχές άνω των δέκα στρεμμάτων γης. Χρησιμοποιούν γενικά μια πολύ μικρή κλίση για την εκτροπή του νερού και η είσοδος σε αυτές δεν πρέπει να εντοπίζεται περισσότερο από 15% υψηλότερα από το επίπεδο εξόδου έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή ροή του νερού διαμέσου του συστήματος (Σχήμα 2-4).

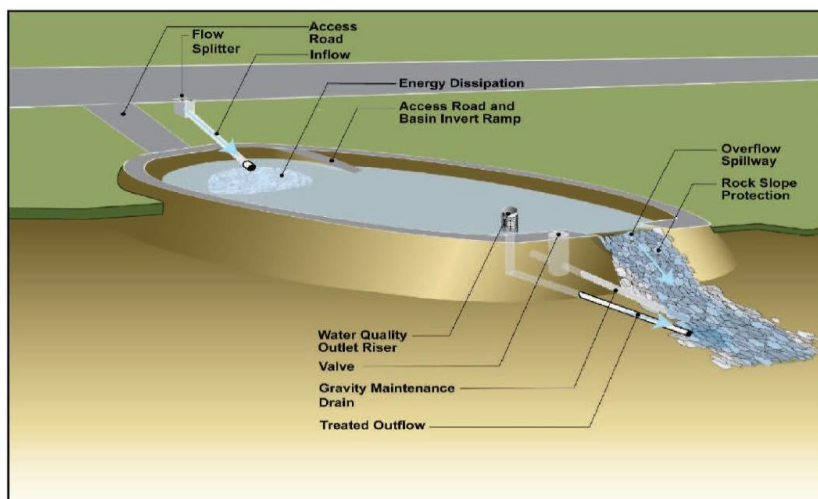
→ Πλεονεκτήματα

- Οι γύρω περιοχές καλύπτονται από έντονη βλάστηση
- Μπορεί να κοστίζει λιγότερο η κατασκευή της από μια υγρή λίμνη συγκράτησης επειδή το μέγεθος είναι γενικά μικρότερο

→ Μειονεκτήματα

- Απαιτεί μεγάλη έκταση
- Δεν βελτιώνει την ποιότητα του νερού
- Μπορεί να γίνει χώρος αναπαραγωγής κουνουπιών και διαφόρων εντόμων
- Μπορεί να μειώσει την αξία της ιδιοκτησίας σε αντίθεση με τις λίμνες όπου μπορούν να προσθέσουν αξία σε αυτή

Οι λίμνες συγκράτησης αποτελούν μια δομή ελέγχου όμβριων υδάτων που παρέχει συγκράτηση και επεξεργασία αυτών, ελέγχοντας παράλληλα την ποσότητα και την ποιότητα τους διαμέσου των φυσικών διαδικασιών τους, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην απομάκρυνση των ρύπων (Σχήμα 2-5). Οι λίμνες θα πρέπει να περιβάλλονται από φυσική βλάστηση προς βελτίωση της σταθερότητας των πρανών και για αισθητικά οφέλη. Το νερό εκτρέπεται σε μια λίμνη από ένα δίκτυο υπόγειων αγωγών που συνδέουν τα ύδατα των βροχοπτώσεων με αυτή. Το σύστημα επιτρέπει την είσοδο μεγάλων ποσοτήτων νερού στη λίμνη και η έξοδος αφήνει μικρές ποσότητες νερού όπως απαιτείται για να διατηρηθεί η επιθυμητή ροή.



Σχήμα 2-4: Δομή δεξαμενής κατακράτησης πλημμυρικών υδάτων
(Πηγή: California Department of Transportation, 2020)

→ Πλεονεκτήματα

- Οι λίμνες συγκράτησης είναι απλές στην κατασκευή τους
- Συλλέγουν και βελτιώνουν την ποιότητα του νερού

- Επεξεργάζεται φυσικά το νερό χωρίς επιπρόσθετο εξοπλισμό
- Βελτιωμένη συλλογή όμβριων υδάτων και έλεγχος πλημμύρας
- Δημιουργούνται νέοι βιότοποι
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψυχαγωγικούς σκοπούς

→ Μειονεκτήματα

- Απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης
- Αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού εάν δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά
- Προκύπτουν θέματα συντήρησης

Μία από τις πιο σημαντικές εργασίες συντήρησης που απαιτείται για αυτές τις λεκάνες και τις λίμνες είναι να διασφαλιστεί ότι τα στόμια των αγωγών εισόδου και εξόδου θα παραμείνουν λειτουργικά και δεν θα φράξουν από φερτά υλικά με την πάροδο του χρόνου. Η επίβλεψη της λειτουργίας τους μπορεί να μειώσει τις δαπανηρές επισκευές στο μέλλον μιας και οποιαδήποτε αλλαγή στο σύστημα θα γίνει αντιληπτό κατά το στάδιο της συντήρησης.



Σχήμα 2-5: Λίμνη συγκράτησης υδάτων κατά την φάση της κατασκευής, Virginia Beach
(Πηγή: Vinicius J. et al. 2022)

Μια ακόμη μείζον σημασίας εργασία συντήρησης αποτελεί ο έλεγχος προς εντοπισμό περιοχών διάβρωσης. Ειδικότερα μετά από έντονες και μεγάλης διάρκειας βροχοπτώσεις θα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος για αφαίρεση των ιζημάτων και των φερτών υλικών τόσο στην όχθη όσο και στα πρανή της λεκάνης ή της λίμνης. Η απομάκρυνση των ιζημάτων από τους αγωγούς διασφαλίζει τη σωστή λειτουργία της. Τέλος η διατήρηση της βλάστησης αποτελεί μια ακόμη διαδικασία συντήρησης και το κόστος της εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης που περιβάλλει τη λεκάνη.

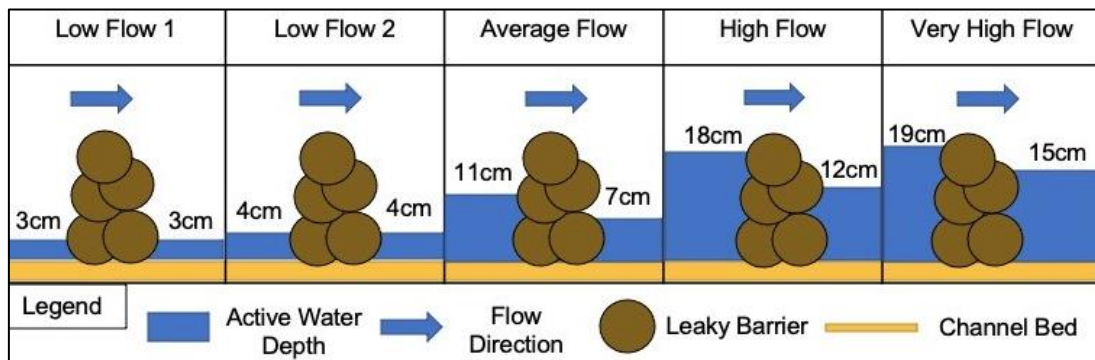
2.2.3 Τοποθέτηση Ξύλινων Φραγμών-Leaky Barriers

Η μέθοδοι Φυσικών λύσεων περιλαμβάνουν την εφαρμογή μέτρων για την αποκατάσταση των φυσικών λειτουργιών των ποταμών, των πλημμυρικών πεδιάδων και της ευρύτερης λεκάνης απορροής. Ένα από το πιο διαδεδομένα τέτοια μέτρα αποτελούν οι Ξύλινοι Φραγμοί ή Leaky Barriers όπου ουσιαστικά πρόκειται για κατασκευές οι οποίες μιμούνται τα φυσικά εμπόδια που προκαλούνται από δέντρα και κλαδιά που καταλήγουν στο ρου ενός ποταμού (Σχήμα 2-7).

Απαρτίζονται από σκόπιμα τοποθετημένα κομμάτια ξύλου παράλληλα στην κοίτη του ρέματος, που λειτουργούν ως εμπόδια στη ροή του νερού, με τις χαμηλές ροές να περνούν κάτω από αυτά. Με την αύξηση της ταχύτητας της ροής, τα φράγματα επιβραδύνουν τη ροή του νερού προς τα κατάντη και λειτουργούν ως χώροι προσωρινής αποθήκευσης αυτού. Κυμαίνονται από ένα μεγάλο κλαδί μέχρι αρκετούς κορμούς δέντρων δεμένους μεταξύ τους όπου προέρχονται από το ευρύτερο φυσικό περιβάλλον καθώς τοποθετούνται κατά μήκος του ρέματος και στερεώνονται στη θέση τους με πασσάλους και σύρματα εκατέρωθεν της όχθης του ποταμού. Οι κορμοί των δέντρων είναι τοποθετημένοι πάνω από το κανονικό επίπεδο ροής και επομένως η φυσική ροή και η κίνηση των ψαριών δεν περιορίζονται. Σε περιπτώσεις αυξημένης ροής αφήνεται από αυτά μόνο μια ορισμένη ποσότητα νερού να περάσει, αποστραγγίζοντας αργά το υπόλοιπο παγιδευμένο νερό προς μείωση της παροχής αιχμής της πλημμύρας.

Συμπληρωματικά, θεωρούνται περισσότερο κατάλληλα για μικρά υδατορέματα πλάτους έως και 2 μέτρα βρίσκοντας έτσι ευρεία εφαρμογή σε ορεινές περιοχές. Το κόστος εγκατάστασης και συνεχούς συντήρησης είναι αρκετά χαμηλό και καθορίζεται από τις

ποσότητες των φερτών υλικών και των ιζημάτων που συγκεντρώνονται στην κατασκευή περιστασιακά.



Σχήμα 2-6: Βάθος νερού για ανάντη και κατόντη ανάλυση παρέμβασης (Πηγή: Taylor, Matthew and Clarke, Lucy E. et al. 2021)

Στόχος της συντήρησης των ξύλινων φραγμών, αποτελεί η συνεχής φυσική ροή του νερού ανάμεσα από τα διάκενα της κατασκευής, κάτι που μειώνει σημαντικά την πιθανότητα να την υπερπηδήσει, δεδομένου ότι θα επηρέαζε σημαντικά την λειτουργικότητα και την αποδοτικότητα της. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι τα Leaky Barriers δεν διακόπτουν τους φυσικούς ποτάμιους κύκλους ενώ βελτιώνουν την ποιότητα των υδάτων, την οικολογία του ποταμού και την αποθήκευση των ιζημάτων στην κοίτη αυτού.



Σχήμα 2-7: Όψη ενός Leaky Barrier τοποθετημένο επί του ρου του ποταμού (Πηγή: Kali Rubaii et al. 2023)

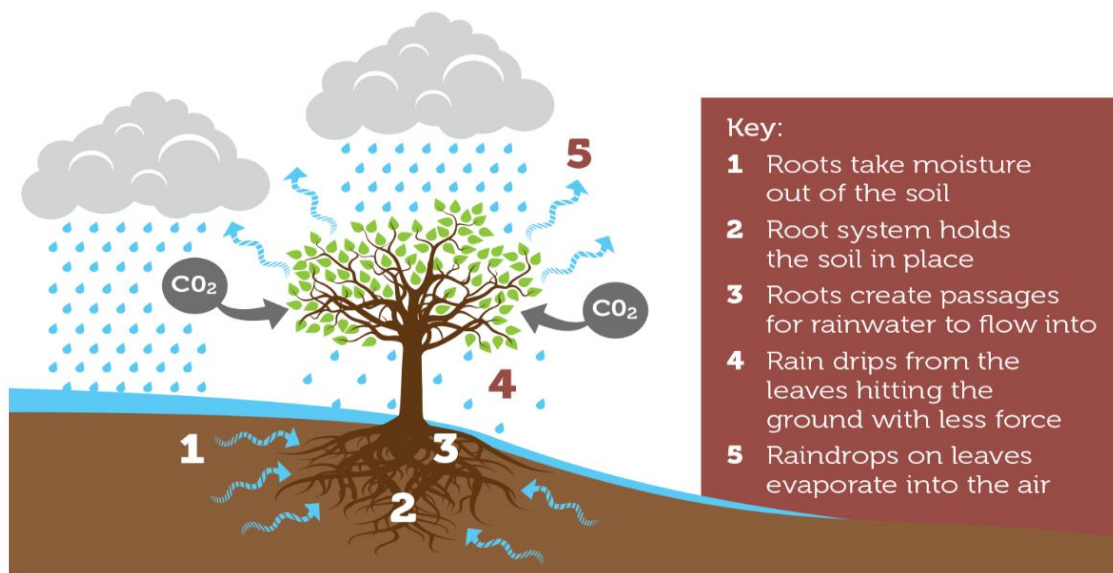
Ωστόσο, για μικρές παροχές δεν παρουσιάζονται σημαντικές αλλαγές στο καθεστώς ροής εν αντιθέσει με μεσαίες και κυρίως μεγάλες παροχές που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Σε περιοχές που έχουν εγκατασταθεί τα Leaky Barriers παρατηρήθηκε ότι αυξήθηκε το βάθος ροής με ταυτόχρονη μείωση της μέσης ταχύτητας ροής, γεγονός που αποδεικνύει ότι το πλημμυρικό κύμα επιβραδύνεται, ενώ παράλληλα συγκρατείται σημαντική ποσότητα νερού μειώνοντας τον πλημμυρικό κίνδυνο κατάντη (Σχήμα 2-6). Παρόλο που η ταχύτητα ροής αυξάνεται αμέσως κατάντη της κατασκευής, επιλέγονται πολλαπλές μικρές παρεμβάσεις τέτοιου είδους κατά μήκος του ποταμού, προκαλώντας συνολική μείωση της μέσης ταχύτητας ροής. Τέλος, λόγω του μικρότερου βάθους ροής κατάντη αποτρέπεται ταυτόχρονα και η ύπαρξη πλανόμενων πλημμυρικών υδάτων εκτός της φυσικής κοίτης του υδατορέματος.

2.2.4 Δενδροφύτευση επί της υδρολογικής λεκάνης απορροής ποταμού

Τα δένδρα συμβάλουν στην διήθηση του νερού της βροχής εντός του εδάφους λόγω του ότι οι ρίζες τους προσδίδουν σε αυτό μεγαλύτερο πορώδες δημιουργώντας έτσι ένα δίκτυο καλά συνδεδεμένων, μικροσκοπικών καναλιών. Το νερό εισχωρεί σε έδαφος, που περιέχει στην δομή του αυτά τα μικρά κανάλια, εκατοντάδες φορές πιο γρήγορα από ό,τι σε ένα έδαφος χωρίς έντονο πορώδες. Επιπλέον, όταν τα φυτικά υπολείμματα πέφτουν στο έδαφος και αρχίζουν να αποδομούνται οργανικά, βοηθούν αυτό να διατηρήσει την ακεραιότητα του και να σχηματίσει μικρές συσσωματωμένες συστάδες οι οποίες συμμετέχουν επίσης στην διατήρηση του εδαφικού πορώδους. Το ριζικό σύστημα των δένδρων συγκρατεί επίσης το έδαφος στη θέση του, εμποδίζοντας τη διάλυση του πλουσιότερου σε θρεπτικά επιφανειακού εδαφικού στρώματος σε ποτάμια και υδατορέματα, τα οποία συμβάλουν έντονα στην αύξηση των πλημμυρικών επεισοδίων κατά περιόδους έντονων βροχοπτώσεων (Σχήμα 2-8).

Από αυτά προκύπτει ότι η κάλυψη του εδάφους με δένδρα είναι τρομερά καθοριστική, αυξάνοντας την ικανότητα του να απορροφά το νερό της βροχής και κατά συνέπεια να μειώνει τον όγκο του νερού που απορρέει επιφανειακά μετά από βροχόπτωση. Τα υπολογιστικά μοντέλα δείχνουν ότι εάν η δενδροφύτευση πραγματοποιηθεί στο 20-35% της

λεκάνης απορροής του ποταμού, παρατηρείται μείωση 10-15% στις πλημμυρικές παροχές αιχμής μετά από 25 χρόνια ανάπτυξης των δασών. Όταν μια λεκάνη δεν διαθέτει μεγάλο αριθμό δένδρων, η ένταση της πλημμύρας συχνά αυξάνεται επειδή το μεγαλύτερο μέρος του νερού της βροχής εισέρχεται σε υδατορέματα και σε ποτάμια σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα.



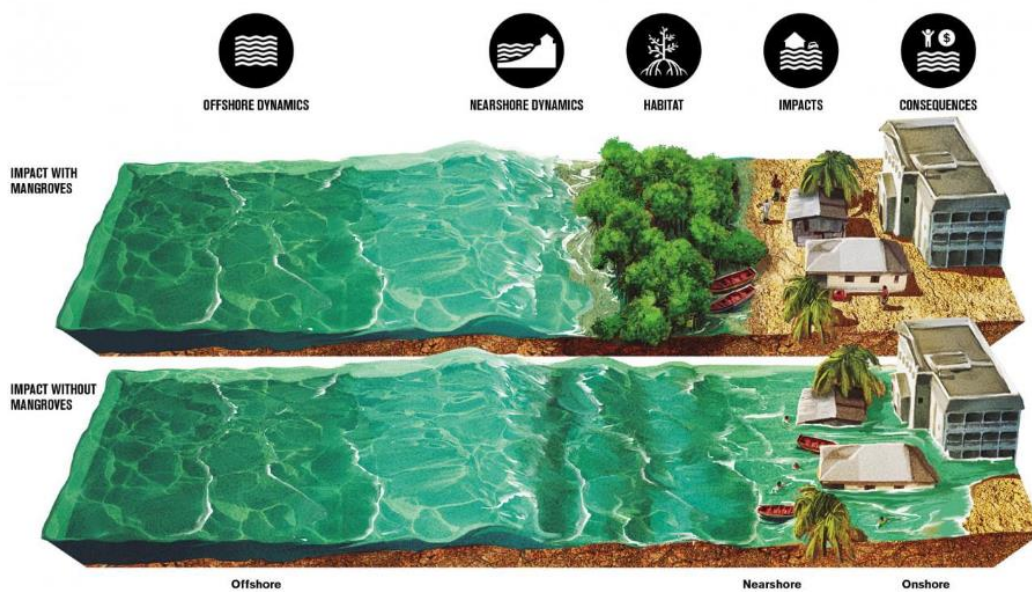
Σχήμα 2-8: Στάδια αλληλεπίδρασης βροχής - δένδρου
(Πηγή: Anna Murgatroyd, Simon Dadson et al. 2019)

Γενικότερα, ροές υψηλής έντασης συχνά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον άνθρωπο και συνήθως απορρέουν στον ωκεανό, ενώ προκαλείται επίσης διάβρωση του εδάφους που οδηγεί σε απώλεια των θρεπτικών του στοιχείων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο μεγάλες εκτάσεις πρώην παραγωγικής γης, όπου οι ετήσιες βροχοπτώσεις είναι σχετικά υψηλές, έχουν ερημοποιηθεί μόλις αφαιρεθούν τα δέντρα. Η δενδροφύτευση μειώνει τα πλημμυρικά γεγονότα υψηλής έντασης και δημιουργεί μια πιο βιώσιμη ροή που είναι χρήσιμη ακόμη και μετά τη λήξη της βροχής καθώς περιορίζει τη διάβρωση του εδάφους (Σχήμα 2-9).

Τέλος, η δενδροφύτευση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μείωση του όγκου των πλημμυρών και συμμετέχει ενεργά στην καθυστέρηση της άφιξης των πλημμυρικών αιχμών, λόγω μείωσης του χρόνου υστέρησης στην υδρολογική λεκάνη απορροής.

Συμπερασματικά η τεχνική δενδροφύτευσης ως αντιπλημμυρικό μέτρο προστασίας Nature-Based Solution:

- Αυξάνει την χωρητικότητα αποθήκευσης με τη δημιουργία υγροτόπων εντός του εδαφικού υποστρώματος όπου πληρώνονται κατά τη διάρκεια πλημμυρών και αδειάζουν αργά
- Επιβραδύνουν την ροή αυξάνοντας την τραχύτητα προς αποφυγή αιφνίδιων πλημμυρών (Flash Floods)
- Αυξάνουν την ποσότητα του νερού που διεισδύει στο έδαφος χρησιμοποιώντας τις ρίζες των δένδρων για τη δημιουργία καναλιών
- Μειώνουν τις παροχές αιχμής που προέρχονται από παραπόταμους



Σχήμα 2-9: Επιπτώσεις πλημμυρικού επεισοδίου με και χωρίς τη χρήση Μανγκρόβιων δένδρων

(Πηγή: Mangrove forests provide protection against tsunamis, AccessScience)

2.2.5 Ενίσχυση πρηνών ποταμού

Ο πιο βιώσιμος και φυσικός τρόπος για να προστατευτούν τα πρηνή ενός ποταμού από την διάβρωση είναι να χρησιμοποιήσουμε διάφορα τμήματα των δένδρων, ρίζες ή κλαδιά αποτρέποντας την εξέλιξη αυτής, εξαιτίας της δύναμης της ροής του ποταμού, ενθαρρύνοντας ταυτόχρονα την φυσική αναγέννηση (Σχήμα 2-13). Ένα από τα κύρια οφέλη αυτών των τεχνικών είναι ότι σε αντίθεση με άλλες δεν αυξάνεται ο κίνδυνος διάβρωσης για τα πρηνή κατάντη. Ταυτόχρονα όπως οι ρίζες μεγαλώνουν αυξάνονται οι συνεκτικές δυνάμεις που ασκούνται επί του πρηνούς, κάτι που ενισχύει την συνολική ευστάθεια του, αποτρέποντας πιθανές μελλοντικές αστοχίες.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι χρήσης των δέντρων ή των τμημάτων αυτών για την προστασία των πρηνών από την διάβρωση και η αποτελεσματικότητα του καθενός εξαρτάται από την ενέργεια του προς μελέτη τμήματος ποταμού. Διάφορες τεχνικές στοχεύουν στον ακριβή καθορισμό αυτής της ενέργειας κάτι που δεν θα αναλυθεί όμως στην παρούσα εργασία. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βασίζεται ως επί το πλείστον στον οικονομικό παράγοντα, μιας και αρκετές από αυτές απαιτούν μηχανική υποστήριξη για την μεταφορά και την εγκατάσταση μεγάλων κορμών και δένδρων. Οι μέθοδοι που καλούμαστε αναμεσά τους να επιλέξουμε είναι οι εξής:

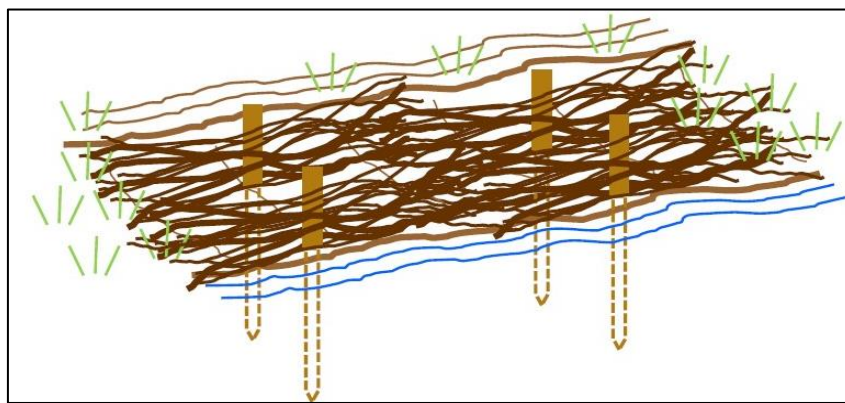
i. Πάσσαλοι δένδρου Ιτιάς

Οι πάσσαλοι Ιτιάς μπορούν να παρέχουν προστασία και υποστήριξη έναντι της διάβρωσης σε μια σειρά εδαφικών τύπων και ροών. Στα απότομα πρηνή θα πρέπει να τοποθετούνται σε βαθμίδες και είναι από τα πιο εύκολα και φθηνά φυσικά υλικά που μπορούν να ασφαλιστούν στη θέση τους απλά σφυρηλατώντας τα. Με την πάροδο του χρόνου, η ιτιά θα δημιουργήσει ένα ισχυρό ριζικό δίκτυο στο πρηνές το οποίο θα ενισχύσει φυσικά την αντοχή αυτού. Τα κλαδιά θα μεγαλώσουν και θα σχηματίσουν εύκαμπτα στελέχη που θα αυξήσουν την τραχύτητα της όχθης, διαχέοντας περισσότερη ενέργεια και προστατεύοντας αποτελεσματικά τα πρηνή από την διάβρωση.

ii. Μικρά δένδρα και κλαδοπλέγματα

Τα παχιά, μικρά δένδρα καθώς και τα κλαδιά έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά ως προς την θραύση της ενέργειας ροής, λόγω της ευελιξίας τους και σε επίπεδο ποταμού

σημειώνεται έντονη απώλεια αυτής της ενέργειας, καθώς αυτό ρέει γύρω από αυτά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μεγέθη ρεμάτων και μπορούν να συνδυαστούν με πασσάλους ιτιάς για πρόσθετη σταθερότητα. Ενδείκνυται να προσαρμόζονται σε διάφορες ενεργειακές συνθήκες κάθε ποταμού, με τα βαρύτερα και περισσότερα κλαδιά να χρησιμοποιούνται σε ποτάμια υψηλότερης ενέργειας. Η χρήση δεσμίδων από κλαδιά δεμένα μεταξύ τους και στερεωμένα στο πρηνές, καθώς και η τοποθέτηση μικρών δένδρων μπροστά από την όχθη που διαβρώνεται, εξασφαλίζουν μια συνεκτική δομή που συμβάλει αποτελεσματικά έναντι της διάβρωσης (Σχήμα 2-10).

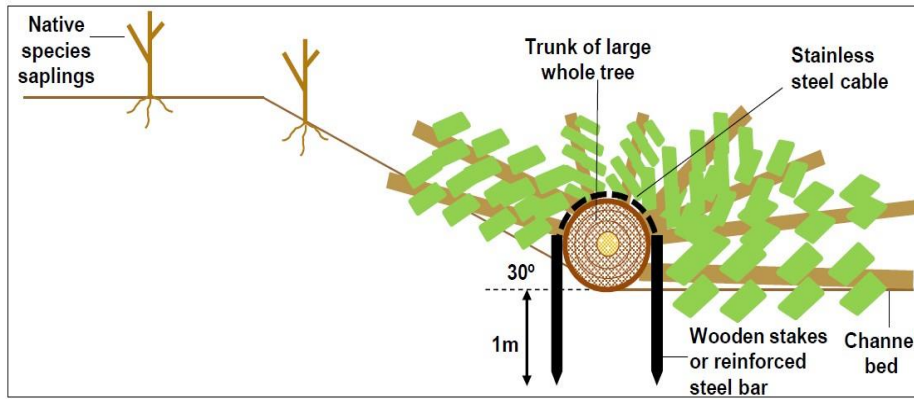


Σχήμα 2-10: Τοποθέτηση κλαδοπλεγμάτων σε πρηνές με στερεωμένους ξύλινους πασσάλους

(Πηγή: Scottish Environment Protection Agency et al. August 2020)

iii. Μεγάλα δένδρα

Τα μεγάλα δέντρα μπορούν να παρέχουν πολύ καλή προστασία σε μεγάλους ορμητικούς ποταμούς που χαρακτηρίζονται από συνθήκες υψηλής ενέργειας. Κρίνεται απαραίτητο να είναι σωστά 'ασφαλισμένα' στη θέση τους, προς αποφυγή καταστροφής των υποδομών κατάντη, σε περίπτωση που παρασυρθούν από τη ροή και τοποθετούνται παράλληλα στα πρηνή του ποταμού με ποικίλους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος είναι η ασφάλιση των κορμών με μεταλλικό σύρμα εντός του εδάφους του καναλιού και με πακτωμένες μεταλλικές ράβδους εντός του πρηνούς όπως φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 2-11 που ακολουθεί.

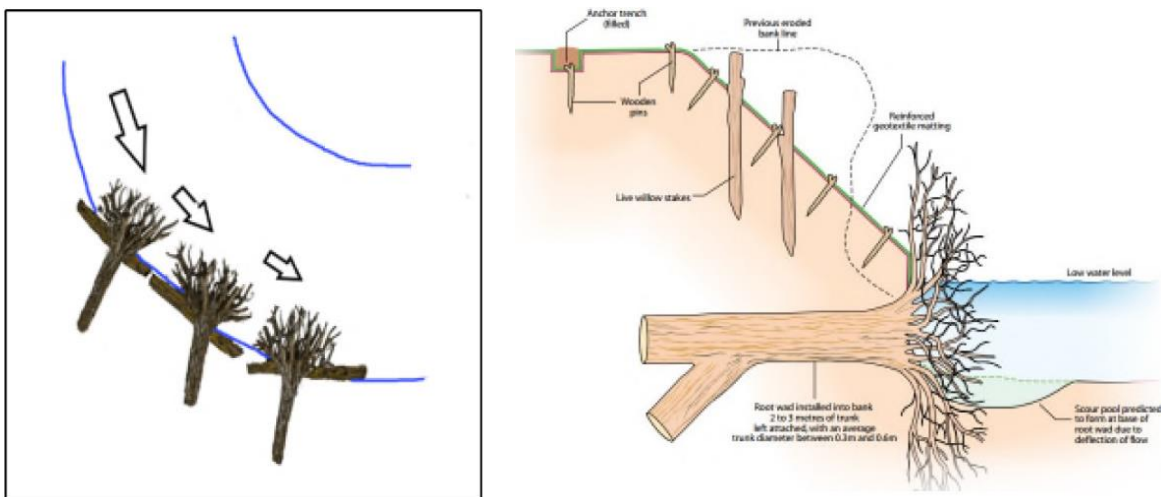


Σχήμα 2-11: Τοποθέτηση μεγάλου δέντρου στην κοίτη ποταμού, ασφαλισμένο με μεταλλικό σύρμα και ράβδους

(Πηγή: Scottish Environment Protection Agency et al. August 2020)

iv. Δεσμίδες από ρίζες δένδρων

Οι ρίζες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την τεχνική των μεγάλων δένδρων και με ένα ή δύο δεσμίδες ριζών για επιπρόσθετη αντοχή. Οι ρίζες λειτουργούν εξαιρετικά στην εξωτερική πλευρά των μαιανδρισμών ενός ποταμού σε συνδυασμό με τις αυξημένες ταχύτητες ροής που επικρατούν (Σχήμα 2-12). Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν σημεία αγκύρωσης στις δεσμίδες από κλαδιά και στα μεγάλα δένδρα τοποθετημένα σε σειρά κατά μήκος του πρानούς που απαιτείται η προστασία του.

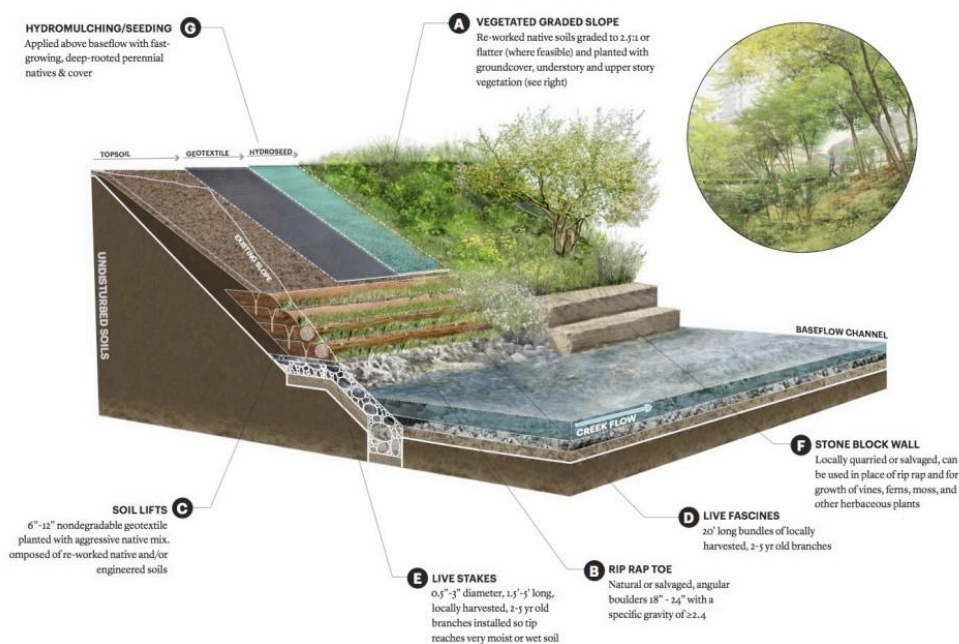


Σχήμα 2-12: Προστασία πρानών με χρήση δεσμίδων από ρίζες δένδρων

(Πηγή: Scottish Environment Protection Agency et al. August 2020)

➤ Συμπερασματικά:

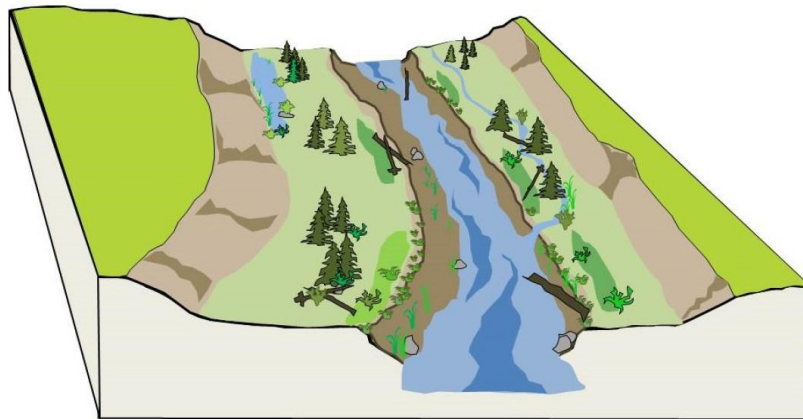
- Οι προαναφερθείσες τεχνικές κρίνεται προτιμητέο να εφαρμόζονται κατά το μεταγενέστερο μέρος του χειμώνα (Φεβ - Μάρτιο), προς το τέλος της υγρής περιόδου. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη μείωση διάβρωσης του πρόσφατα διαταραγμένου εδάφους εξαιτίας υψηλών ταχυτήτων ροής, βοηθώντας την ανάπτυξη της βλάστησης στα πρανή.
- Τα δύο πρώτα χρόνια της εγκατάστασης αποτελούν συχνά το κλειδί της επιτυχίας.
- Είναι πολύ σημαντικό να επιθεωρούνται τα έργα μετά από περιόδους αυξημένων ροών και να υλοποιούνται, όπου κρίνεται αναγκαίο, επί τόπου και εγκαίρως κατάλληλες επισκευές όπως π.χ. αναφύτευση.
- Η Ιτιά κρίνεται ως η πιο κατάλληλη για αυτές τις παρεμβάσεις μιας και εγκαθίσταται και αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς σε σχέση με τα υπόλοιπα δένδρα.



Σχήμα 2-13: Τρόποι φυσικής προστασίας των πρανών ενός ποταμού
(Πηγή: Adaptation aux impacts du changement climatique, 2009)

2.2.6 Αποκατάσταση επανασύνδεσης ποταμού-πλημμυρικής πεδιάδας

Η πλημμυρική πεδιάδα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του ποταμού καθώς αποτελεί τη μεταβατική ζώνη μεταξύ της κοίτης και των ορεινών περιοχών (Σχήμα 2-14). Εξ ορισμού αφορά δυναμικές εκτάσεις, χαμηλών κλίσεων, στις οποίες εναποτίθεται ο πλημμυρικός όγκος όπου διαφέρουν δραματικά ακόμη και κατά μήκος του ίδιου του ποταμού. Εμφανίζονται διαδοχικά κατά μήκος αυτού, διαστέλλονται και συστέλλονται κατά την μεταβολή των διαφόρων περιορισμών του βραχώδους υποστρώματος, με τροποποιημένη ισχύ ρεμάτων και μέγεθος ιζημάτων (Nanson and Croke 1992, Tockner and Stanford 2002, Ward et al. 2002). Η μορφή και η οικολογία της πλημμυρικής πεδιάδας διαμορφώνονται, με την πάροδο του χρόνου, σύμφωνα με τις φυσικές διεργασίες που προκαλούνται από περιοδικές πλημμύρες.



Σχήμα 2-14: Περιοχές που πλημμυρίζουν κατά τη διάρκεια αυξημένων ροών
(Πηγή: American Rivers et al. 2016)

Τα τροποποιημένα κανάλια αποτελούν την πιο κοινή πηγή αποσύνδεσης μεταξύ ποταμών και πλημμυρικών πεδιάδων και τα αναχώματα κατά μήκος ενός ποταμού αποτελούν το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα. Πρόκειται για κατασκευές όπου προορίζονται να συγκρατούν αυξημένες ροές εντός του καναλιού με κύριο στόχο την προστασία των περιοχών πίσω από αυτά. Αυτές οι μηχανικές πρακτικές μεταμορφώνουν τα ποτάμια σε απλοποιημένους ουσιαστικά «σωλήνες» όπου μεταφέρουν το νερό πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ενέργεια, ως αποτέλεσμα μεγάλης εκτάσεως μιας πλημμυρικής πεδιάδας να χάνουν την επαφή τους με το κύριο υδατόρεμα.

Οι πλημμυρικές πεδιάδες συνδέονται άμεσα με τις πλημμύρες, ώστε να διατηρούν αναλλοίωτες τις φυσικές τους λειτουργίες και επομένως η υδρολογική τους επικοινωνία

κρίνεται απολύτως αναγκαία. Εν αντιθέσει της αποκατάστασης των χαρακτηριστικών μιας πεδιάδας βάση ανθρώπινης παρέμβασης, η φυσική αποκατάσταση των διεργασιών δημιουργούν και συντηρούν ένα οικοσύστημα καθώς επιτρέπουν σε αυτό να αναπτυχθεί με φυσικό ρυθμό. Βασίζεται σε 4 επιμέρους στάδια:

i. **Προσδιορισμός μιας μη λειτουργικής πλημμυρικής πεδιάδας**

Περιλαμβάνει μια προοπτική του τοπίου και συλλέγονται οι πληροφορίες που χρειάζεται για να προσδιορισθούν ποια λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα και ποια όχι σε ένα σύστημα ποταμού - πλημμυρικής πεδιάδας. Δύναται να χρησιμοποιηθούν στοιχειώδη δεδομένα που βασίζονται στην παρατήρηση και σε ιστορικά δεδομένα ή περισσότερα τεχνικά αποτελέσματα από υδρολογικά μοντέλα.

Αρχικά εκτιμάται η υφιστάμενη **συνδεσιμότητα** με την πλημμυρική πεδιάδα συγκρίνοντας τις μετρήσεις στάθμης της πλημμύρας με το υψόμετρο της πλημμυρικής πεδιάδας. Στην συνέχεια μελετάται το καθεστώς **μεταβλητής ροής** του ποταμού και εξετάζεται το αν υποστηρίζονται διακυμάνσεις αυξημένων και μειωμένων ροών καθώς τους χρόνους, τις διάρκειες και τις περιόδους επαναφοράς που λαμβάνουν χώρα, διαμέσου ιστορικών χρονοσειρών στάθμης και παροχής. Η έρευνα σχετικά με το αν διαθέτει η πλημμυρική πεδιάδα **επαρκή χώρο** για να φιλοξενήσει όλα τα πιθανά στάδια της πλημμύρας και των διαδικασιών σχηματισμού οικοτόπων αποτελεί το επόμενο βήμα. Πραγματοποιείται ανάλυση γεωμορφολογική διαμέσου GIS εφαρμογών και μοντελοποίηση ενδιαιτημάτων διαμέσου του λογισμικού HEC-RAS. Τελικό στάδιο αποτελεί ο καθορισμός των **οικοτόπων** και της **δομικής βιοποικιλότητας** της περιοχής διαμέσου παρατηρήσεων πεδίου, οικολογικών εκτιμήσεων και χρήσεων γης.

ii. **Καθορισμός στόχων αποκατάστασης**

Έχοντας εντοπίσει την υφιστάμενη κατάσταση κάθε επιμέρους λειτουργικού χαρακτηριστικού της πλημμυρικής πεδιάδας, οι βασικοί στόχοι για την αποκατάσταση της αφορούν πλέον την επαναφορά των λειτουργικών χαρακτηριστικών που απουσιάζουν από ένα σύστημα πλημμυρικής πεδιάδας. Τα έργα που θα λάβουν χώρα έχουν ως στόχο ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία μπορεί να είναι η βελτίωση των συνθηκών για τα είδη των ψαριών

που εξαρτώνται από τις πλημμυρικές πεδιάδες, η επιστροφή των υδρολογικών συνθηκών που εξαρτώνται άμεσα από τη βλάστηση των πλημμυρικών πεδιάδων και η βελτίωση της ποιότητας του νερού και των συνθηκών ιζήματος.

Το επόμενο ερώτημα θέτει ως στόχο τον βαθμό κάθε χαρακτηριστικού της πλημμυρικής πεδιάδας που πρέπει να αποκατασταθεί για την επίτευξη των στόχων του οικοσυστήματος. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αξιολόγηση αυτού διαμέσου αξιοποίησης γεωχωρικών, τοπογραφικών και υδρολογικών δεδομένων. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων μας βοηθά να κατανοήσουμε πώς οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά της πλημμυρικής πεδιάδας θα επηρεάσουν το καθεστώς ροής, την πλημμύρα και τα οικοσυστήματα της πλημμυρικής πεδιάδας. Η έννοια της **ροής ενεργοποίησης της πλημμυρικής πεδιάδας** και η **αναμενόμενη ετήσια αξιολόγηση των οικοτόπων** είναι δύο αντιπροσωπευτικές μέθοδοι που μας οδηγούν σε αυτό.

- Η ιδέα της **ροής ενεργοποίησης της πλημμυρικής πεδιάδας (FAF)** αναπτύχθηκε για να προσδιορίσει το ελάχιστο επίπεδο ροής που απαιτείται για να πλημμυρίσει μια πλημμυρική πεδιάδα και να ξεκινήσει μια σημαντική απόκριση στις οικολογικές διεργασίες, που ονομάζεται **ροή ενεργοποίησης** (Williams et al. 2009). Η ροή ενεργοποίησης ενός ποταμού είναι αρκετά μεγάλη ώστε να πλημμυρίσει την πλημμυρική πεδιάδα, εμφανίζεται την ιδανική στιγμή και με την κατάλληλη διάρκεια προς την έναρξη οικολογικών οφελών και επαναλαμβάνεται αρκετά συχνά για να υποστηρίξει αυτά τα οφέλη ανά έτος. Ο καθορισμός του **FAF** απαιτεί τέσσερα σύνολα δεδομένων από ένα σύστημα πλημμυρικής πεδιάδας: προφίλ τοπογραφίας πλημμυρικής πεδιάδας (αεροεικόνες LIDaR), προφίλ σταδίου πλημμύρας ποταμού (βάθος ροής) από υδρολογικά μοντέλα, δεδομένα στάθμης ποταμού για διαφορετικούς χρόνους και πληροφορίες οικοσυστήματος που περιγράφουν λεπτομερώς τα κατώφλια πλημμύρας για συγκεκριμένες ανάγκες ειδών και οικολογικές διεργασίες (π.χ. ανάγκες ωοτοκίας ψαριών και περίοδοι ανάπτυξης νεαρών ειδών).
- Η μέθοδος της **αναμενόμενης ετήσιας αξιολόγησης των οικοτόπων (Expected Annual Habitat/EAH)** αφορά ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για τον ποσοτικό

προσδιορισμό της έκτασης που καταλαμβάνουν οι πλημμυρικοί οικότοποι που υποστηρίζονται από μια ροή συγκεκριμένης διάρκειας και στάθμης (Matella and Jagt 2014). Με τη συγχώνευση σχέσεων ροής-συχνότητας με καμπύλες πλημμυρισμένης περιοχής, αποκτάται μια καμπύλη συχνότητας περιοχής-διάρκειας που μετρά την έκταση της γης που καταλαμβάνεται από ένα συγκεκριμένο επίπεδο ροής. Όταν χρησιμοποιείται σε ένα πρόγραμμα GIS, η μέθοδος **ΕΑΗ** μπορεί να προβλέψει την έκταση πλημμυρικής πεδιάδας που θα πλημμυρίσει ως αποτέλεσμα αλλαγών στο καθεστώς ροής του ποταμού.

iii. Αναγνώριση εγγενών ορίων της τοποθεσίας του έργου

Σπάνια ένας επαγγελματίας μηχανικός θα έχει την ικανότητα να αλλάξει όλα τα χαρακτηριστικά μέσα σε ένα σύστημα ποταμού - πλημμυρικής πεδιάδας. Αντιθέτως, τα έργα αποκατάστασης πρέπει να λειτουργούν εντός των παραμέτρων που ορίζονται από το ποτάμι, την πλημμυρική πεδιάδα ή την ήδη υπάρχουσα υποδομή. Διάφορα ερωτήματα προκύπτουν.

- *Είναι δυνατή η επανασύνδεση τμημάτων της πλημμυρικής πεδιάδας;*
- *Μπορεί να αλλάξει το καθεστώς ροής ανάντη;*
- *Υπάρχουν περιοχές εντός της πλημμυρικής πεδιάδας που δεν ευνοούν την πλημμύρα;*

Παράγοντες που δεν μπορούν να τροποποιηθούν περιορίζουν τις διαθέσιμες ενέργειες για αποκατάσταση και θα πρέπει να γίνονται κατανοητοί κατά την αξιολόγηση των ενεργειών αυτών. Παραδείγματα περιορισμών μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Την αποσύνδεση της πλημμυρικής πεδιάδας από υποδομή που δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη για απομάκρυνση λόγων ασφάλειας από τις πλημμύρες
- Την ύπαρξη ρυθμιζόμενης ροής που δεν μπορεί να αλλάξει λόγω δικαιωμάτων νερού ή νομικών λόγων
- Περιοχές πλημμυρικών πεδιάδων που περιορίζονται από υποδομές ή από χρήσεις γης που δεν ευνοούν την πλημμύρα

- Τομή της κοίτης του ποταμού όπου το κανάλι και η πλημμυρική πεδιάδα κρίνονται ως πολύ ευαίσθητα για να υποβαθμιστούν ή να ανασκαφούν, λόγω παρουσίας ευαίσθητων ενδιαιτημάτων ή περιοχών άντλησης νερού

iv. Προσδιορισμός των ελάχιστων ενεργειών που απαιτούνται για την επαναφορά των λειτουργιών της πλημμυρικής πεδιάδας σε επίπεδο υλοποίησης στόχων

Η αποκατάσταση των διεργασιών του οικοσυστήματος μέσω της ελάχιστης απαιτούμενης ανθρώπινης παρέμβασης είναι μια σημαντική αρχή αυτής που βασίζεται σε συγκεκριμένες διαδικασίες. Αυτές χρησιμοποιούνται συχνά για την επανασύνδεση και την αποκατάσταση των πλημμυρικών πεδιάδων καθώς παρουσιάζονται οργανωμένες βάση των τεσσάρων λειτουργικών χαρακτηριστικών της πλημμυρικής πεδιάδας.

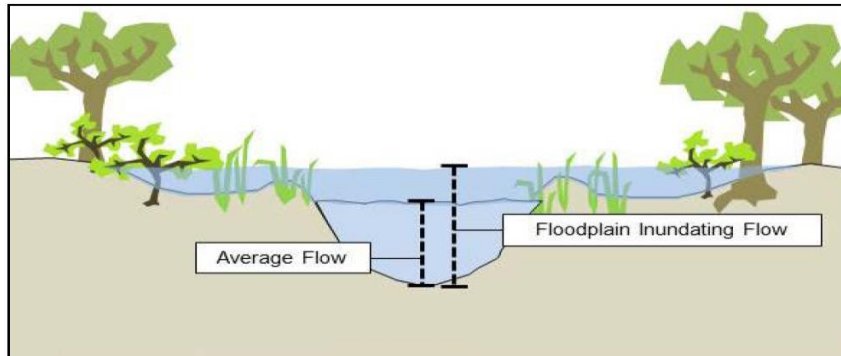
- **Συνδεσιμότητα**

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επανασύνδεση ενός ποταμού και μιας πλημμυρικής πεδιάδας εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την αιτία της αποσύνδεσης. Η φυσική αποσύνδεση προκύπτει όταν σημειώνονται αυξημένες ροές σε ένα ποτάμι αλλά δεν μπορούν να προσεγγίσουν ή να καλύψουν την περιοχή της πλημμυρικής πεδιάδας. Υπάρχουν δύο συνήθεις τύποι φυσικής αποσύνδεσης η **δομική** και η **κατακόρυφη** αποσύνδεση. Η **δομική αποσύνδεση** λαμβάνει χώρα όταν έχουν κατασκευαστεί υποδομές, όπως αναχώματα (Σχήμα 2-16), για να εμποδίζουν τα νερά της πλημμύρας να εισέρχονται στην πλημμυρική πεδιάδα (Σχήμα 2-15). Η **κατακόρυφη αποσύνδεση** (Σχήμα 2-17) προκύπτει όταν οι υδρολογικές διεργασίες έχουν χαράξει ένα νέο κανάλι σε σημείο που οι πλημμύρες δεν μεταβαίνουν από το κύριο υδατόρεμα στην πλημμυρική πεδιάδα. Η υδρολογική αποσύνδεση συμβαίνει όταν η ροή ενός ποταμού μεταβάλλεται σε σημείο που δεν ενεργοποιούν την πλημμυρική πεδιάδα.

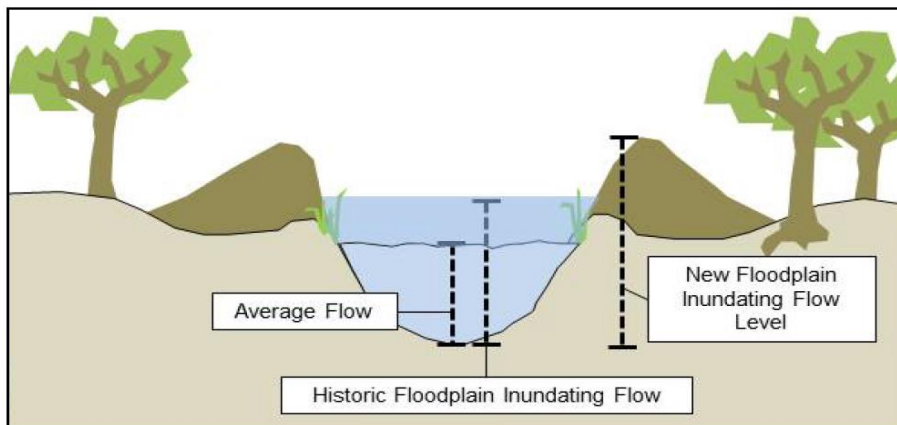
- **Μεταβλητή Ροή**

Ροές αποκατάστασης ενός ποταμού με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά χρόνου, μεγέθους, διάρκειας και συχνότητας απαιτούνται για την αποκατάσταση μιας οικολογικά λειτουργικής πλημμυρικής πεδιάδας. Αυτές οι προσαρμογές ροής απαιτούν τη

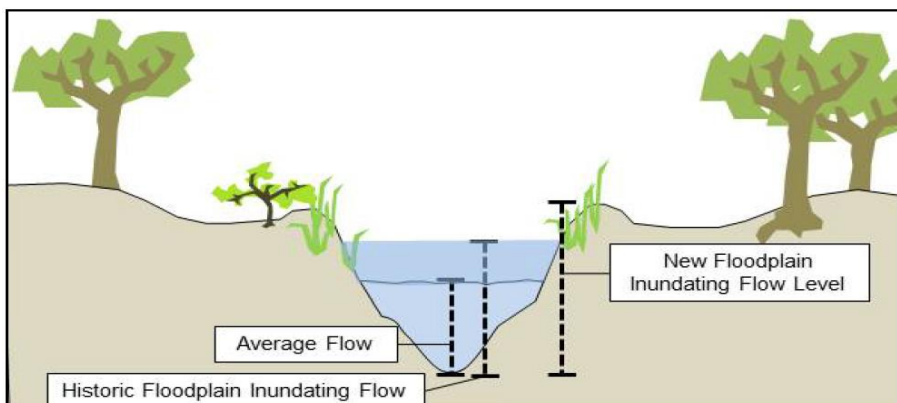
συνεργασία των ρυθμιστών ανάντη, οι οποίοι μπορούν να ελέγχουν τις απορροές διαμέσου φραγμάτων σύμφωνα με συγκεκριμένα χρονοδιαγράμματα.



Σχήμα 2-15: Συνδεδεμένη πλημμυρική πεδιάδα
(Πηγή: American Rivers et al. 2016)

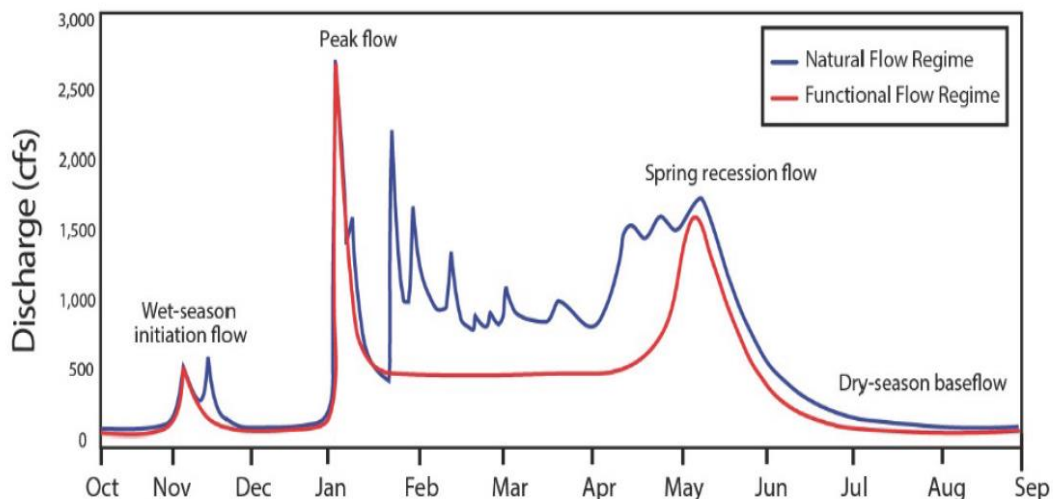


Σχήμα 2-16: Αποσυνδεδεμένη πλημμυρική πεδιάδα λόγω αναχωμάτων
(Πηγή: American Rivers et al. 2016)



Σχήμα 2-17: Κατακόρυφα αποσυνδεδεμένη πλημμυρική πεδιάδα
(Πηγή: American Rivers et al. 2016)

Όπου υπάρχει, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται υδρολογικά και οικολογικά δεδομένα (μέσω των μεθόδων **FAF** και **EAH**) για τον χαρακτηρισμό των αλλαγών στη ρύθμιση ροής που απαιτούνται, για την αποκατάσταση και τη διατήρηση συστημάτων πλημμυρικών πεδιάδων. Πολλοί ρυθμιζόμενοι ποταμοί δεν παράγουν πλέον τις πιο συχνές και μειωμένες ροές που ενεργοποιούν τις πλημμυρικές πεδιάδες που εμφανίζονται φυσικά κάθε 2-5 χρόνια (Σχήμα 2-18). Η επιστροφή αυτών των μικρότερων και λιγότερο επικίνδυνων ροών σε ένα ποτάμιο σύστημα μπορεί να γίνει χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η ικανότητα ενός φράγματος να προστατεύει τις ανθρώπινες κοινότητες από μεγαλύτερες πλημμύρες. Οι μελλοντικές συνθήκες ροής και χρήσης γης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου είναι διαθέσιμες για να δίνουν βάση στη ρύθμιση της ροής και να διασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τις λειτουργίες της πλημμυρικής πεδιάδας μακροπρόθεσμα.



Σχήμα 2-18: Ετήσιες χρονοσειρές φυσικής και λειτουργικής απορροής ποταμού (Πηγή: Yellen et al. 2015)

- **Χωρική Κλίμακα**

Μια λειτουργική πλημμυρική πεδιάδα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από φυσική κάλυψη γης που να ευνοεί την πλημμύρα και το περιβάλλον για οικολογικές διεργασίες. Θα πρέπει να εξασφαλιστεί ικανοποιητική περιοχή πλημμυρικής πεδιάδας έτσι ώστε να συγκρατείται η ελάχιστη ροή ενεργοποίησης αυτής για ένα τέτοιο σύστημα. Οι έννοιες **EAH** και **FAF**

μπορούν να παρέχουν μια βάση για την εκτίμηση της έκτασης της γης που απαιτείται για να φιλοξενήσει διάφορα επίπεδα ροής και οικολογικές διεργασίες. Οι εργασίες διατήρησης, τα ρυθμιστικά εργαλεία και οι πρακτικές διαχείρισης γης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να οριοθετήσουν εκτάσεις πλημμυρικών πεδιάδων που θα διατηρηθούν ως λειτουργικές.

- **Οικότοποι και Δομική ποικιλότητα**

Οι ποικίλες συνθήκες διαταραχής των οικοτόπων, η υδρολογική συνδεσιμότητα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρέχουν το πρότυπο με βάση το οποίο τα οικοσυστήματα της πλημμυρικής πεδιάδας αναπτύσσονται. Όπου υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες συνδεσιμότητας, ροής και χωρικής κλίμακας, οι δυναμικές διεργασίες ποταμών-πλημμυρικής πεδιάδας δημιουργούν ενδιαιτήματα και δομική ποικιλότητα με την πάροδο του χρόνου. Δράσεις αποκατάστασης απαιτούνται μόνο όταν υπάρχουν πρακτικές διαχείρισης γης που παρεμβαίνουν στη φυσική ανάπτυξη των πλημμυρικών πεδιάδων ή όταν οι περιοχές αυτών υποβαθμίζονται σε σημείο που απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για την τόνωση των φυσικών διεργασιών.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

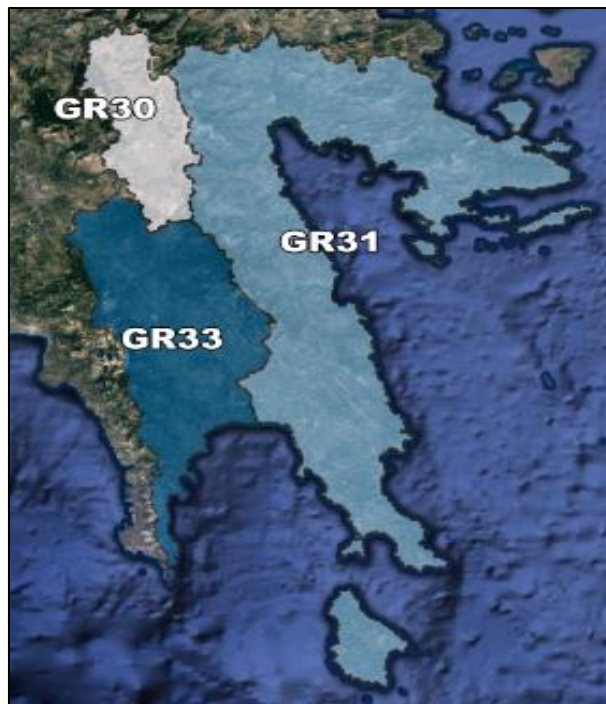
3.1.1 Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)

Το Υδατικό διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03) έχει έκταση **8.442 km²** και εντός των ορίων του βρίσκονται τα νησιά Πόρος, Ύδρα, Σπέτσες, Σπετσοπούλα, Δοκός, Κύθηρα και Αντικύθηρα καθώς και η χερσόνησος των Μεθάνων. Τα γεωμορφολογικά όρια του διαμερίσματος είναι προς τα δυτικά ο Ταΰγετος και το Μαίναλο, προς τα βόρεια ο ορειογραφικός άξονας Ολύγιρτου - Λυρκείων - Ονείων, προς τα ανατολικά ο Πάρνωνας, ο Αργολικός Κόλπος και ο Κόλπος της Επιδαύρου και προς τα νότια ο Λακωνικός Κόλπος. Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο χαρακτηρίζεται γενικά ορεινό και απότομο στο εσωτερικό, ημιορεινό στην εξωτερική του περίμετρο και πεδινό στην παράκτια ζώνη του. Στην περιοχή του ΥΔ 03 βρίσκονται οι πόλγες της Τρίπολης, του Λεβιδίου και της Κανδήλας. Το οροπέδιο της Τρίπολης αποτελεί μία κλειστή τυπική καρστική λεκάνη, η οποία χαρακτηρίζεται από μέτρια ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου.

Οι σημαντικότερες πεδιάδες εντοπίζονται στην περιοχή του Άργους, στην περιοχή του Άστρους Βόρειας Κυνουρίας και στο Λεωνίδιο. Προς το νότο απαντώνται οι πεδιάδες των Μολάων, της Νεάπολης και οι μεγάλες πεδιάδες της Σπάρτης και της Σκάλας. Το κλίμα των ορεινών περιοχών είναι υγρό κατά τη διάρκεια του χειμώνα και σχετικά ξηρό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το μέσο ετήσιο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων φτάνει τα 900mm, με μία χαρακτηριστική αύξηση κατά την περίοδο μεταξύ Νοεμβρίου - Φεβρουαρίου (υπερβαίνει τα 100mm ανά μήνα). Το καλοκαίρι, το κλίμα είναι ξηρό, με το ύψος των βροχοπτώσεων να μην ξεπερνά τα 20 - 40mm μηνιαίως.

Το Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου αποτελείται από τρεις (3) Λεκάνες Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ), αυτές του Οροπεδίου Τρίπολης (GR30), των Ρεμάτων Αργολικού Κόλπου (GR31) και του Ποταμού Ευρώτα (GR33) (Σχήμα 3-1). Η έκταση της λεκάνης του οροπεδίου Τρίπολης είναι **907 km²** και χωροθετείται στο κέντρο της Πελοποννήσου. Η εν λόγω λεκάνη εκτείνεται στην Περιφερειακή Ενότητα Αρκαδίας, εκτός από ένα πολύ μικρό τμήμα της, που βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας. Η

έκταση της λεκάνης Ρεμάτων Αργολικού Κόλπου είναι **5296 km²** και καταλαμβάνει το ανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου. Εκτείνεται στις Περιφερειακές Ενότητες Νήσων Αττικής, Αργολίδας, Αρκαδίας και Λακωνίας. Η έκταση της ΛΑΠ του ποταμού Ευρώτα είναι **2239 km²**. Η εν λόγω ΛΑΠ εκτείνεται στην Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας. Στο βόρειο μέρος της λεκάνης υπάρχει ένα τμήμα που ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Αρκαδίας ενώ στα δυτικά η λεκάνη καταλαμβάνει μια μικρή περιοχή της Περιφερειακής Ενότητας Μεσσηνίας.



Σχήμα 3-1: Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου

3.1.2 Ποταμοί Υδατικού Διαμερίσματος (ΕΛ03)

Οι κύριοι ποταμοί του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου είναι οι **Ευρώτας**, **Ίναχος**, **Τάνος**, **Βρασιάτης**, **Μαριόρεμμα** και **Ράδος**. Ο **Ευρώτας** είναι ο μεγαλύτερος ποταμός του Υδατικού Διαμερίσματος και ο 2ος μεγαλύτερος σε όλη την Πελοπόννησο. Σημαντικοί συμβάλλοντες κλάδοι του είναι το ρέμα Καπελάς, το ρέμα Καρδάρη, ο ποταμός Οινούντας (ρέμα Κελεφίνα), ο ποταμός Κνακίων (Μαγουλίτσα), ο παραπόταμος Βασιλοπόταμος, το ρέμα Ξεριάς, το Βαθύρεμα, το ρέμα Ρασίνα και το ρέμα Λεβετσιώτικο (Σχήμα 3-2). Ο ποταμός Ευρώτας πηγάζει από το οροπέδιο της Αρκαδίας, νότια της Μαντινείας, κοντά στην Μεγαλόπολη και διερχόμενος μεταξύ των οροσειρών Ταυγέτου και

Πάρνωννα, εισέρχεται στη Λακωνία, περνά από τη Σπάρτη, και εκβάλλει στον Λακωνικό Κόλπο.

Ευρώτας

Ο Ευρώτας είναι ποταμός της Πελοποννήσου. Πηγάζει από το αρκαδικό οροπέδιο, νότια της Μαντινείας, κοντά στη Μεγαλόπολη και διερχόμενος μεταξύ των οροσειρών Ταυγέτου και Πάρνωννα εισέρχεται στη Λακωνία. Συγκεκριμένα οι πηγές του βρίσκονται στην περιοχή Λογαρά του χωριού Σκορτσινός. Κατόπιν, περνά δίπλα από τη Σπάρτη διασχίζοντας τον νομό Λακωνίας με κατεύθυνση από τον βορρά προς τον νότο, χωρίζοντάς τον στα δύο. Οι εκβολές του βρίσκονται στον μυχό του Λακωνικού Κόλπου. Από τα νερά του υδρεύονται οικισμοί και αρδεύεται ένα μεγάλο μέρος της καλλιεργήσιμης έκτασης στη Λακωνία. Το όνομά του προέρχεται από τη λέξη ευρώς, που στα αρχαία ελληνικά σημαίνει μούχλα. Στα αρχαία χρόνια, πάντως, ονομαζόταν Ίρις. Το μήκος του είναι περίπου **118.97 km** και η έκταση της λεκάνης του ποταμού **Ευρώτα** είναι **1668.63 km²**. Ο μέσος ετήσιος όγκος υετού ανέρχεται σε **1.444 x 10⁶ m³** το δε μέσο συνολικό ετήσιο δυναμικό των υδάτων του ποταμού εκτιμάται σε **360 x 10⁶ m³**. Ο Ευρώτας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την ιστορία της αρχαίας Σπάρτης, η οποία και είχε χτιστεί σε ύψωμα κοντά στη δεξιά όχθη του. Τη δεκαετία του '90 έγιναν έργα διάνοιξης της κοίτης του κοντά στις εκβολές του και οι όχθες του ενισχύθηκαν και ανυψώθηκαν. Κατά το παρελθόν έχει καταγραφεί κίνδυνος υπερχειλίσης του ποταμού τον χειμώνα. Το 1999 μεγάλες καλλιεργούμενες εκτάσεις της κοιλάδας του Ευρώτα πλημμύρισαν, όπως και αρκετά χωριά στην ίδια περιοχή.

Βασιλοπόταμος

Ο Βασιλοπόταμος είναι ένας μεγάλος παραπόταμος του Ευρώτα που πηγάζει από τις δυτικές πλαγιές του Πάρνωννα. Διανύει μια απόσταση 82 χιλιομέτρων με κατεύθυνση νότια φτάνοντας στην πεδιάδα του Έλους, όπου και ενώνεται με τον ποταμό Ευρώτα. Στο μεγαλύτερο μήκος του είναι ξερός, αλλά λίγα χιλιόμετρα πριν τον Ευρώτα, νότια του χωριού Μυρτιά πηγάζουν πολλά νερά που κατακλύζουν την κοίτη του. Τα νερά του βυθίζονται σε καταβόθρες, ρέουν υπογείως κάτω από τον Ευρώτα, πλησίον του οικισμού Βλαχιώτη και εμφανίζονται κοντά στη Σκάλα, όπου εντοπίζονται οι φανερές πηγές του. Είναι ο μοναδικός Λακωνικός ποταμός με σταθερή ποσότητα υδάτων.

Οινούντας - Κελεφίνα

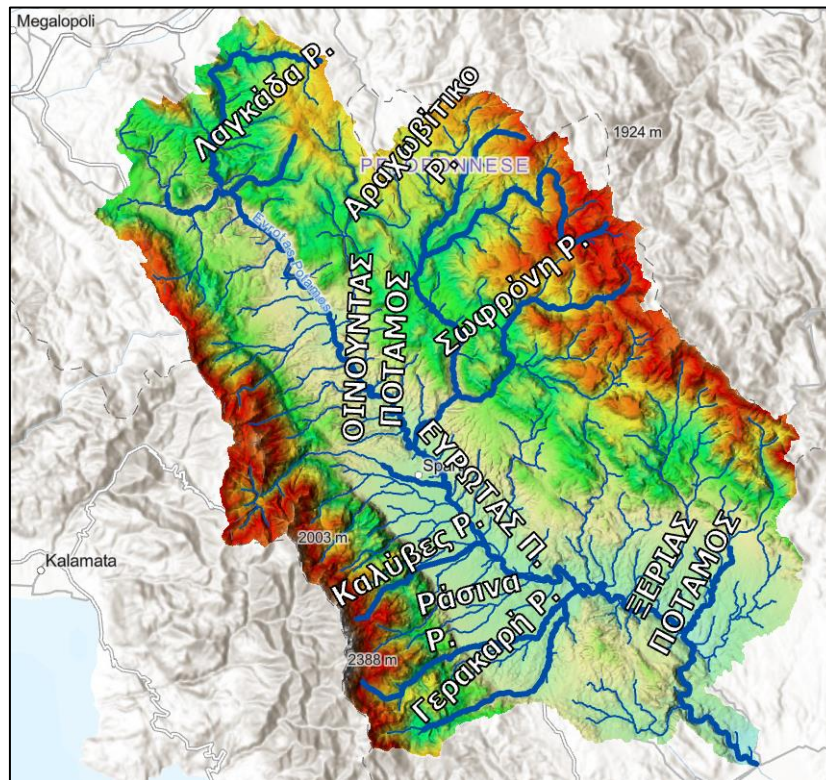
Ο Οινούντας ή Κελεφίνα είναι γνωστός από την αρχαιότητα ποταμός και αποτελεί τον κυριότερο παραπόταμο του Ευρώτα και σ' αυτόν συγκλίνοντας εκβάλλουν διάφορα ρέματα πού, ξεκινώντας από τις νοτιοδυτικές πλαγιές του Πάρνωνα, δέχονται τα όμβρια ύδατα. Ο ποταμός έχει μήκος πάνω από σαράντα χιλιόμετρα, διασχίζει όλο τον πρώην Δήμο Οινούντος και χύνεται στον Ευρώτα μεταξύ των χωρίων Κλαδά και Κοκκινόρραχης. Η λεκάνη απορροής του αποτελεί μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του Ευρώτα. Παλιότερα είχε ροή καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου ενώ σήμερα, λόγω της παροχέτευσης των υδάτων για άρδευση, το κατώτερο κυρίως τμήμα του ξεραίνεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ο Οινούντας αποτελείται από μικρότερα ρέματα όπως το Κακόρεμα, το ρέμα Σωφρώνης και το ρέμα Δόξνια.

Κνακίων - Μαγουλίτσα

Ο ποταμός Κνακίων (γνωστός και ως Μαγουλίτσα) είναι ένας μικρός σε μήκος παραπόταμος του Ευρώτα, αλλά με σημαντική παροχή υδάτων. Εντοπίζεται βορειοδυτικά της Σπάρτης, από τη μεριά του Ταυγέτου και τροφοδοτείται από ένα σύμπλεγμα πηγών με κυριότερες αυτές της Τρύπης. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το κατώτερο τμήμα του ξεραίνεται εξαιτίας της παροχέτευσης των υδάτων για άρδευση και ύδρευση της Σπάρτης. Ο Κνακίων ενώνεται με τον Ευρώτα, ακριβώς νότια του οικισμού της Σπάρτης.

Ξεριάς - Χάραδρος

Ο Χάραδρος (κοινώς Ξεριάς) του Άργους είναι ένας εποχικός χείμαρρος που κατεβαίνει από το Αρτεμίσιον Όρος (περιοχή Κτενιά και Μαλεβού), προς τους βόρειους πρόποδες της Λυκώνης και περιζώνει το Κάστρο του Άργους. Η διεύθυνση ροής του είναι ανατολικά προς το κέντρο του αργολικού κάμπου όπου κατευθύνεται νότια και στη θέση "Διπόταμα" συναντάει τον Ίναχο (Γάνιτσα) που κατεβαίνει από τα βόρεια. Παρά τις διάφορες μετατοπίσεις της κοίτης του, παρέχει προστασία ως βορειοανατολικό φυσικό όριο της πόλης του Άργους καθώς ταυτόχρονα αποτελεί υδάτινη απειλή όταν πλημμυρίζει.



Σχήμα 3-2: Ανάγλυφο και οι κύριοι παραπόταμοι του ποταμού Ευρώτα

3.1.3 Κωμόπολη Σκάλας-Νομός Λακωνίας

Η Σκάλα είναι κωμόπολη του Νομού Λακωνίας και έδρα του καλλικρατικού Δήμου Ευρώτα. Ο οικισμός βρίσκεται 38 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά της Σπάρτης και έχει πληθυσμό 2902 κατοίκων σύμφωνα με την απογραφή του 2021. Το όνομα της κοινότητας προέρχεται από την αποβάθρα του Βασιλοπόταμου που υπήρχε στη συγκεκριμένη θέση, όταν ο ποταμός χτίστηκε για να γίνει πλωτός και να εξυπηρετεί τη διακίνηση εμπορευμάτων κατά τη διάρκεια της Ενετικής περιόδου.

Η Σκάλα αναφέρεται ήδη το 1700 στην ενετική απογραφή, όπου και καταγράφονται 61 οικογένειες με 219 κατοίκους συνολικά. Κατά την Ενετική περίοδο η Σκάλα ήταν μέρος της αυτόνομης επαρχίας της πεδιάδας του Έλους. Ύστερα από την επιστροφή των Οθωμανών το 1715 η σημασία της Σκάλας υποβαθμίστηκε αφού αποκόπηκε από τα δίκτυα μεταφορών λόγω της παραμέλησης των ενετικών έργων στον Βασιλοπόταμο. Τον κάμπο της Σκάλας τον διασχίζουν δύο ποτάμια, ο Βασιλοπόταμος και ο Ευρώτας, τα οποία συντελούν στο να είναι μια από τις πιο εύφορες περιοχές της Λακωνίας. Οι κάτοικοι

ασχολούνται κυρίως με τη γεωργία, με σημαντικότερες καλλιέργειες τα πορτοκάλια Βαλέντσια και τη μελισσοκομία.

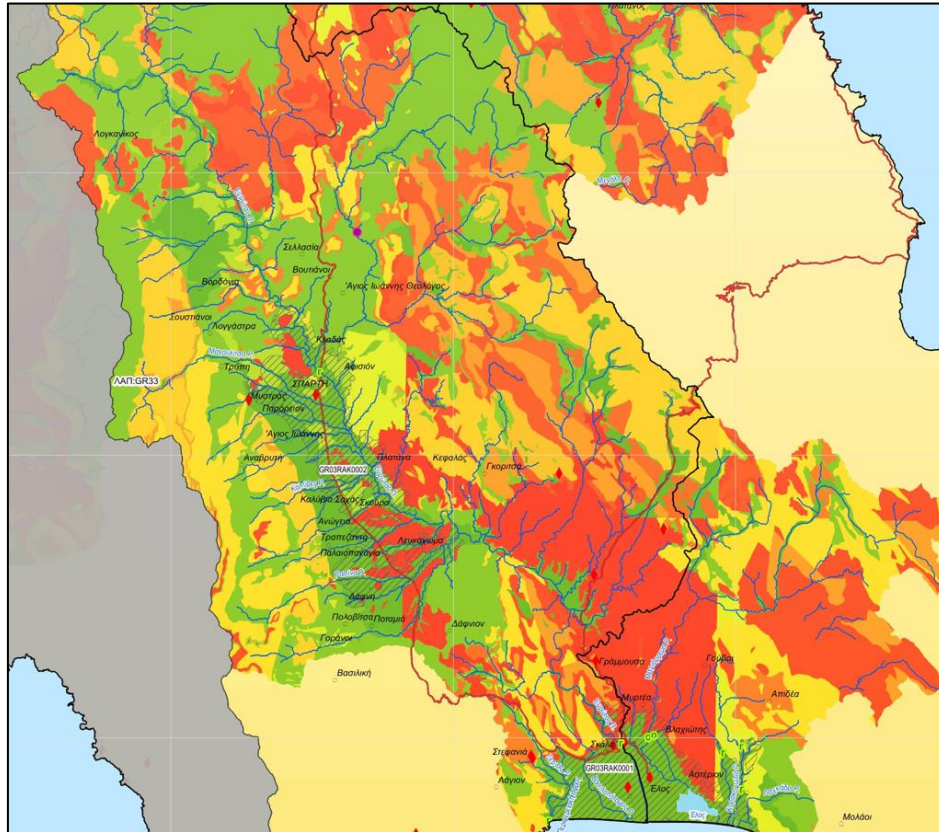
3.1.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Ευρώτα

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα διακρίνονται οι εξής γεωτεκτονικές ενότητες (Σχήμα 3-3):

- Ζώνη Άρνας ή φυλλιτική - χαλαζιτική σειρά
- Ιόνια Ζώνη ή Ενότητα Μάνης
- Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης
- Ζώνη Πίνδου
- Μεταλπικοί σχηματισμοί

Στο βόρειο και νοτιοανατολικό τμήμα του Ταυγέτου εμφανίζονται όλα τα στρώματα της ζώνης Γαβρόβου –Τρίπολης εκτός από τον «άγριο φλύσχη». Στα σημεία που υπέρκεινται της Ενότητας Άρνας πάνω από την τεκτονική επαφή παρατηρείται είτε το ανθρακικό τμήμα της ζώνης Τρίπολης είτε τα στρώματα Τυρού. Στην περιοχή εμφανίζεται ένα τμήμα της ζώνης Πίνδου που αποτελεί τμήμα του Αρκαδικού καλύμματος. Ο κατώτερος στρωματογραφικός ορίζοντας αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών, πηλιτών και Ραδιολαριτών με ενδιάμεσες στρώσεις λατυποπαγών ασβεστολίθων. Ακολουθούν οι «πλακώδεις ασβεστόλιθοι», οι οποίοι είναι και οι πιο διαδεδομένοι στην κεντρική και νότια Πελοπόννησο.

Στη λεκάνη απορροής οι μεταλπικοί σχηματισμοί εμφανίζονται σε μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο το βύθισμα της Πελλάνας, της Σπάρτης και των Αιγίων. Πάνω από όλους τους σχηματισμούς βρίσκονται οι νεογενείς σχηματισμοί χερσαίου τύπου, που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση λόγω της μεταφορικής ικανότητας του Ευρώτα αλλά και των παραποτάμων του. Οι νεογενείς σχηματισμοί χωρίζονται σε αποθέσεις πλημμυρών, αλλουβιακά ριπίδια, κώνοι κορημάτων και λιμναίες αποθέσεις. Οι λιμναίοι σχηματισμοί στο νότιο τμήμα της λεκάνης δίνουν τη θέση τους στους παράκτιους και θαλάσσιους σχηματισμούς, οι οποίοι αποτελούνται από ασβεστοψαμμιτικούς και αμιγείς αργίλους, τέφρες μάργες και αραιές στρώσεις οργανογενών ψαμμιτικών ασβεστολίθων πλειοκαινικής ηλικίας (Karalemas et al 2006, Nikolaidis et al 2009).



Γεωλογικοί Σχηματισμοί

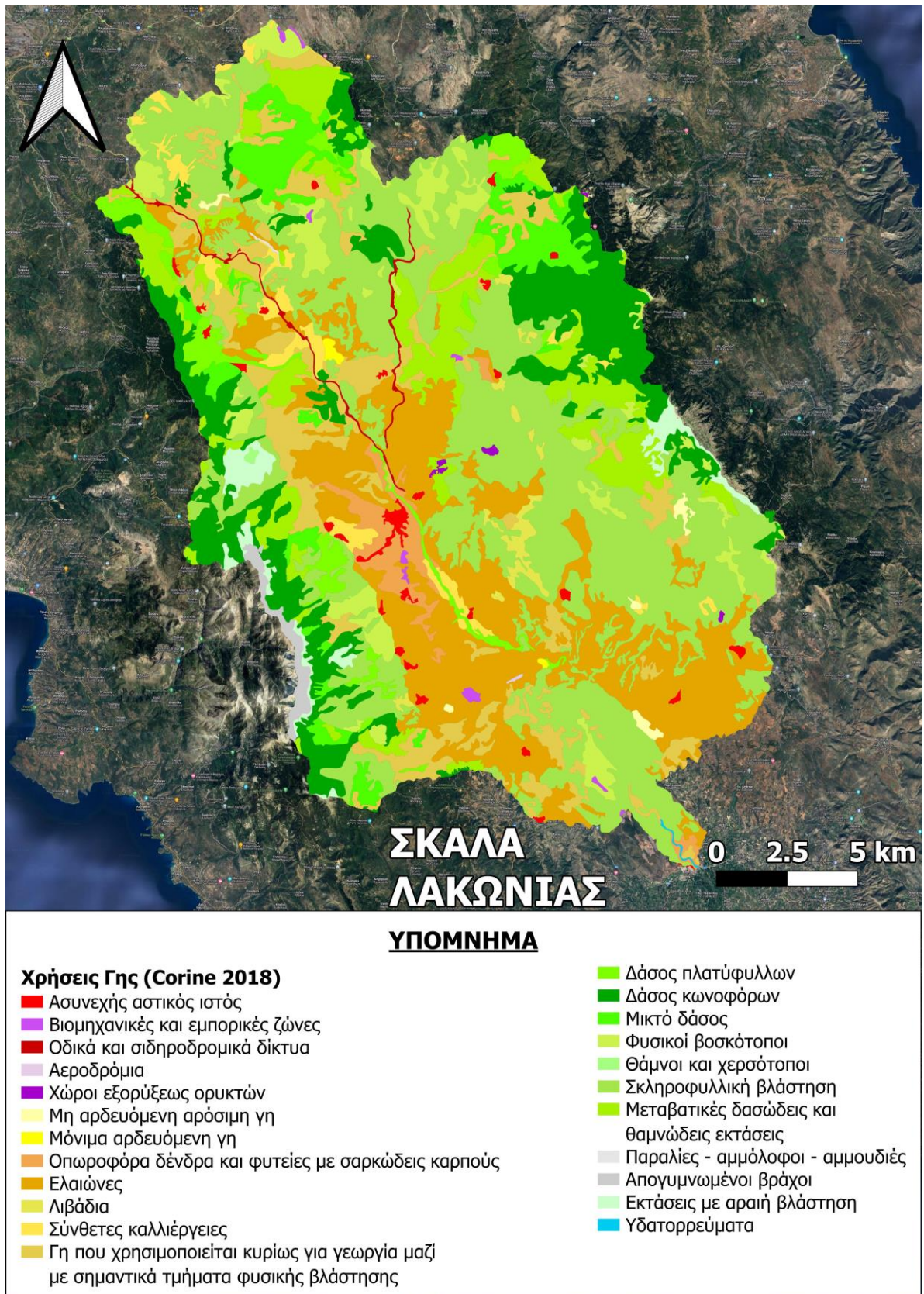
■ Χαλαροί αδρομερείς σχηματισμοί (Qc)	■ Γύψος (g)
■ Χαλαρές λεπτομερείς αποθέσεις (H.al)	■ Ασβεστόλιθοι πλακώδεις με ενστρώσεις από πυριτόλιθους ή γύψο ή ανυδρίτη (Tm)
■ Χαλαρές αποθέσεις μεικτών φάσεων (Pt-fl)	■ Ασβεστόλιθοι με ενστρώσεις κερατόλιθων ή πυριτόλιθων (Ks)
■ Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά (C-P)	■ Ασβεστόλιθοι με εναλλαγές από μάργες ή πυριτόλιθους (Pc-E)
■ Φλύσχης και κλαστικές σειρές (F)	■ Ασβεστόλιθοι δολομιτικοί και βαθύτερα στρώματα Τύρου και Παντοκράτορα (Pm)
■ Σχιστοκερατόλιθοι, οφιόλιθοι, τόφφοι, εκχύσεις (O-Sh)	■ Αργιλικό σχιστόλιθο ή κλαστική σειρά τριαδικού ή εκχύσεις ή τόφφοι (Js)
■ Συνεκτικοί σχηματισμοί μεικτών φάσεων (Pl-Pt)	■ Αργιλικό σχιστόλιθο ή κερατόλιθο ή ιλυόλιθο με στρώσεις ασβεστόλιθων (Ks-fl)
■ Συνεκτικοί σχηματισμοί αδρομερείς, Τεταρτογενούς (Pt-c)	■ Αργιλικό σχιστόλιθο ή κλαστική σειρά τριαδικού ή εκχύσεις ή τόφφοι (Ts)
■ Συνεκτικοί αδρομερείς σχηματισμοί (H-Q)	■ Αμιγείς ασβεστόλιθοι Τριαδικού (TR)
■ Μεταμορφωμένα και τόφφοι (P.Sch)	■ Αμιγείς ασβεστόλιθοι Κρητιδικού (K)
■ Λεπτομερή ιζήματα, συνεκτικά (PL-m,c)	■ Αμιγείς ασβεστόλιθοι Ιουραστικού (J)
■ Εκχύσεις ή αργιλώδεις μάργες (Vol-Pc)	■ Αδρομερή ιζήματα, συνεκτικά και εκχύσεις (Pt-M)

Σχήμα 3-3: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής

(Πηγή: floods.ypeka.gr)

3.1.5 Χρήσεις και Κάλυψη Γης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, αναλυτικά οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού. Οι πληροφορίες αντλήθηκαν από το Layer, **Corine 2018**, διαμέσου του ιστότοπου Copernicus. Στο Σχήμα 3-4 προβάλλονται οι κωδικοί όλων των κατηγοριών χρήσεων γης που εντοπίστηκαν.

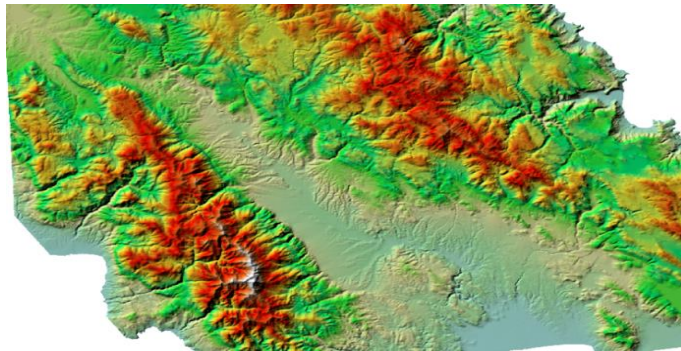


Σχήμα 3-4: Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Ευρώτα ποταμού

3.2 Εισαγωγή και επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM)

Ολόκληρη η διαδικασία της γεωμορφολογικής ανάλυσης υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS και πιο συγκεκριμένα στις πλατφόρμες ArcMap, ArcGis Pro και QGIS. Ως δεδομένο χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου, γνωστό και ως DEM (Digital Elevation Model). Το DEM ουσιαστικά απεικονίζει την τοπογραφική επιφάνεια του εδάφους της γης εξαιρουμένων των δέντρων, των κτιρίων και οποιωνδήποτε άλλων επιφανειακών αντικειμένων σε ψηφιακή μορφή. Εκτενέστερα τα DEM δημιουργούνται από ποικίλες πηγές και κυρίως διαμέσου της ψηφιοποίησης τοπογραφικών χαρτών. Άλλες πηγές είναι οι τοπογραφικές μετρήσεις, τα ραντάρ, οι δορυφόροι, τα δεδομένα ανίχνευσης κατεύθυνσης φωτός και ενέργειας, διαμέσου αεροσκαφών με χρήση αισθητήρων και ακτινών Laser γνωστά και ως Lidar, διαμέσου της φωτογραμμετρίας κλπ.

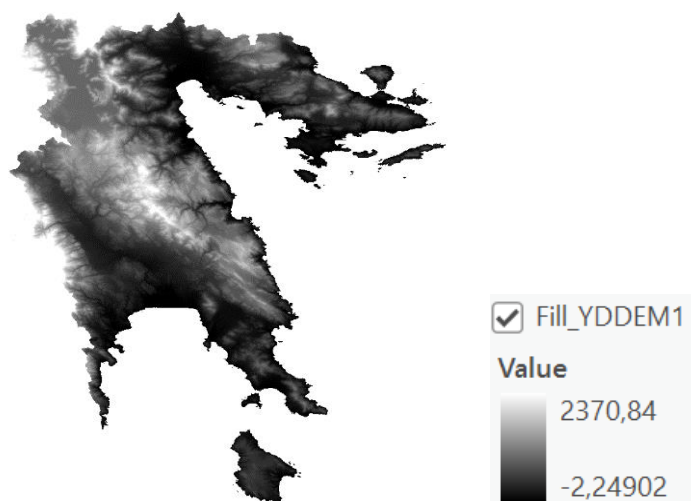
Κατά την εισαγωγή του DEM (Σχήμα 3-5) στο περιβάλλον του GIS είναι απολύτως απαραίτητο και σημαντικό να ρυθμιστεί ορθά το προβολικό σύστημα που απεικονίζεται το αρχείο DEM προς αποφυγή προβλημάτων ανομοιογένειας και ασυνέχειας του εδαφικού υποβάθρου. Οφείλουμε να πραγματοποιήσουμε σωστή γεωαναφορά του DEM στα αρχικά στάδια της διαδικασίας μιας και δεν θα είχε νόημα να προβάλλουμε οποιοδήποτε τμήμα της γεωμορφολογικής μας ανάλυσης με μειωμένη ακρίβεια, ασάφειες θυσιάζοντας την ποιότητα προβολής. Στην δική μας μελέτη έγινε μετατροπή του αρχείου DEM από το προβολικό σύστημα **ETRS89 ETRS LAEA** στο **GGRS 87/Greek Grid (EPSG:2100)** μιας και η πηγή λήψης του αρχείου μας, το site <https://www.copernicus.eu/en>, μας το παρείχε στο αρχικό προβολικό σύστημα που αναφέρθηκε. Επιπλέον αναφέρουμε ότι οι διαστάσεις των κελιών από τα οποία απαρτίζεται είναι 25mx25m.



Σχήμα 3-5: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα

Fill DEM

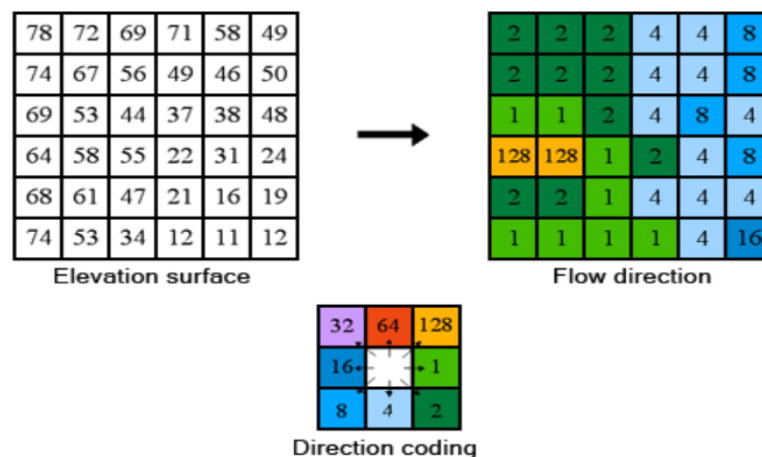
Η πρώτη λειτουργία που θα εφαρμόσουμε μετά την εισαγωγή του αρχικού μας DEM (Σχήμα 3-6) της περιοχής στο ArcMap είναι η **Fill Dem**. Τα κατά τόπους βυθίσματα (και οι κορυφές) είναι συχνά σφάλματα που οφείλονται στην ανάλυση των δεδομένων ή στη στρογγυλοποίηση των υψομέτρων στην πλησιέστερη ακέραια τιμή. Τα βυθίσματα αυτά του DEM πρέπει να πληρώνονται έτσι ώστε να διασφαλίζεται η σωστή οριοθέτηση των λεκανών και των ρεμάτων. Εάν δεν γίνει αυτό, το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μας μπορεί να εμπεριέχει αρκετές ασυνέχειες, κάτι που θα προκαλέσει έντονες στρεβλώσεις στην δομή αυτού που θα παρεκκλίνουν της πραγματικότητας. Το εργαλείο **Fill Dem** εκτελείται επαναλαμβανόμενα έως ότου γεμίσουν όλα τα βυθίσματα εντός ενός προκαθορισμένου ορίου κατεύθυνσης Z. Καθώς πληρώνονται τα βυθίσματα του DEM, είναι πιθανό να δημιουργηθούν νέα στα όρια των περιοχών, τα οποία αφαιρούνται κατά την επόμενη επανάληψη της εντολής.



Σχήμα 3-6: Αρχική μορφή αρχείου DEM

Flow Direction

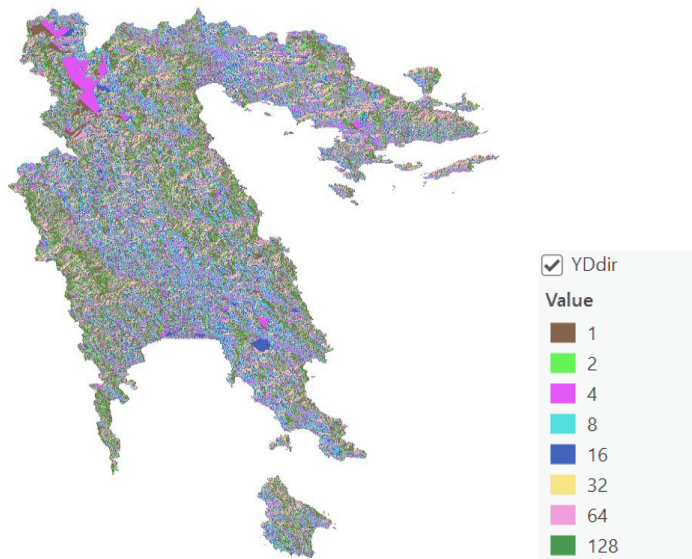
Ένα από τα σημεία κλειδιά που συμβάλουν στην απόρροια των υδρολογικών χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας είναι η ικανότητα προσδιορισμού της κατεύθυνσης ροής των υδάτων από κάθε κελί που περιέχει το αρχείο Raster. Αυτό γίνεται στο περιβάλλον του ArcGis Pro χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Flow Direction**. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιεί ένα αρχείο επιφανείας ως είσοδο, δημιουργώντας ένα αρχείο Raster που δείχνει την κατεύθυνση ροής έξω από κάθε μπλόκ. Ο χώρος διακριτοποιείται σε 8 κατευθύνσεις εξόδου (Σχήμα 3-7) που σχετίζονται με τα οκτώ παρακείμενα κελιά τα οποία θα μπορούσε πιθανά να διασχίσει η ροή (Jenson and Domingue et al. 1988). Υπολογίζει την κλίση μεταξύ των κελιών και τείνει να κινηθεί προς τα εκεί όπου λαμβάνει της μεγαλύτερες τιμές. Στην εικόνα που ακολουθεί στο **Direction Coding** παρατηρούμε την κατεύθυνση κίνησης του ύδατος σχετικά με την τιμή που έχει το κελί. Αν η τιμή αυτού είναι 4 θα κινηθεί νότια, αν είναι 16 δυτικά κλπ.



Σχήμα 3-7: Κωδικοποίηση της κατεύθυνσης ροής

(Πηγή: William Bajjali et al. 2023)

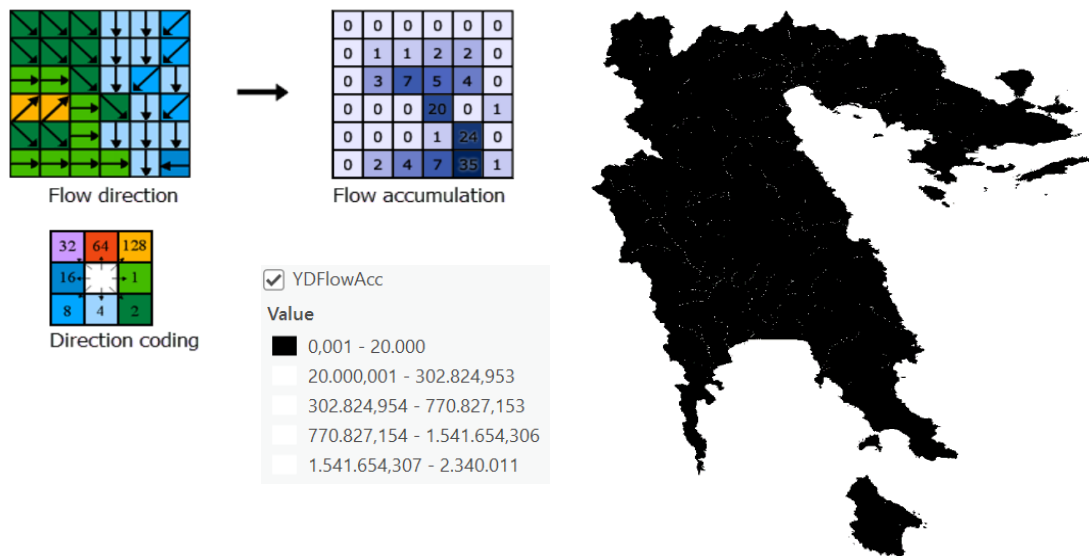
Στο Σχήμα 3-8 που ακολουθεί απεικονίζεται για την δική μας υδρολογική λεκάνη το αντίστοιχο αρχείο Flow Direction που εξήγαγε το λογισμικό με τις αντίστοιχες τιμές των κελιών που αναφέραμε.



Σχήμα 3-8: Flow Direction Layer στο γραφικό περιβάλλον του ArcGis Pro

Flow Accumulation

Το εργαλείο **Flow Accumulation** υπολογίζει τη συσσωρευμένη ροή ως προς το βάρος του κάθε κελιού που ρέει προς τα κατώτερα κελιά σε ένα αρχείο Raster. Εάν το αρχείο δεν περιέχει τιμές βαρών τότε οι τιμές που θα πάρουν τα κελιά, είναι ο αριθμός αυτών που θα ρέουν αθροιστικά σε κάθε κατάντη κελί. Στο παρακάτω γράφημα, η επάνω αριστερή εικόνα δείχνει την κατεύθυνση διαδρομής από κάθε κελί και επάνω δεξιά τον αριθμό των κελιών που ρέουν προς κάθε επιμέρους κελί. Αυτά με τις μεγαλύτερες τιμές είναι περιοχές συγκεντρωμένης ροής και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση των καναλιών απορροής του υδρογραφικού δικτύου. Τα κελιά με τιμές 0 αφορούν υψηλά τοπογραφικά σημεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση των κορυφογραμμών μιας λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα της εντολής **Flow Accumulation** μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός δικτύου ροής εφαρμόζοντας μια τιμή κατωφλίου προς επιλογή των κελιών με την υψηλότερη συσσωρευμένη ροή (Σχήμα 3-9).



Σχήμα 3-9: Καθορισμός συσσωρευμένης ροής μέσω του εργαλείου Flow Accumulation

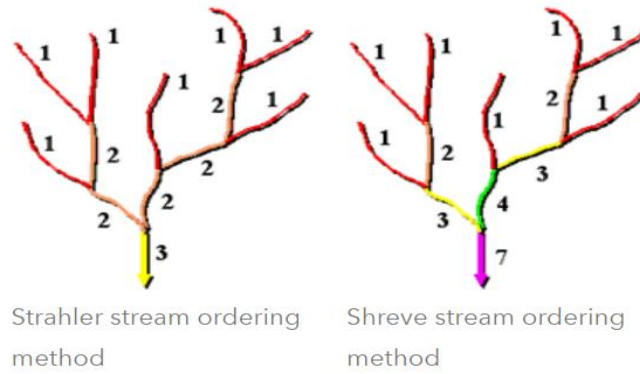
(Πηγή: William Bajjali et al. 2023)

Stream Definition

Με την εντολή **Stream Definition** καθορίζεται από το χρήστη ο αριθμός των κελιών, κάνοντας χρήση του αρχείου **Flow Accumulation** από το προηγούμενο βήμα, που θα συμμετάσχουν στον καθορισμό του κατωφλίου του υδρογραφικού δικτύου. Όλα τα κελιά του στρώματος με τιμή μεγαλύτερη από αυτή του κατωφλίου θα αποτελέσουν τμήμα αυτού. Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι μια μικρή τιμή θα μας αποδώσει ένα λεπτομερές υδρογραφικό δίκτυο, με πολλά μικρότερα υδατορέματα να απεικονίζονται, σε αντίθεση με μια μεγαλύτερη τιμή. Εφόσον η υδρολογική λεκάνη απορροής του Ευρώτα εμπεριέχει πολλά κύρια και μικρότερα υδατορέματα θα επιλέξουμε μια σχετικά μικρή τιμή κατωφλίου της τάξης των 20.000 κελιών.

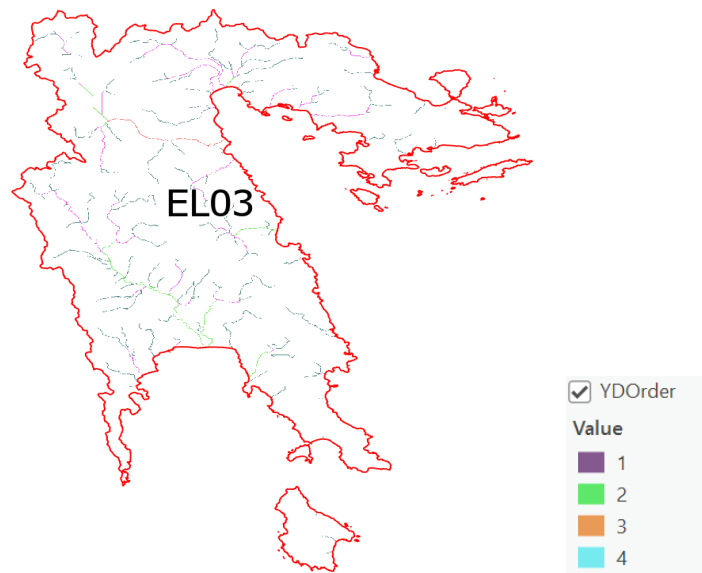
Stream Order

Η εντολή **Stream Order** αποτελεί μια μέθοδο καταχώρησης αριθμητικής σειράς των συνδέσμων ενός υδρογραφικού δικτύου. Ουσιαστικά πραγματοποιείται αναγνώριση και ταξινόμηση των τύπων των ρεμάτων με βάση τον αριθμό των παραποτάμων τους. Η **Stream Order** εκτελείται διαμέσου δύο μεθόδων. Αυτές του Strahler (1957) και του Shreve (1966) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Και στις δύο μεθόδους, τα ανάντη τμήματα ροής καταχωρούνται πάντα με την τιμή 1.



Σχήμα 3-10: Μέθοδοι ταξινόμησης υδατορεμάτων κατά Strahler και Shreve (Πηγή: William Bajjali et al. 2023)

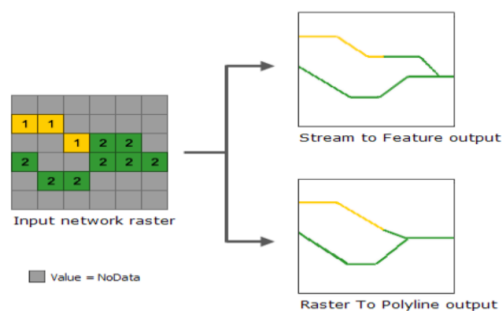
Αναφέρουμε ότι και στις δύο μεθόδους καταχωρείται η τιμή 1 για όλους τους παραπόταμους ανάντη ενώ η κύρια διαφορά εντοπίζεται στα σημεία τομής αυτών. Κατά την μέθοδο Strahler όταν διασταυρώνονται δύο υδατορέματα η τιμή της σειράς ροής αυξάνεται πάντα κατά μια μονάδα (Σχήμα 3-11), ενώ στην μέθοδο Shreve η τιμή αυξάνεται διαδοχικά προσθετικά με βάση το άθροισμα των προηγούμενων διασταυρώσεων που έχουν προηγηθεί της διαδικασίας. Στην εν λόγω μελέτη εφαρμόστηκε η μέθοδος Strahler και τα αποτελέσματα της φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 3-11: Ταξινόμηση υδατορεμάτων κατά Strahler

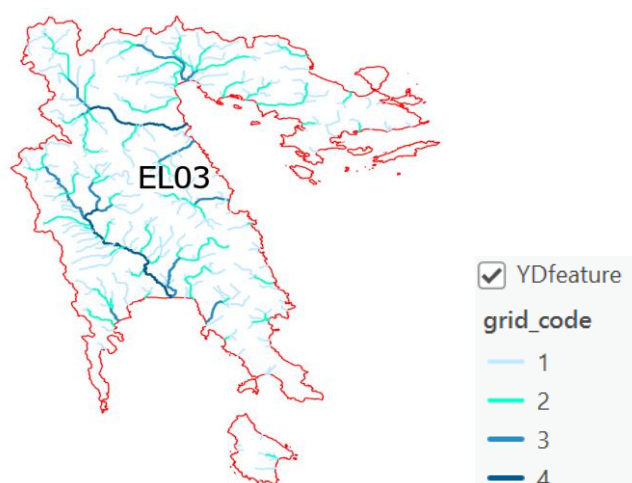
Stream to Feature

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το εργαλείο **Stream to Feature** έχει σχεδιαστεί κυρίως για την διανυσματοποίηση του δικτύου ροής ή οποιουδήποτε άλλου Raster για το οποίο είναι γνωστή η κατεύθυνση. Το εργαλείο είναι βελτιστοποιημένο για να χρησιμοποιεί ένα Raster κατεύθυνσης (**Flow Direction**) με στόχο τη διανυσματοποίηση τεμνόμενων και παρακείμενων κελιών (Σχήμα 3-13). Είναι δυνατόν δύο γειτονικά γραμμικά χαρακτηριστικά της ίδιας τιμής να διανυσματοποιηθούν ως δύο παράλληλες γραμμές. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το εργαλείο **Raster To Polyline**, το οποίο είναι γενικά πιο επιθετικό όταν ενώνει γραμμές μαζί. Για να γίνει κατανοητή η διαφορά, εμφανίζεται ένα δίκτυο ροής εισόδου σε σύγκριση με την προσομοιωμένη έξοδο ροής στο Σχήμα 3-12 που ακολουθεί.



Σχήμα 3-12: Σύγκριση διανυσματικών μεθόδων Raster υδρογραφικού δικτύου

(Πηγή: William Bajjali et al. 2023)



Σχήμα 3-13: Κύρια και δευτερεύοντα υδατορέματα Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου

Snap pour point

Το εργαλείο **Snap Pour Point** χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την επιλογή σημείων υψηλής ροής κατά την διαδικασία οριοθέτησης υδρολογικών λεκανών χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Watershed**. Το **Snap Pour Point** πραγματοποιεί αναζήτηση εντός μιας μικρής, ορισμένης από τον χρήστη, απόστασης γύρω από τα καθορισμένα σημεία απορροής για τον εντοπισμό των κελιών υψηλότερης συσσωρευμένης ροής μετακινώντας τα σημεία σε αυτές τις θέσεις. Στο Σχήμα 3-14 που ακολουθεί απεικονίζονται τα 4 σημεία που επιλέχθηκαν από τον χρήστη για τον διαχωρισμό της κύριας λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού σε τέσσερις υπολεκάνες. Το πρώτο σημείο έχει παρθεί ακριβώς στο σημείο που βρίσκεται η γέφυρα στην περιοχή της Σκάλας Λακωνίας όπου ουσιαστικά αποτελεί και το σημείο προσομοίωσης της πλημμύρας σχεδιασμού. Το δεύτερο σημείο βρίσκεται ανατολικά του αερολιμένα Σπάρτης ακριβώς μετά την συμβολή του ρέματος Ρασίνα στον ποταμό Ευρώτα και τα τρίτο και τέταρτο εντοπίζονται ακριβώς στην συμβολή του ποταμού Οινούντα στον Ευρώτα ανατολικά του χωριού Κοκκινόραχη, βορειοανατολικά της πόλης της Σπάρτης.

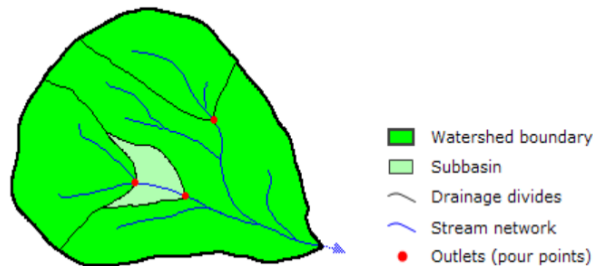


Σχήμα 3-14: Σημεία διαχωρισμού υπολεκάνων λεκάνης απορροής Ευρώτα

Watershed

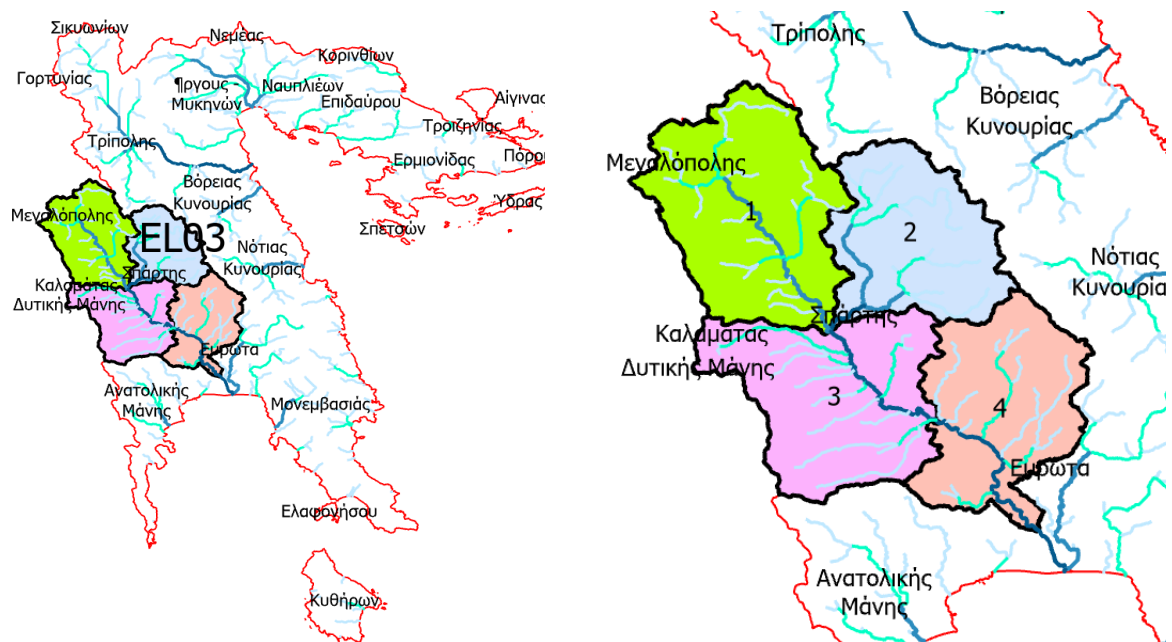
Η έξοδος σε μια υδρολογική λεκάνη απορροής είναι ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια στο οποίο το νερό απορρέει από μια περιοχή και αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο κατά μήκος των ορίων της (Σχήμα 3-15). Παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο χώρισε η

εντολή **Watershed** στο περιβάλλον συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας την λεκάνη του ποταμού Ευρώτα σε επιμέρους υπολεκάνες (Σχήμα 3-16). Η 1^η υπολεκάνη οριοθετείται βόρεια της Βλαχοκερασιάς, ακολουθεί την οροσειρά του Ταυγέτου ανατολικά της Νέδουσας και δυτικά φτάνει μέχρι και τον οικισμό Κοκκινορράχη. Η 2^η υπολεκάνη στο δυτικό της τμήμα περιλαμβάνει τον οικισμό Κοκκινορράχη, βόρεια περικλείει τον οικισμό Καρυές και εκτείνεται νότια ως τον οικισμό Αγριάνοι στους πρόποδες του Πάρνωνα. Η 3^η υπολεκάνη εκτείνεται βόρεια από την πόλη της Σπάρτης ακολουθεί την οροσειρά του Ταυγέτου και νότια έως τον οικισμό Δαφνί. Η 4^η υπολεκάνη οριοθετείται βόρεια λίγο πιο πάνω από τον οικισμό Καλλιθέα, συμπεριλαμβάνει τον οικισμό Δαφνί στα δυτικά και καταλήγει νότια στην κωμόπολη της Σκάλας.



Σχήμα 3-15: Χαρακτηριστικά εντολής Watershed

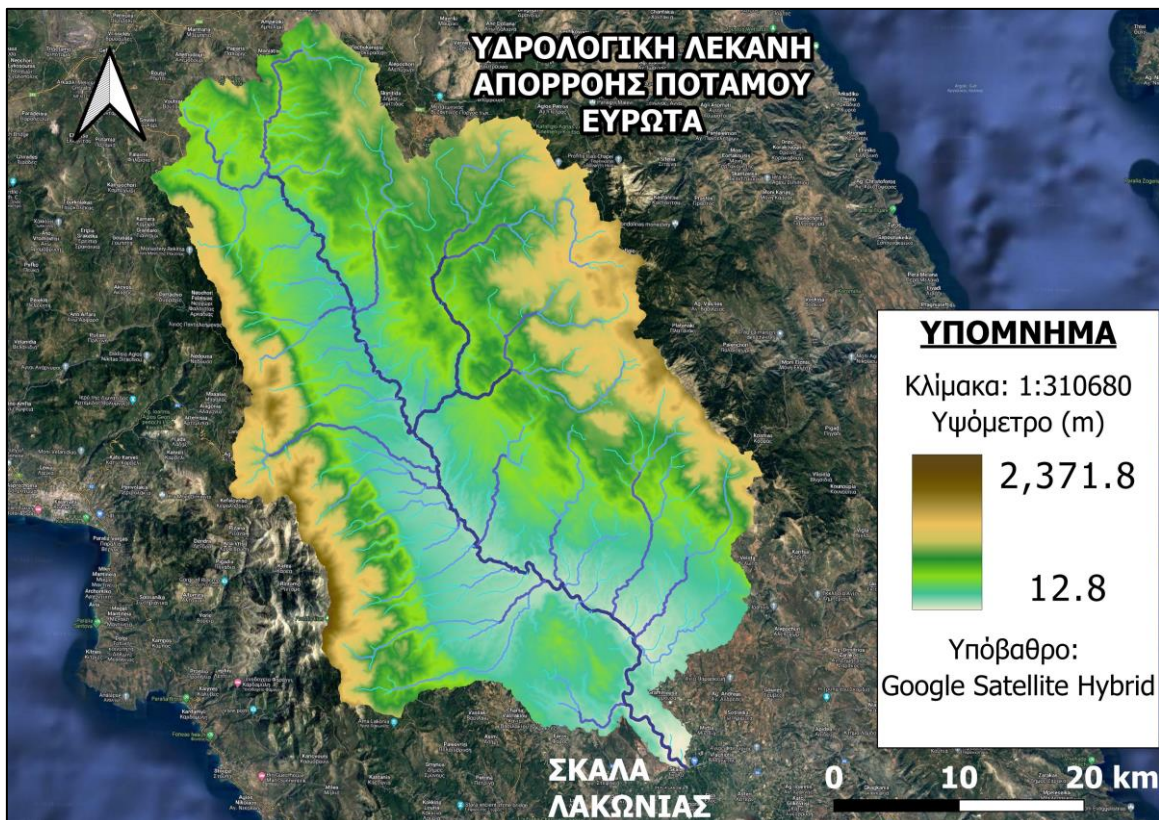
(Πηγή: William Bajjali et al. 2023)



Σχήμα 3-16: Οριοθέτηση κύριας λεκάνης απορροής και υπολεκανών Ευρώτα ποταμού

3.3 Γεωμορφολογία ΛΑΠ Ευρώτα

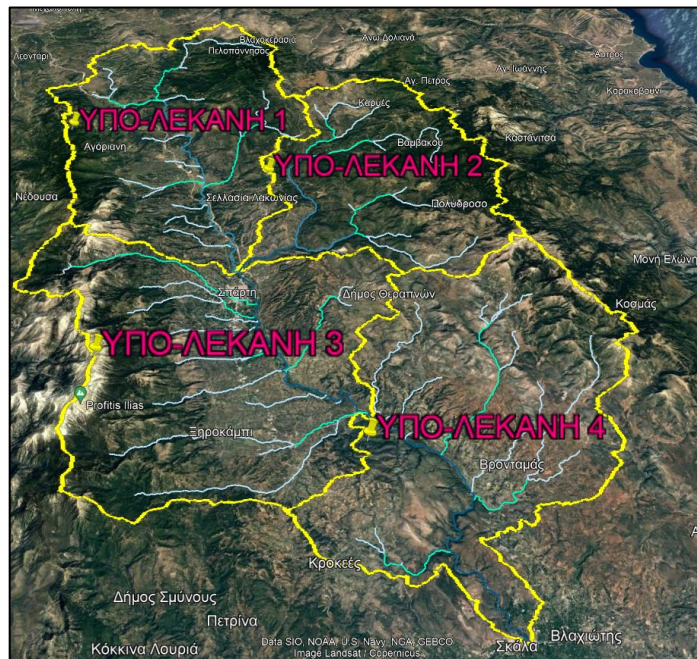
Η γεωμορφολογική ανάλυση δύναται να υλοποιηθεί επιλέγοντας μεταξύ τριών διαφορετικών μεθόδων χωρικής διακριτοποίησης της λεκάνης απορροής. Την **Ενιαία** - Lumped, την **Ημι-κατανεμημένη** - Semi Distributed και την **Πλήρως Κατανεμημένη** - Fully Distributed. Εμείς θα εφαρμόσουμε την **Ημι-κατανεμημένη** χωρίζοντας την λεκάνη απορροής του Ευρώτα ποταμού σε τέσσερις επιμέρους υπολεκάνες (Σχήμα 3-18) αναλύοντας τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της καθεμιάς ξεχωριστά. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών απαιτούνται προς υπολογισμό των παραμέτρων των μοντέλων βροχής - απορροής για κάθε υπολεκάνη, του χρόνου συγκέντρωσης όπως και των παραμέτρων του μοντέλου διόδευσης δεδομένου ότι το κάθε παραχθέν πλημμυρογράφημα θα διοδευτεί προς την κατάντη περιοχή.



Σχήμα 3-17: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης απορροής Ευρώτα ποταμού

Απαραίτητη γνώση για την εφαρμογή διαφορετικών μοντέλων βροχής - απορροής και για την παραγωγή Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων αποτελεί ο υπολογισμός βασικών τοπογραφικών χαρακτηριστικών κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά. Αυτά καθορίστηκαν

με ακρίβεια δια μέσου του λογισμικού ArcGIS PRO και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί.



Σχήμα 3-18: Ημι-κατανεμημένη γεωμορφολογική ανάλυση λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα

(Υπόβαθρο: Google Earth Pro)

Πίνακας 3-1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά υπολεκανών απορροής

		ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
L (Km)	<i>Μήκος κύριου υδατορεύματος</i>	58,79	47,36	42,44	47,37
LCA (Km)	<i>Απόσταση κύριου υδατορεύματος από το κέντρο βάρους της λεκάνης</i>	24,28	40,23	15,39	19,55
P (Km)	<i>Περίμετρος</i>	118,01	104,9	117,55	119,53
A (Km²)	<i>Έκταση</i>	489,79	348,84	445,86	388,77
Hmax (m)	<i>Μέγιστο τοπογραφικό υψόμετρο</i>	1.839,13	1.818,56	2.264,98	1.820,73
H (m)	<i>Μέσο τοπογραφικό υψόμετρο</i>	654,71	939,5	609,68	457,54
Hmin (m)	<i>Υψόμετρο σημείου εξόδου υπολεκάνης</i>	195,51	195,51	106,81	12,82

		ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
S (°)	Μέση κλίση	12,58	13,94	13,55	10,42

3.4 Θέση προσομοίωσης

Ως αρχικό στάδιο της γεωμορφολογικής ανάλυσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα αποτελεί ο καθορισμός της περιοχής μελέτης με έντονο πλημμυρικό και ιστορικό ενδιαφέρον και κατά συνέπεια άμεση ανάγκη για αντιπλημμυρική θωράκιση. Ένα τέτοιο σημείο βρίσκεται στην περιοχή της Σκάλας Λακωνίας (Σχήμα 3-19), όπως προαναφέρθηκε, και πιο συγκεκριμένα στη παλιά γέφυρα που συνδέει την μια πλευρά της Λακωνίας με την άλλη, πάνω από τον ποταμό Ευρώτα, με αρχικό έτος κατασκευής το 1896. Παρόλο που προσφάτως ανακοινώθηκε η κατασκευή μιας νέας υποδομής, προς ικανοποίηση των απαιτήσεων για ασφαλείς μεταφορές, στην περιοχή τα καταγεγραμμένα ιστορικά πλημμυρικά συμβάντα αποδεικνύουν την τρωτότητα της λόγω των ορμητικών νερών του ποταμού κατά περιόδους έντονων βροχοπτώσεων.



Σχήμα 3-19: Γέφυρα Σκάλας Λακωνίας σε περίοδο αυξημένων απορροών του ποταμού Ευρώτα

(Πηγή: thetoc.gr)

Δεδομένου ότι, σκοπός της μελέτης αποτελεί η διερεύνηση του πλημμυρικού πεδίου (βάθους ροής και έκταση πλημμύρας), η ακριβής θέση προσομοίωσης αυτού θα επιλεγεί αρκετά μέτρα ανάντη της υπό εξέταση περιοχής, έτσι ώστε να μπορέσει να υλοποιηθεί η διόδευση του υπολογισμένου πλημμυρογραφήματος με υδραυλικές μεθόδους για τον αναλυτικό υπολογισμό των μεγεθών της υπό μελέτης πλημμύρας. Στο Σχήμα 3-20 που ακολουθεί απεικονίζονται με σαφήνεια η τοποθεσία της γέφυρας στη Σκάλα Λακωνίας, η έκταση της εφαρμογής του υπολογισμένου πλημμυρογραφήματος διαμέσου υδρολογικού μοντέλου (HEC-HMS) και η περιοχή της διόδευσης της πλημμύρας διαμέσου εφαρμογής υδραυλικού μοντέλου (HEC-RAS).



Σχήμα 3-20: Θέση προσομοίωσης πλημμύρας
(Υπόβαθρο: Google Earth Pro)

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εισαγωγή – Γενικό Πλαίσιο

Η κεντρική δομή της μελέτης παρουσιάζεται επιγραμματικά στα διαγράμματα ροής του συγκεκριμένου κεφαλαίου, πραγματοποιώντας μια αναφορά επί της ουσίας στον βασικό κορμό θεμάτων και τεχνικών που αναλύθηκαν και εφαρμόστηκαν κατά την εκπόνηση της (Σχήμα 4-1). Παρέχεται η δυνατότητα στον αναγνώστη να αποκτήσει μια αρχική σφαιρική οπτική της εργασίας κατανοώντας τον τρόπο που υλοποιείται μια μελέτη αντιπλημμυρικής προστασίας στις περιοχές ενδιαφέροντος.



Σχήμα 4-1: Θεματικές ενότητες μελέτης αντιπλημμυρικής προστασίας

Διευκρινίζεται ότι η συγκεκριμένη δομή αφορά τον τρόπο προσέγγισης του θέματος από τον γραφών, σε θεωρητικό – ακαδημαϊκό επίπεδο, καθώς δεν αποτελεί πανάκεια προς αντιμετώπιση τέτοιων φυσικών φαινομένων δεδομένης της πολυπλοκότητας που τα διακατέχουν. Επομένως, ο συγγραφέας δεν φέρει καμία ευθύνη σε περίπτωση πιθανής αστοχίας των αναγραφόμενων τεχνικών κατά την εφαρμογή τους, δεδομένου ότι ένα πλημμυρικό γεγονός στην πράξη διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από ένα άλλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φυσικά μεγέθη που ορίζουν, μεταβάλουν και περιγράφουν ένα τέτοιο συμβάν διαφοροποιούνται έντονα τόσο σε χωρική όσο και σε χρονική κλίμακα.

4.2 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Η βασική ιδέα της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων είναι, με αξιόπιστο και αποτελεσματικό τρόπο, να πραγματοποιηθεί η σύνθεση όλων των κριτηρίων για την λήψη μίας απόφασης. Ο σκοπός της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων δεν είναι αποκλειστικά η σύνθεση των δεδομένων ενός προβλήματος, αλλά η πραγματοποίηση της αναγκαίας σύνθεσης του προβλήματος βάσει των κανόνων που πρέπει να ακολουθήσει ο αποφασίζων, λαμβάνοντας υπόψιν πώς οι όψεις του προβλήματος είναι αντιφατικές και ανταγωνιστικές.

Ως Πολυκριτηριακή ανάλυση ορίζεται ένα σύνολο μεθόδων που βοηθούν στην σύνθεση πολλών κριτηρίων εκτίμησης, ούτως ώστε να καθίσταται δυνατή η επιλογή, κατάταξη, ταξινόμηση και περιγραφή ενός συνόλου εναλλακτικών ενεργειών. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι, ο αποφασίζων να συγκεντρώσει τα εργαλεία που θα τον βοηθήσουν στην επίλυση προβλημάτων. Ο αποφασίζων πρέπει μέσω των υποβοηθούμενων εργαλείων να εξετάσει έναν αριθμό πολλαπλών και συνάμα αντικρουόμενων κριτηρίων (Zorounidis et al. 1999).

4.2.1 Διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP)

Από τις πιο σημαντικές και ευρέως διαδεδομένες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP). Η AHP προωθεί διαδικασίες για να ορίσει τα βάρη και τις βαθμολογίες που επιτυγχάνονται, από τις εναλλακτικές που βασίζονται αντίστοιχα σε κατά ζεύγη συγκρίσεις, μεταξύ των κριτηρίων και μεταξύ των

επιλογών. Έτσι λοιπόν, για τον υπολογισμό των βαρών, θέτονται στον αποφασίζοντα ορισμένες ερωτήσεις, για την σημαντικότητα - συγκρισιμότητα των κριτηρίων μεταξύ τους (πόσο σημαντικό είναι ένα κριτήριο σε σχέση με κάποιο άλλο), που στόχο έχουν ο αποφασίζων να λάβει την βέλτιστη δυνατή απόφαση.

Η ΑΗΡ αποτελεί μέθοδο κατάτμησης του προβλήματος σε υποπροβλήματα (μέθοδος ιεραρχίας), έτσι ώστε να αξιολογηθούν και να κατανοηθούν καλύτερα. Οι λαμβανόμενες εκτιμήσεις μετατρέπονται σε αριθμητικές τιμές και επεξεργάζονται έτσι ώστε να γίνει κατάταξη κάθε εναλλακτικής σε μία αριθμητική κλίμακα. Τα στάδια τα οποία η διαδικασία υλοποιείται είναι τα εξής:

i. Κατάτμηση του προβλήματος και ιεράρχηση των στόχων, των κριτηρίων και υποκριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων

Ο κύριος στόχος της επιλογής είναι η ικανοποίηση του χρήστη τόσο σε ποιότητα όσο και σε κόστος. Κάθε υπό-στόχος, διαμορφώνεται με βάση διάφορα κριτήρια όπως, η κατανόηση, η επέκταση, η διαθεσιμότητα, η αξία και ο χρόνος άμεσα συνδεδεμένα με τις πηγές πληροφόρησης.

ii. Σύγκριση των στόχων ανά ζεύγη

Βασίζεται στην ιδέα των συγκρίσεων ανά ζεύγη των διαφόρων κριτηρίων σύμφωνα με την υποκειμενική (προσωπική, εμπειρική, βιβλιογραφική, έρευνα πεδίου, κ.τ.λ.) άποψη του ερευνητή, ως προς την σχέση σημαντικότητας που έχουν οι παράγοντες μεταξύ τους. Ανάλογα με το βαθμό σπουδαιότητας που έχει ένα κριτήριο σε σχέση με ένα άλλο λαμβάνει τιμές από 1/9 για εντελώς μη σημαντικό έως 9 για πολύ σημαντικά κριτήρια. Η τεχνική σύγκριση ζευγών συμβάλει στην ανάπτυξη των βαρών των κριτηρίων, που απαιτούνται για το μεταγενέστερο στάδιο της σύνθεσης των κριτηρίων (Saaty et al.1977).

iii. Έλεγχος συνέπειας των συγκρίσεων

Ακολουθεί ο έλεγχος συνέπειας της σύγκρισης των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν. Ο λόγος συνέπειας δε θα πρέπει να ξεπερνά το 10% ($CR \leq 0.10$)

και δίνεται από την εξής σχέση $CR = \frac{CI}{RI}$ (1) όπου:

RI: Ο τυχαίος δείκτης συνέπειας της τυχαίας παραγόμενης μήτρας συγκρίσιμων ζευγών και εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που συγκρίνονται (Πίνακας 4-1).

CI: Ο δείκτης συνέπειας που παρέχει ένα μέτρο απομάκρυνσης από τη συνέπεια και υπολογίζεται από την εξίσωση: $CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$ (2) όπου:

λ : Η ιδιοτιμή του πίνακα

n : Ο αριθμός των κριτηρίων

Πίνακας 4-1: Τιμές του δείκτη **RI** για συγκεκριμένα πλήθη κριτηρίων

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

iv. Τυποποίηση των κριτηρίων

Αφορά την διαδικασία μέσω της οποίας θα δημιουργηθούν συγκρίσιμα μεγέθη για κάθε κριτήριο έτσι ώστε να παραχθεί ο χάρτης καταλληλότητας μέσω κανονικοποίησης των τιμών κάθε κριτηρίου σε μία ενιαία κλίμακα ταξινόμησης. Χρησιμοποιούνται οι εξής εξισώσεις κανονικοποίησης οι οποίες αξιοποιούν τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές ως σημεία κλιμάκωσης:

$$Xi = \frac{(FVi - FVmin)}{(FVmax - FVmin)} * SR \quad (3)$$

$$Xi = 1 - \frac{(FVi - FVmin)}{(FVmax - FVmin)} * SR \quad (4)$$

Όπου: **FVi**: Η ακατέργαστη τιμή του κριτηρίου i ,

FVmin, FVmax: Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του κριτηρίου i ,

SR: Το τυποποιημένο φάσμα με τιμές από 0 έως 1.

Η πρώτη εξίσωση εμφανίζει την βέλτιστη τιμή της στην μέγιστη τιμή του κανονικοποιημένου εύρους, ενώ η δεύτερη στην ελάχιστη τιμή του κανονικοποιημένου εύρους.

v. Ταξινόμηση των κριτηρίων

Η ταξινόμηση των κριτηρίων πραγματοποιείται με την μέθοδο Natural Breaks (Jenks et al. 1967) διαμέσου του εργαλείου Spatial Analyst Tool του λογισμικού ArcGis (ESRI,2016). Η

μέθοδος στοχεύει στην βέλτιστη ρύθμιση των τιμών των διαφόρων κατηγοριών, ελαχιστοποιώντας την μέση απόκλιση κάθε κλάσης από τον μέσο όρο της κλάσης, μεγιστοποιώντας παράλληλα την απόκλιση κάθε κλάσης από τα μέσα των άλλων ομάδων. Ουσιαστικά επιδιώκει να μειώσει την διακύμανση εντός κλάσεων, μεγιστοποιώντας την διακύμανση μεταξύ των κλάσεων.

vi. Σύνθεση των κριτηρίων

Υλοποιείται σε περιβάλλον GIS για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$FS = \sum Wi * Xi \quad (5)$$

Όπου: FS: Η τελική τιμή για κάθε κελί,

Wi: Το βάρος κάθε κριτηρίου i,

Xi: Η τυποποιημένη τιμή του κριτηρίου i.

Προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική λύση αθροίζονται τα γινόμενα των κριτηρίων με τα αντίστοιχα βάρη.

vii. Εύρεση Βέλτιστης - Επιθυμητής Επιλογής

Ως τελικό στάδιο θα υπολογισθούν για όλες τις εναλλακτικές λύσεις οι βαθμολογίες και θα επιλεγθούν αυτές με την υψηλότερη επίδοση.

4.3 Μοντέλα βροχής – απορροής

4.3.1 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder

Αποτελεί το πιο γνωστό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα καθώς ορίζει τον χρόνο υστέρησης της λεκάνης t_L , την παροχή αιχμής Q_p καθώς και την χρονική του βάση T. Επιπρόσθετα ορίζει τις παροχές W50 και W75 που αντιστοιχούν στο 50% και στο 70% της παροχής αιχμής. Ο χρόνος υστέρησης t_L της λεκάνης περιγράφει το χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στο κέντρο μάζας της απορροϊκής βροχής και της παροχής αιχμής, συνδέεται άμεσα με το μήκος της κύριας μισγάγγειας και την απόσταση από το σημείο εξόδου του ρέματος μέχρι ένα σημείο πάνω στο κύριο υδατόρεμα που βρίσκεται πλησιέστερα στο γεωμετρικό

κέντρο της υδρολογικής λεκάνης. Η παροχή αιχμής Q_p του υδρογραφήματος συνδέεται με την έκταση της λεκάνης και τον χρόνο υστέρησης t_L .

Ο χρόνος υστέρησης μετράται σε ώρες (**h**) και υπολογίζεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$t_L = 0.75Ct(LcaL)^{0.3} \quad (6)$$

Όπου: **Ct**: αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης λαμβάνοντας τιμές από 1.80 έως 2.20,

Lca (Km): η απόσταση από την έξοδο της περιοχής μελέτης ως το πλησιέστερο σημείο κατά μήκος του υδατορεύματος στο κέντρο βάρους της λεκάνης,

L (Km): η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος.

Η παροχή αιχμής Q_p μετράται σε $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ και υπολογίζεται με βάση την εξής σχέση:

$$Q_p = C_p \frac{2.75A}{t_L} \quad (7)$$

Όπου: **Cp**: αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης λαμβάνοντας τιμές από 0.56 έως 0.69,

A (Km²): η έκταση της υδρολογικής λεκάνης,

t_L (h): ο χρόνος υστέρησης.

Η χρονική βάση του υδρογραφήματος **T** μετράται σε ημέρες (**days**) και υπολογίζεται με βάση την εξής σχέση:

$$T = 3 + 3 \left(\frac{t_L}{24} \right) \quad (8)$$

Όπου: **t_L(h)**: ο χρόνος υστέρησης.

Τα πλάτη του ΜΥΓ **W50** και **W75** μετρούνται σε ώρες (**hr**) και υπολογίζονται από τους εξής τύπους:

$$W50 = 2.14 \left(\frac{Q_p}{A} \right)^{-1.08} \quad (9)$$

$$W75 = 1.22 \left(\frac{Q_p}{A} \right)^{-1.08} \quad (10)$$

Όπου: $Q_p \left(\frac{m^3}{s} \right)$: η παροχή αιχμής,

$A \text{ (Km}^2\text{)}$: η έκταση της υδρολογικής λεκάνης.

Τα πλάτη αυτά πρέπει να λαμβάνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το 1/3 αυτών να βρίσκεται αριστερά και τα 2/3 δεξιά της τετμημένης της αιχμής (Σχήμα 4-2). Επιπρόσθετα η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης t_R μετρημένης σε ώρες (h) δύναται να υπολογιστεί από τον τύπο:

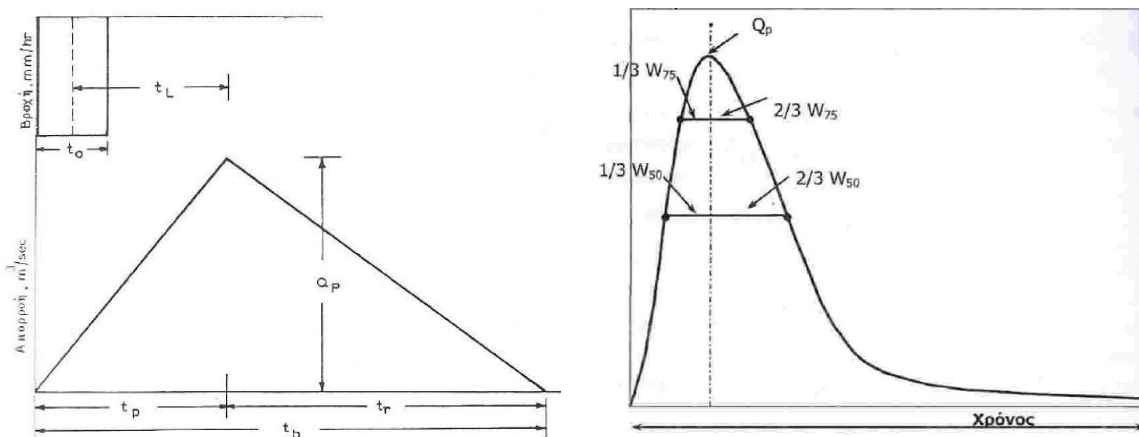
$$t_R = \frac{t_L}{5.5} \quad (11)$$

Για περιπτώσεις που ζητούμε μοναδιαία υδρογραφήματα διάρκειας μεγαλύτερης της ενεργούς βροχόπτωσης κάνουμε χρήση της σχέσης που ακολουθεί προς υπολογισμό ενός νέου προσαρμοσμένου χρόνου υστέρησης $t_{L'}$. Σημειώνουμε ότι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη του υδρογραφήματος πρέπει να αντιστοιχεί σε 1cm άμεσης απορροής.

$$t_{L'} = t_L + \frac{(t_{R'} - t_R)}{4} \quad (12)$$

Όπου: $t_{R'}$ (h): η ζητούμενη διάρκεια του μοναδιαίου υδρογραφήματος,

t_R (h): η διάρκεια της ενεργούς βροχόπτωσης.



Σχήμα 4-2: Χαρακτηριστικά μεγέθη υδρογραφήματος
(Πηγή: Mimikou et al. 2016)

4.3.2 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Soil Conservation Service (SCS)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού μοναδιαίων υδρογραφήματων που προέρχονται από επεισόδια καταγεγραμμένης βροχόπτωσης και απορροής για έναν μεγάλο αριθμό μικρών σε μέγεθος γεωργικών λεκανών απορροής σε όλες τις Η.Π.Α (SCS et al.1971). Η SCS χρησιμοποιεί ένα αδιάστατο, καμπυλόγραμμο μοναδιαίο υδρογράφημα για την διοχέτευση της περίσσειας βροχόπτωσης (άμεση απορροή) προς την έξοδο της υπολεκάνης. Εκφράζει την παροχή Q ως το λόγο της παροχής αιχμής Q_p για οποιαδήποτε χρονική στιγμή t ως κλάσμα του χρόνου αιχμής t_p . Δεδομένου της γνώσης του μεγέθους της μέγιστης παροχής (αιχμής) και του χρόνου υστέρησης t_L όλες οι τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος δύναται να εκτιμηθούν (Σχήμα 4-3). Ο όγκος απορροής στον ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος, μέχρι την παροχή αιχμής, περιλαμβάνει περίπου το 37,5% του συνολικού όγκου.

Ο χρόνος αιχμής t_p και η παροχή αιχμής Q_p υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

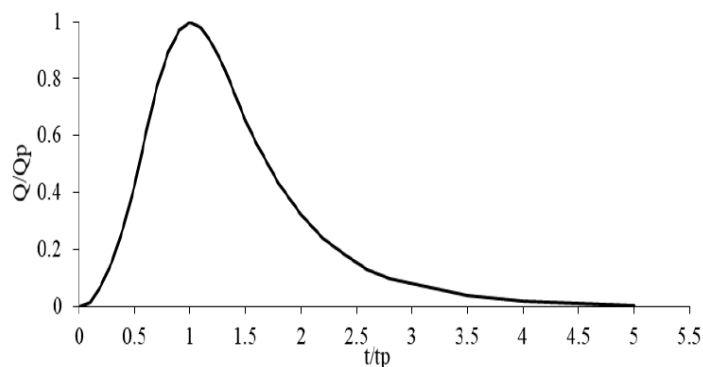
$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_L \quad (13)$$

$$Q_p = 2.08 \frac{A}{t_p} \quad (14)$$

Όπου: t_R (h): η διάρκεια της ενεργός βροχόπτωσης,

t_L (h): ο χρόνος υστέρησης,

A (Km²): η έκταση της υδρολογικής λεκάνης.



Σχήμα 4-3: Τετμημένες και Τεταγμένες αδιάστατου ΜΥΓ κατά SCS
(Πηγή: Mimikou et al. 2016)

Οι τιμές του πίνακα έχουν υπολογισθεί από τις εξής σχέσεις:

$$td = \frac{t}{tp} \quad (15)$$

$$Qd = \frac{Q}{Qp} \quad (16)$$

Όπου: td, Qd : Οι αδιάστατες τιμές του πίνακα.

Επομένως οι τιμές του ΜΥΓ υπολογίζονται από τις σχέσεις 18 και 19:

$$ti = tp * td \quad (17)$$

$$Qi = Qp * Qd \quad (18)$$

Όπου: tp, Qp : Ο χρόνος αιχμής και η παροχή αιχμής

Σε συνήθεις εφαρμογές του αδιάστατου ΜΥΓ κατά SCS, όταν δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα, ο χρόνος αιχμής t_i υπολογίζεται ως το 60% του χρόνου συγκέντρωσης t_c . Έτσι το ΜΥΓ για κάθε λεκάνη απορροής μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστός ο χρόνος. Στην Ελλάδα η εμπειρική σχέση που έχει ευρεία εφαρμογή είναι αυτή κατά Giandotti.

4.3.3 Μέθοδος Ισόχρονων Καμπυλών

Ισόχρονες καμπύλες ονομάζονται οι καμπύλες που προσδιορίζουν σημεία της λεκάνης από τα οποία το νερό της βροχής φτάνει στην έξοδο της στον ίδιο ακριβώς χρόνο. Ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να φθάσει ως την έξοδο της λεκάνης εξαρτάται από την διαδρομή που θα ακολουθήσει (απόσταση), τις κλίσεις και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας πάνω στην οποία κινείται (Vafeiadis et al 2004). Για τον υπολογισμό του χρόνου t , απαιτείται η γνώση της απόστασης L και της ταχύτητας κίνησης V του νερού.

$$L = V * t \Rightarrow t = \frac{L}{V} \quad (19)$$

Δεδομένου ότι το μέγεθος της απόστασης L μπορεί εύκολα να προσδιορισθεί διαμέσου του λογισμικού Arc-GIS PRO, με τη χρήση διαφόρων εργαλείων βάση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), υπολείπεται ο υπολογισμός της ταχύτητας κίνησης του νερού. Δεδομένου ότι γνωρίζουμε την ισοδιάσταση κάθε κελιού σε σύστημα Γεωγραφικής πληροφορίας είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον χρόνο που θα χρειαστεί η σταγόνα να διατρέξει την απόσταση στην επιφάνεια ενός κελιού. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα είναι η κλίση (τοπογραφικά χαρακτηριστικά) και η τραχύτητα του εδάφους της λεκάνης απορροής

(χρήσεις γης) (Baltas, Bournas et al. 2023). Αναλυτικότερα, ορίζονται δύο είδη ταχυτήτων προς υπολογισμό. Αυτή της χερσαίας ροής και εντός του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής.

❖ Υπολογισμός ταχύτητας χερσαίας ροής

Αρχικό βήμα για τον υπολογισμό της ταχύτητας χερσαίας ροής της περιοχής, αποτελεί ο υπολογισμός της κλίσης (%) κάθε υπολεκάνης, καθώς και της τραχύτητας του εδάφους που είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις χρήσεις γης της περιοχής.

i. Κατασκευή κανάβου κλίσεων

Για την κατασκευή ενός κανάβου εδαφικών κλίσεων της περιοχής θα χρειαστεί να εκτελέσουμε την εντολή **Slope** του μενού **Toolbox**, στο υπομενού **Hydrology**, του πακέτου **Spatial Analyst**. Η εντολή **Slope** μας επιτρέπει να προβάλουμε τις εδαφικές κλίσεις του ανάγλυφου, βάση αρχείου DEM (Digital Elevation Model), απεικονίζοντας αυτές σε ποσοστό επί της εκατό (%) ή σε μοίρες κύκλου (°). Αρχικά προβάλουμε τα αποτελέσματα της εντολής επί της εκατό (%) και στην συνέχεια εφαρμόζουμε διαμέσου της εντολής **Raster Calculator** την εξίσωση 20. Με το πρόθεμα **Float** δηλώνουμε ότι το αποτέλεσμα της διαίρεσης θέλουμε να περιέχει δεκαδικά.

$$SQRT1 = \sqrt{\frac{Slope_1}{100}} \quad (20)$$

ii. Κατασκευή κανάβου τραχύτητας

Κατά την κατασκευή του κανάβου τραχύτητας πραγματοποιείται σύνδεση των χαρακτηριστικών χρήσεως γης με τον συντελεστή **K (m/s)**, ο οποίος συνδέεται άμεσα με τον συντελεστή τραχύτητας **Manning**. Ο συντελεστής **K (m/s)** περιγράφει την ταχύτητα κίνησης του νερού επί εδάφους ανάλογα με τη χρήση γης. Από την ιστοσελίδα **Copernicus** και πιο συγκεκριμένα στο **URL: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html>**, λαμβάνουμε αναλυτική περιγραφή κάθε κωδικού χρήσεως γης ξεχωριστά. Επιπρόσθετα, διαμέσου του ίδιου ιστότοπου μας δίνεται η δυνατότητα για λήψη αρχείου σε μορφή Vector που περιλαμβάνει τους κωδικούς κάθε επιμέρους κατηγορίας με τις ανάλογες τιμές των συντελεστών τραχύτητας. Τέλος συνθέτουμε ένα νέο αρχείο Raster

όπου κάθε κελί του θα περιέχει τις τιμές που αναγράφονται στην στήλη **k*100** του Πίνακας 4-2 . Αυτό θα γίνει με την βοήθεια της εντολής **Feature to Raster** του υπομενού **To Raster** από το κύριο μενού **Conversion Tools**.

Πίνακας 4-2 : Τιμές συντελεστή K για κάθε κατηγορία χρήσεως γης

C2000_code	Description	k*100
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	115
211	Μη αρδεύσιμη - αρόσιμη γη	90
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειών	90
243	Καλλιέργειες και φυσική βλάστηση	90
311	Δάση πλατύφυλλων	25
312	Δάση κωνοφόρων	25
313	Δάση μικτά	25
321	Φυσικοί βοσκότοποι	100
322	Θάμνοι και χερσότοποι	55
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	30
324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	25
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	50
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	55
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	55

Δια μέσου του εργαλείου **Raster Calculator** του υπομενού **Map Algebra** στο **Spatial Analyst** θα συνθέσουμε το τελικό Raster της ταχύτητας χερσαίας ροής εκτελώντας την πράξη της ακόλουθης εξίσωσης:

$$V_{land1} = \frac{Corine1 * SQRT1}{100} \quad (21)$$

❖ Υπολογισμός ταχύτητας εντός υδρογραφικού δικτύου

Όπως είδαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.2 η εντολή **Stream Order** κατατάσσει το υδρογραφικό δίκτυο βάση δύο τεχνικών. Αυτές του **Strahler** και του **Shreve**. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εντός του υδρογραφικού δικτύου θα εφαρμόσουμε την κατάταξη αυτού βάση μεθόδου **Strahler** σε επίπεδο υπολεκάνης. Στην συνέχεια θα πολλαπλασιάσουμε διαμέσου του **Raster Calculator** το Layer των κλάδων κατάταξης με αυτό της ταχύτητας χερσαίας ροής έτσι ώστε να προκύψει το τελικό αρχείο Raster που θα περιλαμβάνει την ταχύτητα του υδρογραφικού δικτύου για κάθε τάξη ξεχωριστά.

❖ Υπολογισμός συνολικής ταχύτητας

Εφόσον έχουμε υπολογίσει τις ταχύτητες χερσαίας ροής και υδρογραφικού δικτύου της 1^{ης} υπολεκάνης απομένει να ενώσουμε τα δύο αρχεία Raster σχηματίζοντας ένα ενιαίο που θα απεικονίζει την συνολική ταχύτητα του νερού που απορρέει σε συνθήκες πλημμύρας. Παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες τιμές αυτών εμφανίζονται στα σημεία εντός του υδρογραφικού δικτύου, στα σημεία του τοπογραφικού ανάγλυφου με έντονες κλίσεις καθώς και σε περιοχές με χαμηλές τιμές τραχύτητας λόγω συγκεκριμένων χρήσεων γης. Η εντολή που εφαρμόστηκε για την σύνθεση των δύο αρχείων Raster σε ένα ενιαίο ονομάζεται **Mosaic to New Raster**.

❖ Υπολογισμός κανάβου βαρών ταχύτητας και συγκεντρωτικού χρόνου ροής

Αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί ένας κανάβος βαρών ταχύτητας, έτσι ώστε το αποτέλεσμα που θα προκύψει να είναι σε μονάδες χρόνου αντί για μονάδες απόστασης, καθώς βάση της εξίσωσης 19 θα έχουμε:

$$t = L * \left(\frac{1}{V}\right) \quad (22)$$

Επομένως πάμε στο **Raster Calculator** και εισάγουμε την εξής εντολή: **Float(1/Velocity)**. Επόμενο στάδιο της διαδικασίας αποτελεί ο υπολογισμός του μήκους που διανύει η κάθε σταγόνα ως την έξοδο της υπολεκάνης. Με την εισαγωγή του κανάβου βαρών του προηγούμενου βήματος το αποτέλεσμα μεταφράζεται σε χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση 22. Στο περιβάλλον του ArcGIS PRO αυτό γίνεται εκτελώντας την εντολή **Flow Length** του υπομενού **Hydrology** του κύριου μενού **Spatial Analyst**.

Τα αποτελέσματα που θα λάβουμε περιγράφουν τα δευτερόλεπτα που χρειάζεται η σταγόνα έτσι ώστε να διανύσει κάθε τμήμα της λεκάνης απορροής. Στην συνέχεια θα παρατηρήσει κανείς ότι οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται αρκετά απομακρυσμένες από το σημείο εξόδου της λεκάνης. Επιπρόσθετα πιθανά μεγάλα εμβαδά, στην μέση της λεκάνης, με μεγάλες τιμές να οφείλονται σε πολύ μικρές εδαφικές κλίσεις (DEM) καθώς προκαλούν μικρές ταχύτητες ροής. Διαιρώντας τα δευτερόλεπτα του αποτελέσματος με το 3600 βρίσκουμε αμέσως τον συγκεντρωτικό χρόνο ροής σε ώρες εκτελώντας την εξής πράξη διαμέσου του **Raster Calculator**: **Float(FlowLength1/3600)**.

❖ Δημιουργία Ισόχρονων καμπυλών

Κατά το στάδιο της δημιουργίας των Ισόχρονων Καμπυλών χρησιμοποιούμε ως δεδομένο το αρχείο Raster του προηγούμενου βήματος το οποίο περιλαμβάνει τους συγκεντρωτικούς χρόνους ροής κάθε υπολεκάνης. Αξιοποιώντας την εντολή **Reclassify** του υπομενού **Reclass** στο **Spatial Analyst** καταφέρνουμε να επιμερίσουμε την συνολική διάρκεια του χρόνου απορροής κάθε υπολεκάνης, σε επιμέρους εμβαδά τα οποία απορρέουν στα διάφορα χρονικά εύρη της συνολικής διάρκειας απορροής της λεκάνης.

Καθοριστικός παράγοντας αυτής της διαδικασίας αποτελεί ο ορισμός του μεγέθους ισοδιάστασης των ισόχρονων καμπυλών κάτι που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο κατά την σύνθεση Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας της μίας (1) ή της μισής (0,5) ώρας. Η διάρκεια του ΜΥΓ σχετίζεται απόλυτα με το μέγεθος της υδρολογικής λεκάνης, τους χρόνους απορροής αυτής και των δεδομένων βροχόπτωσης. Ως γενικότερο κανόνα έχουμε ότι σε μικρότερες λεκάνες επιλέγουμε μικρότερα διαστήματα. Στην δική μας περίπτωση της 1^{ης} υπολεκάνης θα επιλέξουμε ισοδιάσταση ίση με μισή ώρα εφόσον το μέγεθος της κρίνεται μεγάλο (**489,79 Km²**).

Στη συνέχεια από τον **Attribute Table** του Layer που προκύπτει λαμβάνουμε και εξάγουμε, σε ένα λογιστικό φύλλο του προγράμματος Microsoft Excel, των αριθμό των κελιών που απορρέουν σε κάθε χρονικό βήμα. Την 1^η ώρα όσο αφορά την 1^η υπολεκάνη απορρέουν 1853 μπλόκ, την 2^η 5095 κλπ. Η στήλη Value αναφέρεται στο χρονικό βήμα που ορίσαμε σύμφωνα με το μενού **Reclassify** (Defined Interval).

❖ Υπολογισμός τεταγμένων μοναδιαίου υδρογραφήματος

Ο υπολογισμός των τεταγμένων του ΜΥΓ πραγματοποιείται από την εξίσωση που ακολουθεί, γνωρίζοντας τον αριθμό των τμημάτων της λεκάνης που απορρέουν σε κάθε χρονικό βήμα.

$$U_i = \frac{(N_i * i * A)}{3600} \quad (23)$$

Όπου: **U_i** (m³/s): οι τεταγμένες ΜΥΓ,

N_i: ο αριθμός των μπλόκ που απορρέουν ανά Δt,

i (mm/hr): η ένταση της βροχής (10mm/hr σε ΜΥΓ 1 ώρας),

A (m²): το εμβαδό κάθε μπλόκ (για ισοδιάσταση 25x25 έχουμε $A=625$ m²).

4.3.4 Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης κατά Giandotti

Ο χρόνος συγκεντρώσεως t_c μιας λεκάνης απορροής εκφράζει την χρονική καθυστέρηση με την οποία εμφανίζεται η αιχμή της παροχής απορροής Q_p σε σχέση με τον χρόνο που άρχισε η βροχή στην λεκάνη. Ο χρόνος συγκεντρώσεως κανονικά προκύπτει από την ανάλυση ζευγών υετογραμμάτων και υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης. Όταν δεν διατίθενται κατάλληλες μετρήσεις για τον υπολογισμό του χρόνου συγκεντρώσεως t_c σε ώρες (hr) τότε χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι με μια από της πιο γνωστές να είναι η εξίσωση του Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{Hm - H_{min}}} \quad (24)$$

Όπου: A (Km²): η έκταση της υδρολογικής λεκάνης,

L (Km): το μέγιστο μήκος διαδρομής της λεκάνης,

Hm (m): το μέσο υψόμετρο της λεκάνης,

H_{min} (m): το υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης.

Επικαιροποιημένη σχέση

Η εμπειρική μέθοδος Giandotti δίνει στις περισσότερες περιπτώσεις ικανοποιητικά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ελλάδα. Επειδή όμως ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από το μέγεθος της παροχής, στην περίπτωση παροχών μεγάλων περιόδων επαναφοράς είναι σκόπιμο να υπάρχει μια μορφή διόρθωσης. Μια τέτοια διόρθωση προβλέπεται στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στο Τεύχος της Τεχνικής Έκθεσης του Παραδοτέου 4 «Πλημμυρικά Υδρογραφήματα» στο πλαίσιο της μελέτης «Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων

Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής» και ειδικότερα, στην Παράγραφο 4.2 αναγράφονται τα εξής:

«Η σχέση Giandotti, που παράχθηκε από ανάλυση μετρήσεων σε 12 λεκάνες απορροής, με εύρος μεγεθών από 170 έως 70.000 km², είναι η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση στην ελληνική πρακτική, και είναι αυτή που συστήνεται από τις προδιαγραφές των υδραυλικών έργων (ΠΔ 696/1974). Στο Ερευνητικό Πρόγραμμα Δευκαλίων (2014) θεωρήθηκε ως η πιο ρεαλιστική μέθοδος, η οποία δίνει αποδεκτές προγνώσεις της παροχής αιχμής, σε σχέση με τις άλλες που αποκλίνουν δραματικά από τις ιστορικές τιμές. Επιπλέον, μετά από εκτεταμένες αναλύσεις πλημμυρικών δεδομένων στην Κύπρο, θεωρήθηκε ως η μοναδική μέθοδος, που αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τις παρατηρημένες παροχές αιχμής, μέσω της ορθολογικής μεθόδου (Γαλιούνα, 2011)...θεωρείται ότι ο χρόνος που υπολογίζεται με την παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει την πλέον πιθανή τιμή για περίοδο επαναφοράς $T = 5$ έτη.

Για τον υπολογισμό της πλέον πιθανής, της ευμενούς και της δυσμενούς τιμής του χρόνου συγκέντρωσης, για οποιαδήποτε περίοδο επαναφοράς, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$t_c(T) = t_c * \sqrt{\frac{i(5)}{i(T)}} \quad (25)$$

Όπου: $i(5)$: ένταση βροχής (μέση) που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς $T = 5$ έτη,

$i(T)$: ένταση βροχής που αντιστοιχεί στη μέση τιμή, στο κάτω ή στο άνω όριο εμπιστοσύνης της όμβριας καμπύλης για την συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς.»

4.4 Υδρολογικές απώλειες κατά Soil Conservation Service (SCS)

Η Soil Conservation Service (SCS) έχει αναπτύξει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία, που χρησιμοποιεί τον αριθμό καμπύλης Curve Number (CN) για τον υπολογισμό της απορροής. Σε αυτήν ενσωματώνονται οι επιδράσεις της χρήσης και εκμετάλλευσης της γης. Η διαδικασία αναπτύχθηκε εμπειρικά από μελέτες σε μικρές καλλιεργήσιμες λεκάνες. Αν και η διαδικασία SCS δε σχεδιάστηκε για να υπολογίζει άμεσα τη διήθηση, στην ουσία ενσωματώνει μια εκτίμηση αυτής. Η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής, δηλαδή την ποσότητα βροχής που απορρέει επιφανειακά, σύμφωνα με τη σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & \\ \end{cases} \quad (26)$$
$$h \leq 0.2S$$
$$h > 0.2S$$

Όπου: h_e (mm) : το ενεργό ύψος βροχής,

h (mm): το συνολικό ύψος βροχής,

S (mm): η μέγιστη πιθανή κατακράτηση εδάφους που υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$S = 254 - \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (27)$$

Η διαδικασία SCS περιλαμβάνει την επιλογή μιας καταιγίδας και τον υπολογισμό της άμεσης απορροής με τη χρήση καμπυλών που δημιουργήθηκαν από μελέτες πεδίου, σχετικά με το ποσό της παρατηρημένης απορροής σε διάφορους εδαφικούς συνδυασμούς. Ο Curve Number (CN) λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 100, συνήθως 30 με 98 (Σχήμα 4-4), εξάγεται από πίνακες και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τον τύπο του εδάφους, την χρήση γης, το ποσοστό και τύπο φυτοκάλυψης και την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους (Πίνακας 4-3). Τα εδάφη κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες A, B, C και D ανάλογα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- **A.** Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής), Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.
- **B.** Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.
- **C.** Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
- **D.** Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Επιπλέον, ο Curve Number διακριτοποιείται επιπρόσθετα σε τρεις επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

- **Κατάσταση I:** Η κατάσταση κατά την οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άροση ή καλλιέργεια.
- **Κατάσταση II:** Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές λεκάνες απορροής.
- **Κατάσταση III:** Αν έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες 5 ημέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Οι τιμές των πινάκων της βιβλιογραφίας αφορούν την δεύτερη κατάσταση υγρασίας γνωστή και ως AMC-II (Antecedent Soil Moisture Condition). Εφόσον είναι γνωστή η κατάσταση II μπορούμε εύκολα διαμέσου των δύο εξισώσεων που ακολουθούν να υπολογίσουμε τις τιμές του Curve Number για τις άλλες δύο καταστάσεις εδαφικής υγρασίας.

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.058CN_{II}} \quad (28)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.013CN_{II}} \quad (29)$$

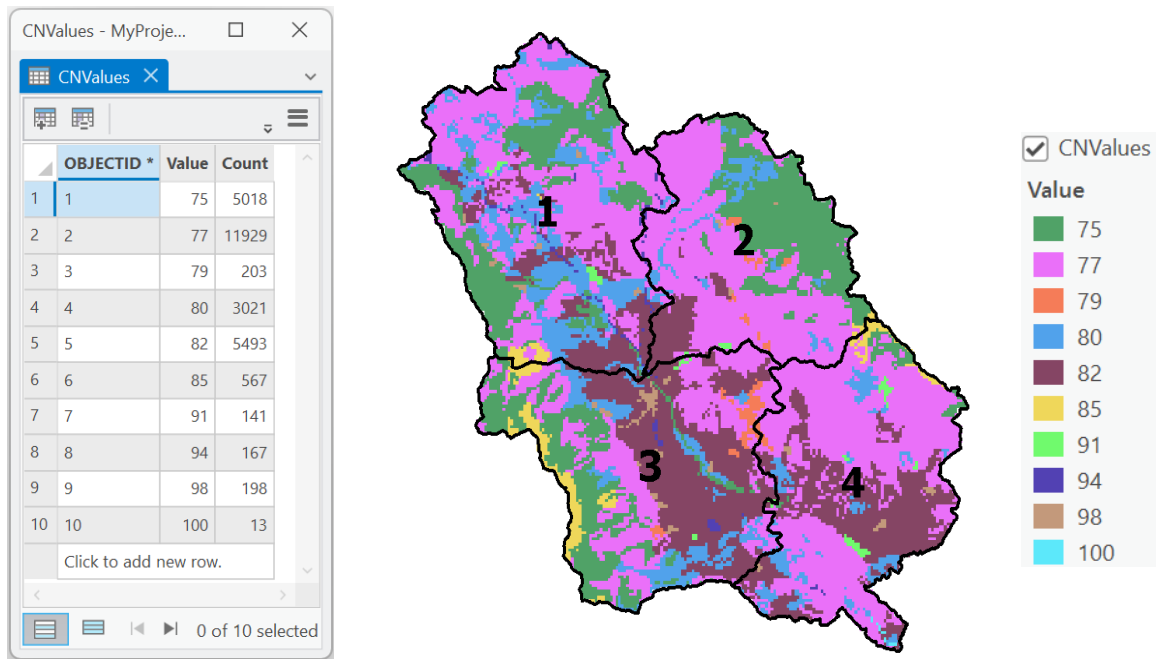
Πίνακας 4-3: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής CN (AMC-II), ανάλογα με τον υδρολογικό τύπο του εδάφους και την υφιστάμενη χρήση γης,

(Πηγή: floods.ypeka.gr)

κωδικός CORINE	Κωδικός SC	Περιγραφή	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
			A	B	C	D
111	720	Συνεχής αστική οικοδόμηση	69	80	87	90
112	770	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	66	77	83	86
121	100	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94
122	100	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	87	92	94	95
123	100	Ζώνες λιμένων	85	90	93	94
124	100	Αεροδρόμια	85	90	93	94
131	200	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	69	80	87	90
133	200	Χώροι οικοδόμησης	69	80	87	90
141	630	Περιοχές αστικού πράσινου	44	65	62	82
142	200	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	50	70	80	85
211	320	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	67	76	83	86
212	330	Μόνιμα αρδευόμενη γη	67	76	83	86
213	100	Ορυζώνες	59	72	81	85
221	310	Αμπελώνες	63	72	79	82
222	500	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	44	66	77	83
223	500	Ελαιώνες	49	59	72	82
231	400	Λιβάδια	54	70	80	85
241	500	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	67	76	83	86
242	320	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86
243	320	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	67	76	83	86
311	665	Δάσος πλατυφύλλων	35	61	74	80
312	665	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80
313	665	Μικτό δάσος	35	61	74	80
321	400	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
322	400	Θάμνοι και χερσότοποι	42	62	74	80
323	400	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	74	80
324	630	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80
331	200	Παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές	42	62	74	80
332	200	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92
333	200	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80
411	100	Βάλτοι στην ενδοχώρα	95	95	95	95
421	100	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	95	95	95	95
422	100	Αλυκές	95	95	95	95
511	100	Ροές υδάτων	100	100	100	100
512	100	Συλλογές υδάτων	100	100	100	100
521	100	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	100	100	100	100
523	100	Θάλασσα και ωκεανός	100	100	100	100

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS PRO, βάση του αρχείου Corine που αποκτήσαμε από τον ιστότοπο του Copernicus, υπολογίσαμε τις τιμές και των τριών αριθμών καταστάσεων υγρασίας (CN) δεδομένου πλήθους των κελιών κάθε κατηγορίας χρήσης γης καθώς και την

μέγιστη πιθανή κατακράτηση του εδάφους και τα αποτελέσματα προβάλλονται στους Πίνακας 4-4 και Πίνακας 4-5.



Σχήμα 4-4: Κατηγορίες απορροϊκού συντελεστή λεκάνης απορροής

Πίνακας 4-4: Αριθμός CN ανά υπολεκάνη και επίπεδο υγρασίας

	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
CNII	78,24	77,01	79,42	79,15
CNI	60,16	58,45	61,84	61,46
CNIII	89,21	88,51	89,87	89,72

Πίνακας 4-5: Μέγιστη πιθανή κατακράτησης εδάφους (S) ανά υπολεκάνη, για επίπεδο υγρασίας AMC-II

S (mm) - ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΙΘΑΝΗ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ			
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
253,72	253,70	253,74	253,74

4.5 Μέθοδος Υδρολογικής Διόδευσης

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Muskingum. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά κατά την μελέτη του ποταμού Muskingum στην πολιτεία Οχάιο των ΗΠΑ το 1938. Στην περίπτωση ενός υδατορέματος η χωρητικότητα S δεν μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση μόνο του υδρογραφήματος εκροής O , αλλά είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη και το υδρογράφημα εισροής I . Αυτό συμβαίνει διότι η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας του υδατορέματος μεταβάλλεται ανάλογα με την εξέλιξη της διόδευσης. Η εξίσωση της μεθόδου Muskingum συνδέει τον αποθηκευμένο όγκο με την εισροή και την εκροή από το υδατόρεμα.

$$S = K(x * I + (1 - x) * O) \quad (30)$$

Όπου: x : αδιάστατη σταθερά συγκεκριμένης ευθυγραμμίας τμήματος ποταμού ($x < 0,5$).

Δηλώνει την εξασθένηση του πλημμυρικού κύματος και το βάρος συμμετοχής της εισροής, ενώ η ποσότητα $(1-x)$ εκφράζει το βάρος συμμετοχής της εκροής στην αποθήκευση του τμήματος του ποταμού,

K (hr): συντελεστής χωρητικότητας, με διαστάσεις χρόνου, που υπολογίζεται από τα υδρογραφήματα εισόδου και εξόδου. Υπολογίζει το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας δια μέσου του τμήματος ποταμού.

4.6 Υετογράφημα Σχεδιασμού

Για την κατάρτιση ενός υετογραφήματος σχεδιασμού απαιτούνται δύο στοιχεία. Αρχικά το ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη διάρκεια βροχής και πιθανότητα υπέρβασης – (περίοδο επαναφοράς), και δεύτερο μία μέθοδο χρονικής κατανομής του ύψους αυτού στη συνολική διάρκεια του επεισοδίου βροχής. Το πρώτο στοιχείο υπολογίζεται μέσω εφαρμογής σχέσεων που έχουν προκύψει από στατιστική επεξεργασία δεδομένων βροχόπτωσης (όμβριες καμπύλες) ενώ το δεύτερο με εφαρμογή της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ.

4.6.1 Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών

Η εκτίμηση και η μέτρηση της βροχής για μεγάλες σε έκταση περιοχές πραγματοποιείται διαμέσου ενός δικτύου μετεωρολογικών σταθμών. Πρόκειται για επίγειες εγκαταστάσεις εντός κλωβού οι οποίες περιέχουν πληθώρα συσκευών μέτρησης και μετεωρολογικών οργάνων για την μέτρηση των διαφόρων ατμοσφαιρικών μεταβλητών όπως είναι η βροχόπτωση. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται βροχόμετρα και βροχογράφοι ως πιο ευρέως διαδεδομένα όργανα μέτρησης της σημειακής βροχόπτωσης.

Για την μελέτη και περιγραφή των ισχυρών βροχοπτώσεων, είναι απαραίτητη η επεξεργασία χρονοσειρών ετήσιων μεγίστων βροχοπτώσεων σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες (10min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h). Οι χρονοσειρές μεγίστων προκύπτουν από επεξεργασία των καταγραφών των βροχογράφων (σε συνεχή χρόνο) και των ημερήσιων παρατηρήσεων των βροχομέτρων. Τα πρωτογενή δεδομένα όλων των σταθμών και αντίστοιχων οργάνων διαμορφώνονται σε μορφή χρονοσειράς ετήσιων μεγίστων ως μέγιστες τιμές υψών βροχής ανά υδρολογικό έτος (Floods Ypeka et al. 2019).

Στην συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία και ανάλυση των τιμών σε πολλαπλές μετρήσεις ετών διαφορετικής διάρκειας και κατόπιν καταρτίζονται οι όμβριες καμπύλες για βροχομετρικούς σταθμούς όπου είναι διαθέσιμες τέτοιου είδους μετρήσεις. Γίνεται εύκολα λοιπόν αντιληπτό ότι οι όμβριες τέτοιου είδους αποτελούν σημειακές μετρήσεις και απαιτείται εφαρμογή μιας μεθόδου επιφανειακής ολοκλήρωσης, με χωρική παρεμβολή των δεδομένων, όπως η μέθοδος Thiessen που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά. Η γενική σχέση των όμβριων καμπυλών σε επίπεδο χώρας που εφαρμόστηκε στην μελέτη πάρθηκε από τον ιστότοπο της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και είναι της μορφής:

$$i(d, T) = \frac{\lambda(T^{\kappa} - \psi)}{\left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^n} \quad (31)$$

Όπου: i (mm/h): η ένταση της βροχής,

T (χρόνια): η περίοδος επαναφοράς,

d (h): η διάρκεια της βροχής,

$\lambda, \kappa, \psi, \theta, \eta$: οι 5 παράμετροι της σχέσης

Οι τιμές των 5 παραμέτρων διαφοροποιούνται για κάθε περιοχή που βρίσκονται οι βροχομετρικοί σταθμοί και στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έγινε λήψη αυτών από τον ιστότοπο του υπουργείου όπως προαναφέρθηκε.

4.6.2 Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες

Δεδομένης επίσημης ανακοίνωσης στη 22/09/2023 του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και πιο συγκεκριμένα της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων απαιτείται πλέον υπολογισμός των εντάσεων της βροχόπτωσης, για δεδομένη διάρκεια και περίοδο επαναφοράς βάση καινούριας μαθηματικής σχέσης η οποία έχει τη μορφή:

$$x = \lambda * \frac{\left(\frac{T}{\beta}\right)^{\xi} - 1}{\left(1 + \frac{\kappa}{\alpha}\right)^{\eta}} \quad (32)$$

Όπου: x (mm/h): η ένταση της βροχόπτωσης,

T (years): η περίοδο επαναφοράς,

α, ξ : ενιαίες παράμετροι που λαμβάνουν τιμή 0.18,

κ (hr): η χρονική κλίμακα αναφοράς,

λ, β, η : γεωγραφικά μεταβαλλόμενες παράμετροι.

Η νέα μορφή υπολογισμού των όμβριων καμπυλών βασίζεται στον ακριβή καθορισμό των παραμέτρων λ, β, η από τον μελετητή, κάνοντας χρήση αντίστοιχου αρχείου Vector σε περιβάλλον συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, που έχει την μορφή πλέγματος (Grided). Για κάθε κελί οι παράμετροι λαμβάνουν διαφορετικές τιμές δεδομένης της περιοχής που μελετάμε. Η τιμή της κάθε παραμέτρου θα εκτιμηθεί ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών των πολυγώνων, με βάρος ίσο με το ποσοστό της έκτασης κάθε πολυγώνου στη λεκάνη βάση της μεθόδου πολυγώνων Thiessen.

Επιπρόσθετα οι σημειακές εντάσεις βροχόπτωσης που θα προκύψουν πρέπει να αναχθούν σε επιφανειακές βάση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ που δίνεται από τον τύπο:

$$\phi = \max \left\{ 1 - \frac{0.048 * A^{0.36-0.01 \ln A}}{k^{0.35}}, 0.25 \right\} \quad (33)$$

Όπου: A (Km^2): η έκταση της λεκάνης απορροής,

k (hr): η χρονική κλίμακα.

Σημειώνουμε ότι ο συντελεστής ϕ πρέπει να εφαρμοστεί τόσο στο συνολικό ύψος βροχής που θα υπολογισθεί καθώς και σε όλα τα επιμέρους τμηματικά ύψη βροχής που υπολογίζουμε κατά την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής.

4.6.3 Άμεση επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακής βροχόπτωσης - Μέθοδος πολυγώνων Thiessen

Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen είναι μια εξαιρετικά απλή μέθοδος για την αναγωγή των μετρήσεων ενός βροχομετρικού δικτύου στον χώρο και τον υπολογισμό του μέσου ισοδύναμου ύψους κατακρημνίσεων σε μία περιοχή. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η περιοχή της μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές, τα όρια των οποίων προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους σταθμούς. Οι υποπεριοχές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό έχουν το χαρακτηριστικό ότι περιλαμβάνουν όλα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στον σταθμό που περικλείει η περιοχή αυτή, παρά σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό.

Γίνεται δεκτό ότι κάθε σημείο της περιοχής δέχεται το ίδιο ύψος βροχής με τον πλησιέστερο προς αυτό σταθμό. Ο λόγος του εμβαδού της κάθε υποπεριοχής προς το συνολικό εμβαδό της περιοχής που εξετάζουμε χρησιμοποιείται σαν συντελεστής βάρους, με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε το ύψος βροχής του αντίστοιχου σταθμού. Αθροίζοντας τα παραπάνω γινόμενα για το σύνολο των σταθμών στην περιοχή, προκύπτει το μέσο ισοδύναμο ύψος κατακρημνίσεων στην περιοχή.

Συνεπώς σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η συνολική επιφάνεια της εν λόγω περιοχής $F_{ολ}$ χωρίζεται σε γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής, κάθε μια εν των οποίων περιβάλλει μόνο ένα βροχομετρικό σταθμό. Αν F_i είναι η επιφάνεια κάθε επιμέρους ζώνη επιρροής τότε ισχύει:

$$F_{ολ} = \sum_{i=1}^k F_i \quad (34)$$

Ο συντελεστής βαρύτητας W_i κάθε ζώνης επιρροής θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή:

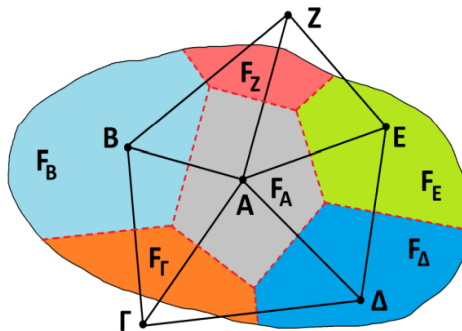
$$W_i = \frac{F_i}{F_{ολ}} \quad (35)$$

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όση απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Επί της ουσίας οι σταθμοί τοποθετούνται σε ένα τοπογραφικό διάγραμμα ή χάρτη και ενώνονται με ευθείες ώστε να σχηματιστούν τρίγωνα. Έπειτα φέρουμε μεσοκαθέτους στις πλευρές των τριγώνων αυτών και τα πολύγωνα που σχηματίζονται αντιστοιχίζονται με τους βροχομετρικούς σταθμούς (Σχήμα 4-5). Άρα το μέσο ύψος βροχής της περιοχής προκύπτει από την εξής σχέση:

$$\bar{P} = \frac{F_A}{F_{ολ}} * P_A + \frac{F_B}{F_{ολ}} * P_B + \frac{F_\Gamma}{F_{ολ}} * P_\Gamma + \frac{F_\Delta}{F_{ολ}} * P_\Delta + \frac{F_E}{F_{ολ}} * P_E + \frac{F_Z}{F_{ολ}} * P_Z \quad (36)$$

Όπου: $F_A, F_B, F_\Gamma, F_\Delta, F_E, F_Z$: τα εμβαδά κάθε πολυγώνου,

$F_{ολ}$: το άθροισμα των επιμέρους εμβαδών.



Σχήμα 4-5: Υπολογισμός βαρών πολυγώνων Thiessen

(Πηγή: Βασιλική Συγγούνα, 2022)

Η αξιοπιστία της μεθόδου είναι άμεσα εξαρτημένη από την πυκνότητα της σημειακής πληροφορίας (πυκνά δίκτυα βροχομετρικών σταθμών) και στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κρίνεται πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι αξιοποιεί βροχομετρικούς σταθμούς που βρίσκονται και έξω από την περιοχή μελέτης. Στα μειονεκτήματα αυτής συγκαταλέγονται η

εξάρτηση της ακρίβειας της από το ανάγλυφο της περιοχής μιας και σε έντονα ορεινές περιοχές με ανομοιόμορφο ανάγλυφο αυξημένων κλίσεων η μέθοδος δεν βρίσκει εφαρμογή σε πολύγωνα με εμβαδό μεγαλύτερο των **10 Km²**.

Ένα ακόμη μείζον σημασίας αρνητικό που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι το επιφανειακό ύψος βροχής που θα λάβουμε σαν αποτέλεσμα από την μέθοδο δεν λαμβάνει υπόψιν το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης αλλά το υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών. Αυτό ερμηνεύεται ως υποεκτίμηση των πραγματικών υψών βροχής και απαιτεί διόρθωση αυτών με χρήση της σχέσης που ακολουθεί:

$$\bar{P}_t = P_t + \lambda * \Delta h \quad (37)$$

Όπου: \bar{P}_t : η μέση επιφανειακή βροχόπτωση ανηγμένη στο μέσο τοπογραφικό υψόμετρο,

P_t : η μέση επιφανειακή βροχόπτωση όπως υπολογίζεται από την μέθοδο Thiessen,

Δh : η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών χρησιμοποιώντας τους συντελεστές Thiessen και το πραγματικό μέσο τοπογραφικό υψόμετρο,

λ : η βροχοβαθμίδα, που περιγράφει την μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους ανά 100m αντίστοιχης αύξησης του υψομέτρου, καθώς προκύπτει για κάθε περιοχή από τις τιμές των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών αυτής σε συνάρτηση με τα υψόμετρα που βρίσκονται οι σταθμοί.

4.6.4 Χρονική κατανομή βροχοπτώσεων – Η μέθοδος των Εναλλασσόμενων Ψών βροχής

Η εκτίμηση πλημμυρογραφήματων θεωρώντας ότι η βροχή διακατέχεται από σταθερή ένταση σε όλη την διάρκεια της θεωρείται εσφαλμένη λόγω του ότι βροχές με διάρκεια αρκετών ωρών είναι μεγάλες για να υποθεθεί αυτό. Εφόσον είναι γνωστά το ύψος της βροχόπτωσης και η διάρκεια της υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν προς υπολογισμό του σχήματος του υετογραφήματος και κατά επέκταση της χρονικής κατανομής της βροχής. Οι πιο γνωστές που χρησιμοποιούνται σε υδρολογικούς σχεδιασμούς είναι οι: SCS, Τριγωνικού Βροχογραφήματος, Εναλλασσόμενων υψών βροχής και η μέθοδος του δυσμενέστερου συνδυασμού.

Στην εν λόγω μελέτη θα εφαρμόσουμε την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternative Block Method) βάση της οποίας δομείται η κατανομή της βροχής, μέσα στην γνωστή διάρκειά της, από την σχέση έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς (Όμβρια Καμπύλη). Επιπλέον γνωρίζοντας ότι το ύψος της βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασής επί την διάρκεια της, για βροχές της ίδιας περιόδου επαναφοράς, προκύπτει η εξής σχέση:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-m} \quad (38)$$

Η σχέση αυτή υπολογίζει τα ύψη βροχής (h_1, h_2, \dots, h_n) κάθε επιμέρους διάρκειας (t_1, t_2, \dots, t_n) εντός της συνολικής διάρκειας της βροχόπτωσης. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι τα ύψη αυτά είναι αθροιστικά καθώς στην συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές των υψών κάθε χρονικού βήματος κατανέμοντας τα ως εξής: Το μεγαλύτερο ύψος τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα και το αμέσως μικρότερο στο επόμενο χρονικό διάστημα από τα δεξιά του κεντρικού καθώς το διαδέχεται το αμέσως επόμενο μικρότερο από τα αριστερά αυτού κλπ. Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί ότι ως διάρκεια της καταιγίδας σχεδιασμού επιλέγουμε δύο με τρεις φορές την διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (Giandotti) της κάθε υπολεκάνης.

4.7 Ανάλυση εφαρμογής μεθόδων Φυσικών λύσεων

Μετά την αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων Φυσικών λύσεων στο κεφάλαιο 2 επιλέξαμε τρεις από αυτές προς εφαρμογή επί της υδρολογικής λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού. Οι μέθοδοι που θα εφαρμοστούν είναι οι εξής:

1. Μέθοδος δενδροφύτευσης επί της λεκάνης απορροής ποταμού

Στο κεφάλαιο 2.2.4 αναλύθηκε η μέθοδος δενδροφύτευσης επί της λεκάνης απορροής. Αναφέρθηκε ότι αποτελεί μια αποτελεσματική φυσική μέθοδος εφόσον δύναται να τροποποιήσει χρήσεις γης της λεκάνης, μειώνοντας τον απορροϊκό συντελεστή (Curve Number). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της εδαφικής διήθησης του νερού και κατά συνέπεια των απωλειών βροχής. Επιπρόσθετα, προκαλείται αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης δεδομένου ότι η επιφανειακή απορροή απαιτεί περισσότερο χρόνο για να φτάσει στο σημείο εξόδου της λεκάνης.

Στα πλαίσια της μελέτης θα τροποποιηθούν κατηγορίες χρήσεων γης με αυξημένο συντελεστή CN. Κυρίως επιλέχθηκαν περιοχές με Βοσκοτόπια και λιβάδια γεωργικής χρήσης (231), Πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας (242) καθώς και Γη που καταλαμβάνεται συνήθως από γεωργία (243). Οι χρήσεις γης που θα τις αντικαταστήσουν είναι η 312 που περιγράφει τα Δάση Κωνοφόρων καθώς και η 313 - Μικτά Δάση, δεδομένου ότι και οι δύο χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές απορροϊκού συντελεστή

2. Μέθοδος αποκατάστασης μαιανδρισμών ποταμών

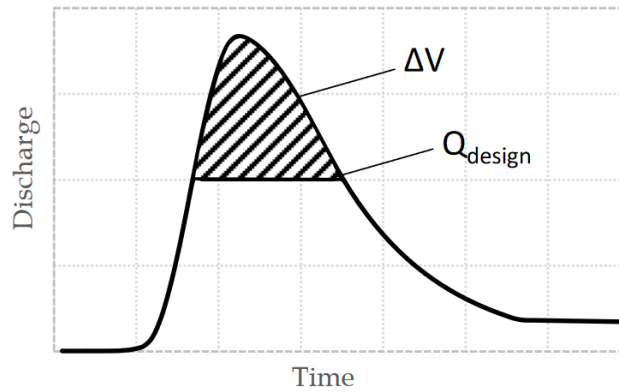
Στο κεφάλαιο 2.2.1 έγινε κατανοητό ότι η τεχνική αποκατάστασης των μαιανδρισμών προκαλεί αύξηση του μήκους του ποταμού κάτι το οποίο συμβάλει αποτελεσματικά στην αύξηση του χρόνου υστέρησης και του χρόνου συγκέντρωσης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Αυτό μεταφράζεται ως μείωση του πλημμυρικού όγκου δεδομένου ότι το μήκος του ποταμού αποτελεί ένα από τα βασικά μεγέθη υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης πάνω στον οποίο βασίζεται ολόκληρη η υδρολογική ανάλυση. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν τμήματα του ποταμού προς αποκατάσταση κατόπιν διερεύνησης ύπαρξης ή μη ιστορικής κοίτης.

3. Μέθοδος δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων

Τα τελευταία χρόνια στη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των πλημμυρικών καταστροφών με τη χρήση δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάσχεση της πλημμύρας, δεδομένου ότι ο κύριος πλημμυρικός όγκος εκτονώνεται σε αυτές (Setty, 2007, Bournas and Baltas, 2022). Η χρήση τους θεωρείται ως ένα αποτελεσματικό μέτρο για ένα μοντέρνο μοντέλο διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου. Οι λεκάνες ανάσχεσης αποτελούν μία από τις καλύτερες πρακτικές διαχείρισης πλημμύρας που αποσκοπούν στον περιορισμό της απορροής που προκαλείται από έντονες βροχοπτώσεις.

Στην εργασία αυτή η επίπτωση των δεξαμενών μεταφράζεται ως μεταβολή του πλημμυρογράφηματος σχεδιασμού όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-6. Ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνουν οι δεξαμενές αυτές, αρχικά υπολογίζεται ο πλημμυρικός όγκος που μπορεί να αποθηκευτεί ΔV και έπειτα αφαιρείται από το πλημμυρογράφημα και συγκεκριμένα η παροχή αιχμής μειώνεται σε μία τιμή «Qdesign», που είναι εμφανώς μικρότερη.

Η διαδικασία μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα, όπου ζητούμενος είναι ο απαιτούμενος όγκος προς αποθήκευση (ΔV) για δεδομένη παροχή (Bournas and Baltas, 2022). Ο περιορισμός σε αυτήν την περίπτωση είναι να βρεθεί ο απαιτούμενος όγκος ή ποιο σαφές το απαιτούμενο εμβαδό – εκτάσεις που θα λειτουργούν ως φυσικοί ταμιευτήρες.



Σχήμα 4-6: Διαμόρφωση Πλημμυρογραφήματος με χρήση λεκανών κατακράτησης.

(Πηγή Bournas and Baltas, 2022)

5. ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 Υδρολογική προσομοίωση με το λογισμικό HEC-HMS

Το HEC-HMS αναπτύχθηκε από την US Army Corps of Engineers και σχεδιάστηκε έτσι ώστε να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχόπτωσης – απορροής στις υδρολογικές λεκάνες απορροής. Βρίσκει άμεση εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος γεωγραφικών περιοχών, επιλύοντας ένα ευρύ φάσμα από προβλήματα, όπως είναι οι διοδεύσεις απορροών λεκανών μεγάλων ποταμών σε μικρές αστικές περιοχές ή μικρότερες φυσικές λεκάνες απορροής. Επιτρέπει την επιλογή διαφορετικών μοντέλων προς υπολογισμό κάθε επιμέρους συνιστώσας της υδρολογικής προσομοίωσης. Επιπλέον μπορεί να προσομοιώσει ένα μεμονωμένο υδρολογικό γεγονός αλλά και μια συνεχή προσομοίωση. Αναλυτικότερα περιλαμβάνει πληθώρα μοντέλων λεκανών απορροής, μετεωρολογικά μοντέλα, μοντέλα απωλειών, μοντέλα επιφανειακής απορροής, μοντέλα βασικής απορροής και μοντέλα υδρολογικής διόδευσης. Στην ουσία το λογισμικό αποτελεί μια υπολογιστική πλατφόρμα η οποία επιτρέπει την επιλογή διαφορετικών μοντέλων για τον υπολογισμό κάθε συνιστώσας της υδρολογικής προσομοίωσης. Θεωρείται κατάλληλο για προσομοίωση μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (eventbased) αλλά και για συνεχή προσομοίωση. Επιτρέπει την γεωμετρική περιγραφή λεκανών απορροής με τους τρεις τρόπους μοντέλων:

- Συγκεντρωτικό (lumped)
- Ημι-κατανεμημένο (Semi-Distributed)
- Κατανεμημένου (Distributed) μόνο με το μοντέλο ModClark

Το Γραφικό περιβάλλον του επιτρέπει την εύκολη εναλλαγή ανάμεσα σε διάφορα μέρη-εφαρμογές του προγράμματος και εφαρμόζεται τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες όσο και σε μικρές αστικές ή ημιαστικές. Περιέχει διαδικασίες βαθμονόμησης των παραμέτρων των μοντέλων καθώς και διαδικασίες εφαρμογής σεναρίων και συγκριτικής αξιολόγησης τους με αντιπαράθεση των τελικών αποτελεσμάτων.

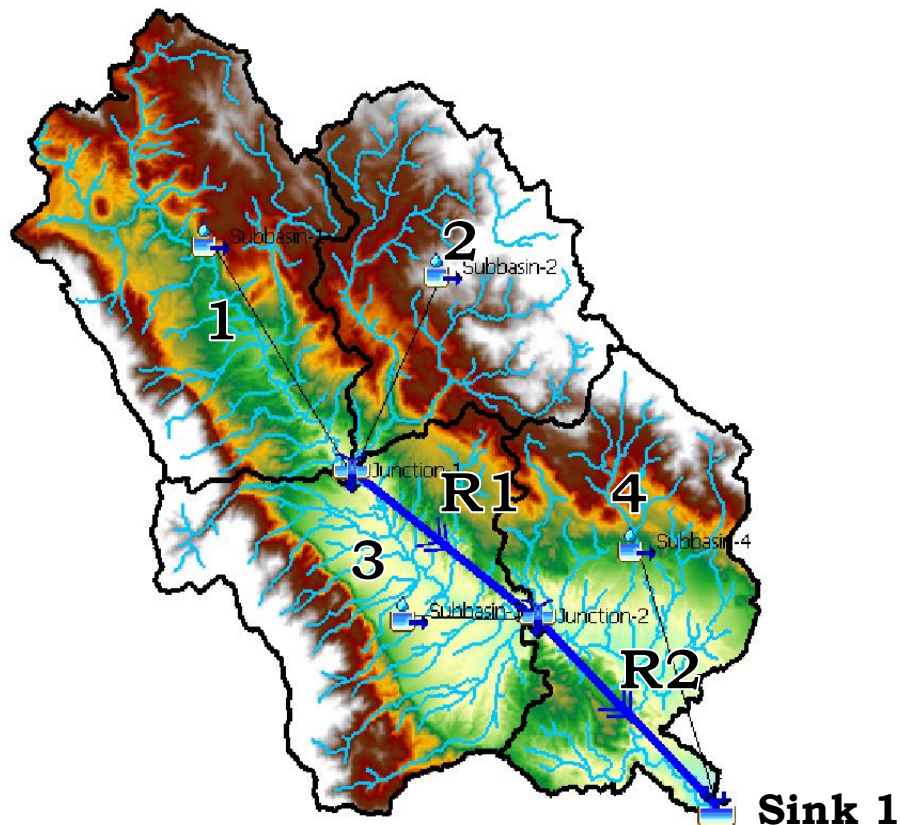
Το λογισμικό παράγει πλημμυρογραφήματα τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν απευθείας ή σε σύνδεση με άλλα λογισμικά (HEC-RAS) προς αντιμετώπιση των αστικών πλημμυρών, στην εκτίμηση της ροής ποταμών, στο σχεδιασμό υπερχειλιστών σε ταμιευτήρες, στην μείωση των επιπτώσεων μιας πλημμύρας, στην υδρολογία των υγροτόπων κλπ.

5.1.1 Δημιουργία μοντέλου λεκάνης απορροής

Προκειμένου να είμαστε να θέση να εκτελέσουμε μια υδρολογική προσομοίωση στο εργασιακό περιβάλλον του λογισμικού HEC-HMS απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο σχεδιασμός του μοντέλου της λεκάνης απορροής της προς μελέτης περιοχής. Αυτός μπορεί να γίνει βάση δύο δομών αυτή του συγκεντρωτικού μοντέλου (Lumped) και αυτή του ημικατανεμημένου (Semi-Distributed). Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, τα διαθέσιμα δεδομένα και το ίδιο το πρόβλημα προς διευθέτηση. Στο Σχήμα 5-1 όπου απεικονίζεται το μοντέλο της μελέτης, έχει γίνει χρήση του ημικατανεμημένου μοντέλου. Βάση του αρχείου DEM που έχουμε εισάγει ορίζουμε στο πρόγραμμα όλα τα υδρολογικά στοιχεία της υπό μελέτης περιοχής προς υπολογισμό των υδρολογικών συνιστωσών.

Τα υδρολογικά στοιχεία που μπορεί κανείς να ορίσει στο περιβάλλον του λογισμικού είναι τα εξής:

- Υπολεκάνη (Subbasin)
- Κλάδος ποταμού (Reach)
- Ένωση (Junction)
- Έξοδος (Sink)
- Πηγή (Source)
- Ταμιευτήρας (Reservoir)
- Διακλάδωση (Diversion)



Σχήμα 5-1: Μοντέλο λεκάνης απορροής Ευρώτα

Στην δική μας περίπτωση (Σχήμα 5-1) έχουμε ορίσει 4 υπολεκάνες της ευρύτερης λεκάνης απορροής όπου διαμέσου του υδρογραφικού δικτύου θα καταλήξουν συγκεντρωτικά στην έξοδο 1 (Sink 1). Η απορροή της 1^{ης} και 2^{ης} υπολεκάνης θα οδηγηθεί στην 1^η ένωση (Junction 1) από όπου θα διоδευτεί διαμέσου της μεθόδου Muskingum στην 2^η ένωση (Junction 2). Στην 2^η ένωση επίσης θα καταλήξει και η απορροή της 3^{ης} υπολεκάνης όπου μαζί με την απορροή της 4^{ης} υπολεκάνης πλέον θα διоδευτούν προς την έξοδο 1 (Sink 1). Στο Sink 1 θα υπολογισθεί το συνολικό πλημμυρογράφημα της ευρύτερης λεκάνης απορροής και στον Πίνακα 5-1 έχουν υπολογισθεί οι τιμές της μεθόδου Muskingum για το 1^ο και το 2^ο τμήμα διόδευσης του μοντέλου (Reach 1, Reach 2).

Πίνακας 5-1: Παράμετροι μεθόδου Muskingum

	L	L (m)	DH	J	n	R	V	X	K	K
	[km]	[m]	[m]	[%]	[-]		[m ³ /s]	[-]	[min]	[h]
R1	23.62	23.620	88.70	0.00376	0.05	0.85	1.10	0.30	357.96	5.97
R2	26.25	26.250	93.99	0.00358	0.05	0.85	1.07	0.30	407.40	6.79

5.2 Υδραυλική προσομοίωση με το λογισμικό HEC-RAS

Το λογισμικό HEC-RAS αναπτύχθηκε από την US Army Corps of Engineers όπως και το HEC-HMS. Είναι ευρέως γνωστό για την χρήση του στην υδραυλική ανάλυση των ποταμών. Μπορεί να εκτελέσει μονοδιάστατους (1D) ή δισδιάστατους (2D) υδραυλικούς ελέγχους ενώ μπορεί να προσομοιώσει συνθήκες μόνιμης ή μη μόνιμης ροής και στις δύο διαστάσεις. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή και κατά την προσομοίωση μεταφοράς φερτών υλικών και μεταφοράς ρύπων. Κάνει χρήση των εξισώσεων συνέχειας και κίνησης του Saint-Venant και στις δύο περιπτώσεις 1D και 2D ανάλυσης. Η 1D ανάλυση ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις διατομών, είναι κατάλληλη για συστήματα ανοιχτών αγωγών με καθορισμένη διατομή μεγάλων εδαφικών κλίσεων καθώς και για περιπτώσεις υφιστάμενων τεχνικών έργων στο ρου ενός ποταμού (Γέφυρες, Στενώσεις, Αναχώματα κλπ.).

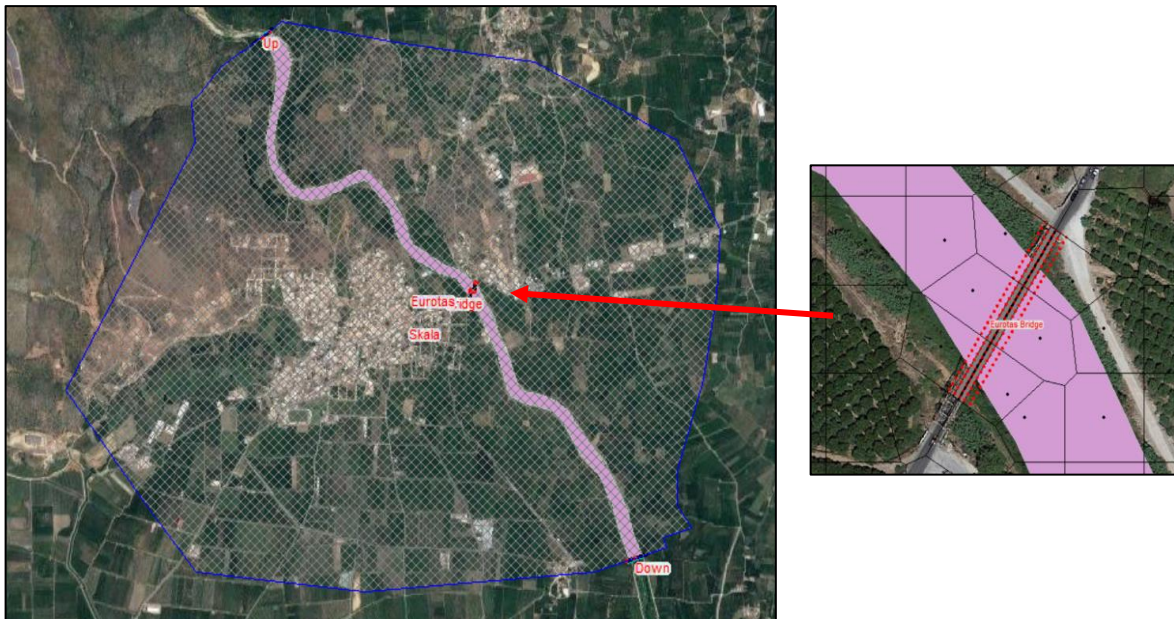
Η 2D ανάλυση χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ποιοτικά δεδομένα ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), περιοχές χαμηλών εδαφικών κλίσεων έντονου πλημμυρικού πεδίου, καθώς και γενικότερα ανάγκη ανάλυσης της ταχύτητας ροής πλησίον μεγάλων τεχνικών έργων. Η ανάλυση θραύσης τέτοιων μεγάλων κατασκευών, όπως ένα φράγμα, αποκτά έντονο ενδιαφέρον μιας και η ροή κινείται απότομα προς διάφορες κατευθύνσεις.

5.2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Προκειμένου να λάβει χώρα μια υδραυλική προσομοίωση είναι απαραίτητο να έχουμε στην διάθεση μας στοιχεία των διατομών ενός υδατορέματος ή ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) στις περιπτώσεις δισδιάστατης ανάλυσης. Η γνώση των συντελεστών τραχύτητας Manning αποτελούν το επόμενο μέγεθος που πρέπει να εισάγουμε στο λογισμικό για κάθε κατηγορία χρήσεως γης της υπό μελέτης περιοχής και να έχουμε στη διάθεση μας δεδομένα εισόδου προσομοίωσης, όπως ένα πλημμυρογράφημα, που έχει προκύψει από την υδρολογική ανάλυση.

5.2.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας περιοχής προσομοίωσης

Συμπληρωματικά, απαιτείται να ορίσουμε μια συγκεκριμένη έκταση εντός της οποίας θα εξελιχθεί η πλημμυρική προσομοίωση. Αυτό γίνεται διαμέσου της εντολής **2D Flow Area** όπου το λογισμικό δομεί ένα πλέγμα, διαστάσεων ορισμένων από εμάς, βάση του οποίου θα πραγματοποιηθεί η υδραυλική ανάλυση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2. Μας δίνεται η δυνατότητα να σχεδιάσουμε μια ξεχωριστή περιοχή εντός του πλέγματος που θα απεικονίζεται το τμήμα ποταμού ή υδατορέματος που θα διεξαχθεί η προσομοίωση. Επιπρόσθετα, απαιτείται να δηλώσουμε την τιμή του συντελεστή τραχύτητας Manning τόσο για την κοίτη όσο και για την παραρεμάτια ζώνη του ποταμού. Τέλος, ακολουθεί ο καθορισμός των οριακών συνθηκών που αποτελούν τα σημεία ελέγχου ροής βάση των οποίων θα πραγματοποιείται η εισροή και εκροή υδάτων προς την περιοχή υδραυλική ελέγχου.



Σχήμα 5-2: Γεωμετρία περιοχής υδραυλικής προσομοίωσης. Αριστερά το υπολογιστικό πλέγμα, Δεξιά λεπτομέρεια σχεδιασμού γέφυρας.

5.2.3 Εισαγωγή δεδομένων οριακών συνθηκών και χαρακτηριστικών προσομοίωσης

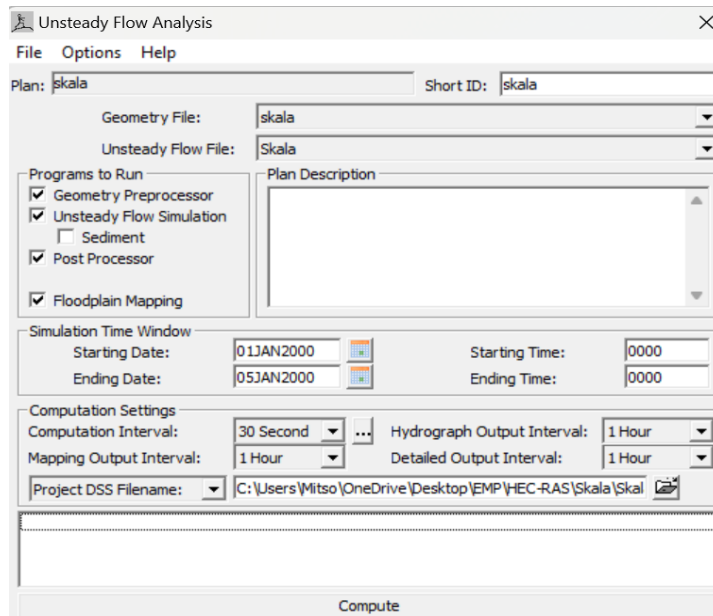
Ως δεδομένα οριακών συνθηκών ορίζουμε τα σημεία ελέγχου ροής ανάντη και κατάντη της περιοχή προσομοίωσης. Όσο αφορά την ανάντη περιοχή συνήθως από εκεί πραγματοποιείται εισροή των υδάτων μέσω ενός πλημμυρογραφήματος (Σχήμα 5-3) που έχουμε υπολογίσει στο λογισμικό HEC-HMS κατά το στάδιο της υδρολογικής ανάλυσης. Κατάντη της περιοχής μελέτης ορίζουμε το βάθος ροής και την κλίση του ποταμού καθορίζοντας ουσιαστικά αν πρόκειται για υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη περίπτωση ροής. Αναφέρουμε ότι σε μικρές εδαφικές κλίσεις το κανονικό βάθος ροής είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο ενώ σε μεγάλες κλίσεις μικρότερο από το κρίσιμο.

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m ³ /s)
25	01Jan2000 1200	12:00:00	4.3
26	01Jan2000 1230	12:30:00	12.6
27	01Jan2000 1300	13:00:00	25.6
28	01Jan2000 1330	13:30:00	42.7
29	01Jan2000 1400	14:00:00	63.1
30	01Jan2000 1430	14:30:00	86.6
31	01Jan2000 1500	15:00:00	112.7
32	01Jan2000 1530	15:30:00	141.1
33	01Jan2000 1600	16:00:00	171.8
34	01Jan2000 1630	16:30:00	204.4
35	01Jan2000 1700	17:00:00	238.7
36	01Jan2000 1730	17:30:00	274.5
37	01Jan2000 1800	18:00:00	311.1
38	01Jan2000 1830	18:30:00	347.8
39	01Jan2000 1900	19:00:00	383.9

2D: area BCLine: down	
Friction Slope:	0.015
2D Flow Area Boundary Condition Parameters	
<input checked="" type="radio"/> Compute separate water surface elevation per face along BC Line <input type="radio"/> Compute single water surface for entire BC Line	

Σχήμα 5-3: Ορισμός οριακών συνθηκών στο λογισμικό HEC-RAS

Προκειμένου να εκτελεστεί ορθά και χωρίς σφάλματα η διαδικασία πρέπει να ορίσουμε στο λογισμικό την ακριβή διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 5-4). Κρίνεται απολύτως απαραίτητο το ακριβές χρονικό βήμα των υπολογισμών να ταυτίζεται με το χρονικό βήμα του πλημμυρογραφήματος που έχουμε εισάγει.



Σχήμα 5-4: Ορισμός χαρακτηριστικών προσομοίωσης συνθηκών ανομοιόμορφης ροής

5.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Χρησιμοποιώντας το μενού **Ras Mapper** του HEC-RAS έχουμε την δυνατότητα να ορίσουμε το κατάλληλο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς, να εισάγουμε ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) καθώς και Shapefiles που εμπεριέχουν τις κατηγορίες χρήσεων γης της περιοχής ενδιαφέροντος. Συμπληρωματικά μπορούμε να προβάλουμε τα αποτελέσματα της διαδικασίας χρησιμοποιώντας δυναμικά μοντέλα του πεδίου κατάκλισης συγκεκριμένου χρονικού βήματος κάθε φορά. Ανάμεσα στα μεγέθη ως πιο σημαντικά αναφέρονται το βάθος ροής πλημμύρας, η ταχύτητα ροής, η μεταβολή της στάθμης επιφάνειας ύδατος, η έκταση πλημμυρικού πεδίου, ο όγκος της πλημμύρας κλπ. Οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.6.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση

6.1.1 Εφαρμογή αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ)

i. Περιοχή Μελέτης

Ως περιοχή μελέτης και εφαρμογής της μεθόδου ΑΗΡ ορίζεται το Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03), μιας και σε αυτό υπάγεται η περιοχή της Σκάλας Λακωνίας (Σχήμα 6-1). Η προσοχή και το ενδιαφέρον του μελετητή στράφηκε σε αυτή εξ αρχής, εφόσον αποτελεί μια άκρως επιβαρυσμένη περιοχή λόγω έντονων καταγεγραμμένων πλημμυρικών φαινομένων. Αυτό φυσικά δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα καθορισμού και άλλων περιοχών του διαμερίσματος, με ισχυρή καταγεγραμμένη πλημμυρική δραστηριότητα, κάτι που αποτελεί τον κύριο λόγο εφαρμογής αυτής της ανάλυσης.

ii. Καθορισμός του προβλήματος και των στόχων

Στόχος της εφαρμογής της διαδικασίας της πολυκριτηριακής ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου της αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ), επί του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03), αποτελεί ο σαφής καθορισμός των περιοχών με το μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας έναντι πλημμυρικών φαινομένων με καταστροφικές συνέπειες στις ζωές των κατοίκων και στις υποδομές των ευρύτερων περιοχών.

iii. Επιλογή κριτηρίων

Εφόσον η συγκεκριμένη μελέτη στοχεύει στον καθορισμό περιοχών με έντονο καταγεγραμμένο πλημμυρικό ιστορικό τα κριτήρια που επιλέχθηκαν από τον γραφών, σύμφωνα με την γνώμη και οπτική του ιδίου κατά την σύνταξη αυτής, ανταποκρίνονται, καθορίζουν και περιγράφουν με ακρίβεια την εκδήλωση ενός τέτοιου πλημμυρικού γεγονότος. Αυτά φαίνονται στον Πίνακα 6-1 που ακολουθεί.

Πίνακας 6-1: Κριτήρια διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης
(Πηγή: Baltas E., Theochari A. et al. 2023)

C1	Κλίσεις
C2	Βροχόπτωση
C3	Αδιαπερατότητα
C4	Υψόμετρο
C5	Απόσταση από υδατόρεμα



Σχήμα 6-1: Δημοτικά διαμερίσματα ΥΔ Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)

(Υπόβαθρο: Google Satellite)

iv. Σύγκριση ζευγών προς ανάπτυξη βαρών κριτηρίων

Στο εν λόγω στάδιο θα πραγματοποιήσουμε μια σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων που επιλέχθηκαν εντοπίζοντας την μεταξύ τους σχέση και τον βαθμό που το ένα επηρεάζει και επηρεάζεται από το άλλο. Αυτό θα εκφραστεί σε μια κλίμακα τιμών από 1 έως 9 με την μεγαλύτερη τιμή να δηλώνει πλήρης συσχέτιση, σημαντικότητα και έντονη εξάρτηση του

σχετιζόμενων κριτηρίων μεταξύ τους. Επιπρόσθετα η κλίμακα δύναται να λάβει και τις αντίστροφές τιμές δηλώνοντας την μη σημαντικότητα μεταξύ αυτών.

Πίνακας 6-2: Συγκριτική αξιολόγηση ζευγών κριτηρίων

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	7	9	5	3
C2	1/7	1	1	1/7	1/9
C3	1/9	1	1	1/7	1/9
C4	1/5	7	7	1	1/3
C5	1/3	9	9	3	1
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	1,79	25,00	27,00	9,29	4,56

Στην συνέχεια κάθε τιμή που έχει οριστεί κατά την σύγκριση των ζευγών θα πρέπει να διαιρεθεί με το άθροισμα κάθε στήλης και να αποδώσει τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 6-3. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τα επιμέρους βάρη όπου ο μέσος όρος κάθε γραμμής θα μας δώσει την τιμή αυτών για κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Ουσιαστικά η τιμή αυτή αφορά την βαρύτητα της επίδρασης κάθε κριτηρίου στον καθορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος αντιπλημμυρικής προστασίας. Τέλος εφόσον μιλάμε για βάρη γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το άθροισμα τους θα μας δίνει 1.

Πίνακας 6-3: Υπολογισμός τιμών βαρών κριτηρίων

	C1	C2	C3	C4	C5	Wi (Βάρη)
C1	0,56	0,28	0,33	0,54	0,66	0,47
C2	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04
C3	0,06	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04
C4	0,11	0,28	0,26	0,11	0,07	0,17
C5	0,19	0,36	0,33	0,32	0,22	0,28
ΑΘΡΟΙΣΜΑ						1

ν. Ανάλυση Συνέπειας

Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης συνέπειας πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο. Πρακτικά πολλαπλασιάζουμε τις τιμές που έχουμε στον Πίνακα 6-2 με τα αντίστοιχα βάρη του Πίνακα 6-3. Κατόπιν αθροίζουμε τις τιμές των κριτηρίων ανά γραμμή και διαιρούμε το κάθε άθροισμα με τα επιμέρους στοιχεία της διαγωνίου λαμβάνοντας το μέγεθος λ, την ιδιοτιμή του πίνακα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-4 που ακολουθεί.

Πίνακας 6-4: Υπολογισμός τιμών ανάλυσης συνέπειας

	C1	C2	C3	C4	C5	SUM	λ
C1	0,47	0,28	0,32	0,83	0,85	2,76	5,82
C2	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,20	5,04
C3	0,05	0,04	0,04	0,02	0,03	0,18	5,12
C4	0,09	0,28	0,25	0,17	0,09	0,88	5,30
C5	0,16	0,35	0,32	0,50	0,28	1,62	5,69

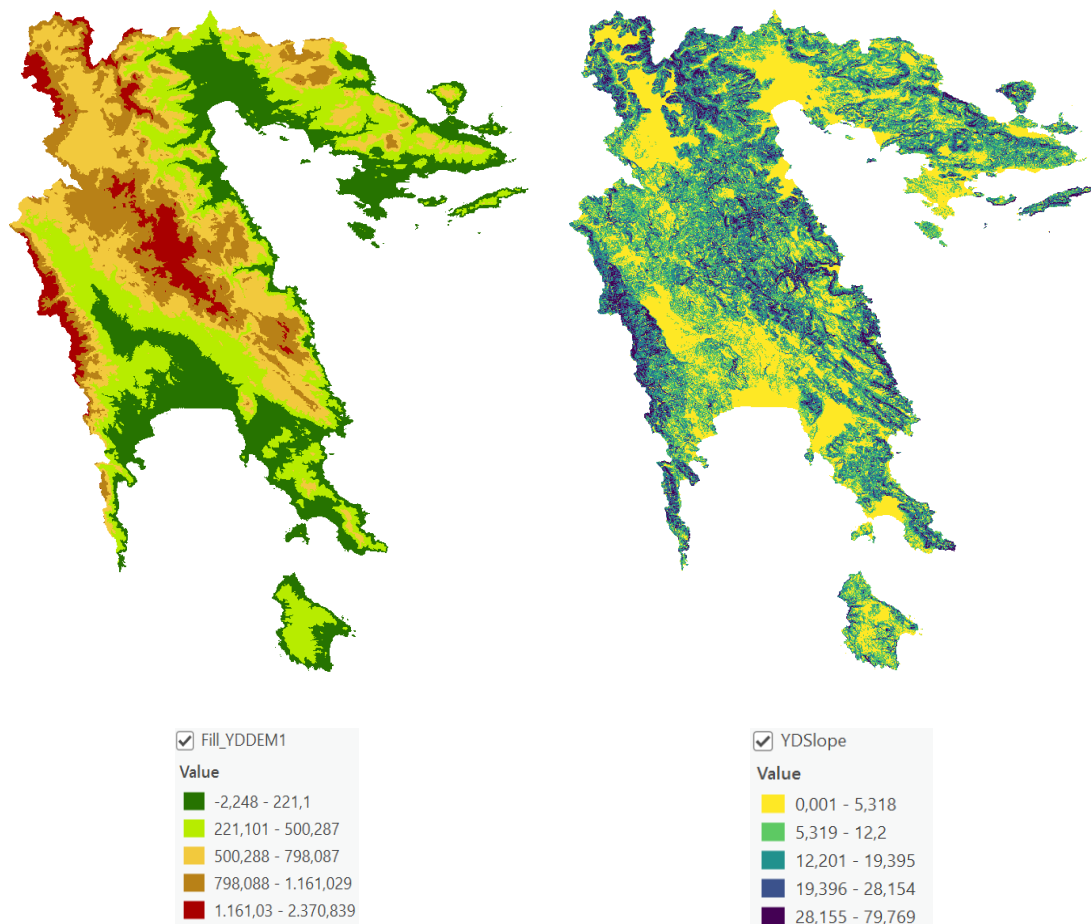
Στόχος της όλης διαδικασίας αποτελεί ο ακριβής υπολογισμός του λόγου συνέπειας η τιμή του οποίου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10% όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-5. Κάνοντας χρήση των εξισώσεων 1 και 2 του κεφαλαίου 4.2.1 και έχοντας υπολογίσει το λ_{max} , διαιρώντας το άθροισμα των λ με το πλήθος των κριτηρίων, υπολογίζουμε την τιμή του δείκτη. Σημειώνουμε ότι το μέγεθος RI της εξίσωσης 1 λαμβάνει τιμές από τον Πίνακα 6-1 ανάλογα με το πλήθος των κριτηρίων που διαθέτουμε. Τέλος η τιμή του Λόγου Συνέπειας προκύπτει από την διαίρεση του Δείκτη Συνέπειας με τον Τυχαίο Δείκτη Συνέπειας.

Πίνακας 6-5: Υπολογισμός δείκτη και λόγου συνέπειας

n (Πλήθος Κριτηρίων)	5,00
λ_{max}	5,39
RI (Τυχαίος Δείκτης Συνέπειας)	1,12
CI (Δείκτης Συνέπειας)	0,10
CR (Λόγος Συνέπειας)	0,09
	CR<0.10

vi. Σχηματισμός κριτηρίων και τυποποίηση κριτηρίων

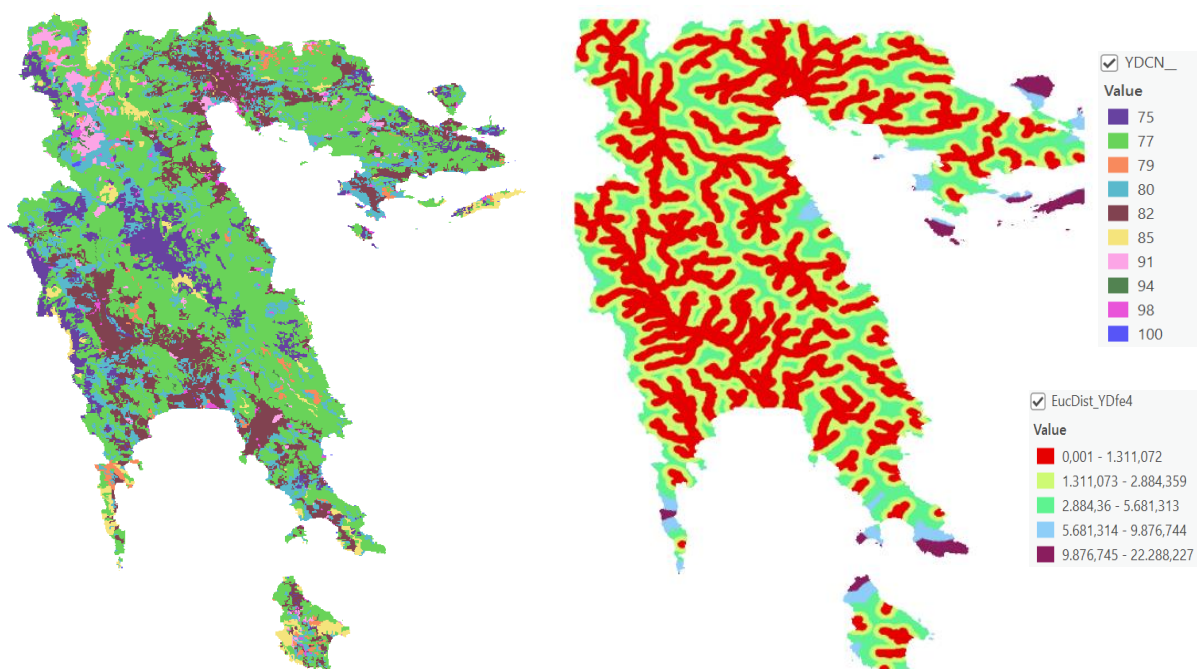
Κατά το στάδιο σχηματισμού των κριτηρίων μεταβαίνουμε στο περιβάλλον του λογισμικού ArcGis Pro όπου θα δημιουργήσουμε τα επιμέρους στρώματα (Layers) που απεικονίζουν τις υφιστάμενες συνθήκες στην υπό μελέτη περιοχή ενδιαφέροντος. Τα δύο πρώτα Layers που θα χρειαστούμε είναι αυτά του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), το οποίο περιέχει τις υψομετρικές διαφοροποιήσεις του εδαφικού ανάγλυφου σε μέτρα και των εδαφικών κλίσεων (Slope) που περιγράφει την τροποποίηση των κλίσεων του εδάφους της περιοχής, εκφραζόμενη σε ποσοστό επί της εκατό (%). Στο Σχήμα 6-2 προβάλλονται τα αποτελέσματα με τις τιμές των μεγεθών αυτών.



Σχήμα 6-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM - 25x25) και Εδαφικές κλίσεις (Slope)

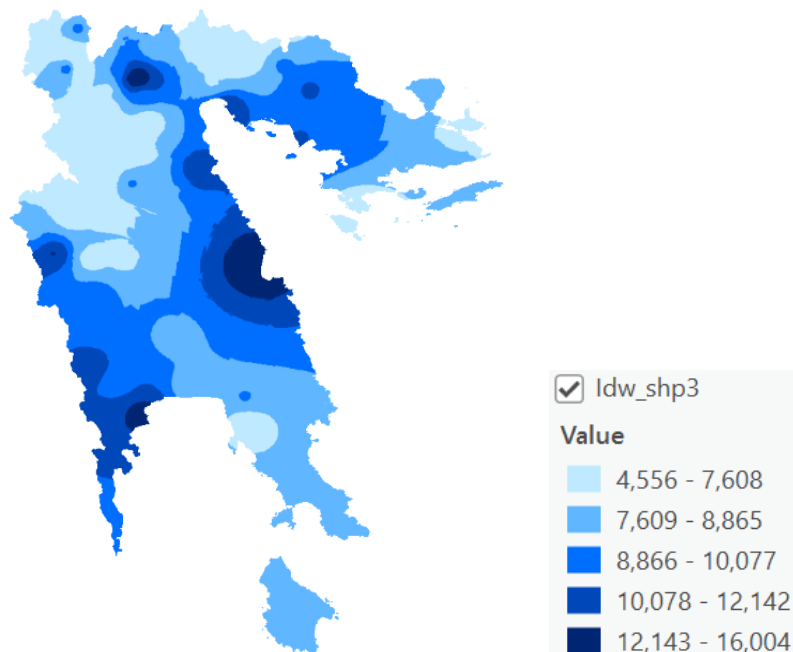
Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου

Εν συνεχεία τα επόμενα δύο στρώματα που θα χρειαστούμε, μιας και έχουν θεσπιστεί ως κριτήρια κατά το στάδιο της επιλογής, είναι αυτό που περιγράφει την αδιαπερατότητα των εδαφών της περιοχής κάνοντας χρήση του απορροϊκού συντελεστή (Curve Number) και αυτό της ευκλείδειας απόστασης των διαφόρων σημείων της περιοχής από το υδρογραφικό δίκτυο αυτής. Το πρώτο λαμβάνει τιμές από 0 έως 100 περιγράφοντας τον ρυθμό διηθητικότητας και διαπερατότητας ενός εδάφους. Όσο πιο κοντά στο μηδέν βρίσκονται οι τιμές ο ρυθμός αυξάνεται ενώ για τιμές κοντά στο 100 έχουμε μείωση της διηθητικότητας και αύξηση της επιφανειακής απορροής (Σχήμα 6-3). Η διαμόρφωση των τιμών του συντελεστή εξαρτάται κυρίως από τις χρήσεις γης του εδάφους, τον τρόπο διαχείρισης αυτού καθώς και από την προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση του (Baltas et al. 2023). Η λειτουργία της ευκλείδειας απόστασης υπολογίζει την απόσταση ενός ή πολλών χαρακτηριστικών που εμπεριέχονται σε ένα Layer, του υδρογραφικού δικτύου για την δική μας περίπτωση, από τα γύρω κελιά της υπό μελέτη περιοχής. Εμείς υπολογίσαμε τις αποστάσεις περιμετρικά του υδρογραφικού δικτύου και αυτές φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί εκφρασμένες σε μέτρα.



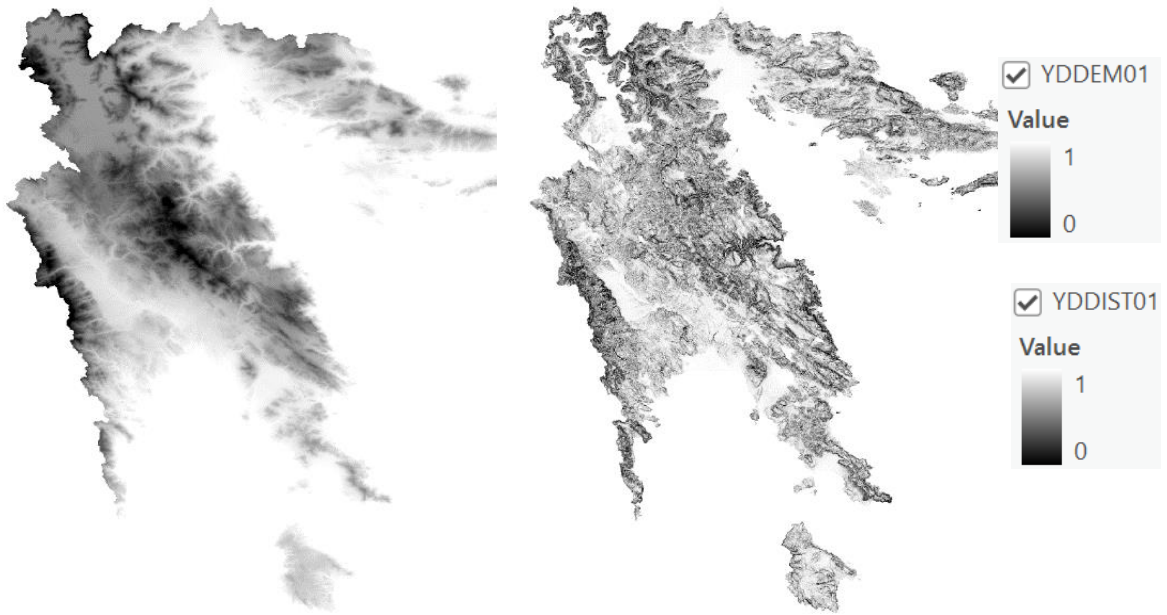
Σχήμα 6-3: Απορροϊκός συντελεστής CN και Ευκλείδεια απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο.

Το τελευταίο Layer που απαιτείται είναι αυτό της βροχόπτωσης. Κάνοντας χρήση των όμβριων καμπυλών της περιοχής, για διάρκεια βροχής 24 ώρες και περίοδο επαναφοράς 100 έτη, εφαρμόζοντας την εντολή **IDW (Inverse Distance Weighted)** του λογισμικού εξάγουμε τα αποτελέσματα στο Σχήμα 6-4 με τις υπολογισμένες εντάσεις βροχόπτωσης ανά ώρα των σταθμών της περιοχής. Η **μέθοδος αντιστρόφων αποστάσεων (IDW)** εφαρμόζει μια παρεμβολή ανάμεσα στα δεδομένα, καθορίζοντας τις τιμές των ενδιάμεσων κελιών χρησιμοποιώντας έναν γραμμικά σταθμισμένο συνδυασμό ενός συνόλου σημείων δείγματος. Το βάρος είναι συνάρτηση της αντίστροφης απόστασης και η επιφάνεια που παρεμβάλλεται θα πρέπει να είναι αυτή μιας τοπικά εξαρτώμενης μεταβλητής.

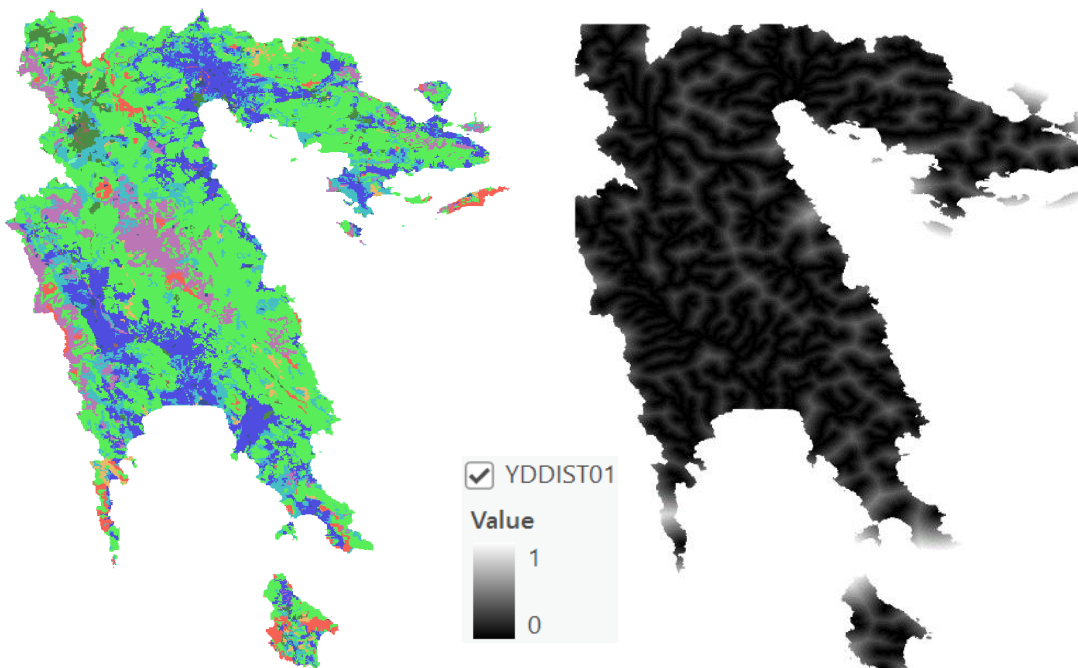


Σχήμα 6-4: Ένταση βροχόπτωσης για διάρκεια βροχής $t=24h$ και περίοδο επαναφοράς $T=100$

Η τυποποίηση των κριτηρίων αφορά τον μετασχηματισμό των τιμών κάθε κριτηρίου σε νέα στρώματα σε περιβάλλον συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, προσαρμοσμένες σε ένα ενιαίο εύρος από 0 έως 1, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη επεξεργασία και κοινή προβολή τους από το λογισμικό (Σχήμα 6-5 έως Σχήμα 6-7). Στην συνέχεια προβάλλεται το αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Raster Calculator** του ArcGIS Pro και των εξισώσεων 3 και 4.



Σχήμα 6-5: Τυποποιημένα στρώματα Ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) και Εδαφικών κλίσεων



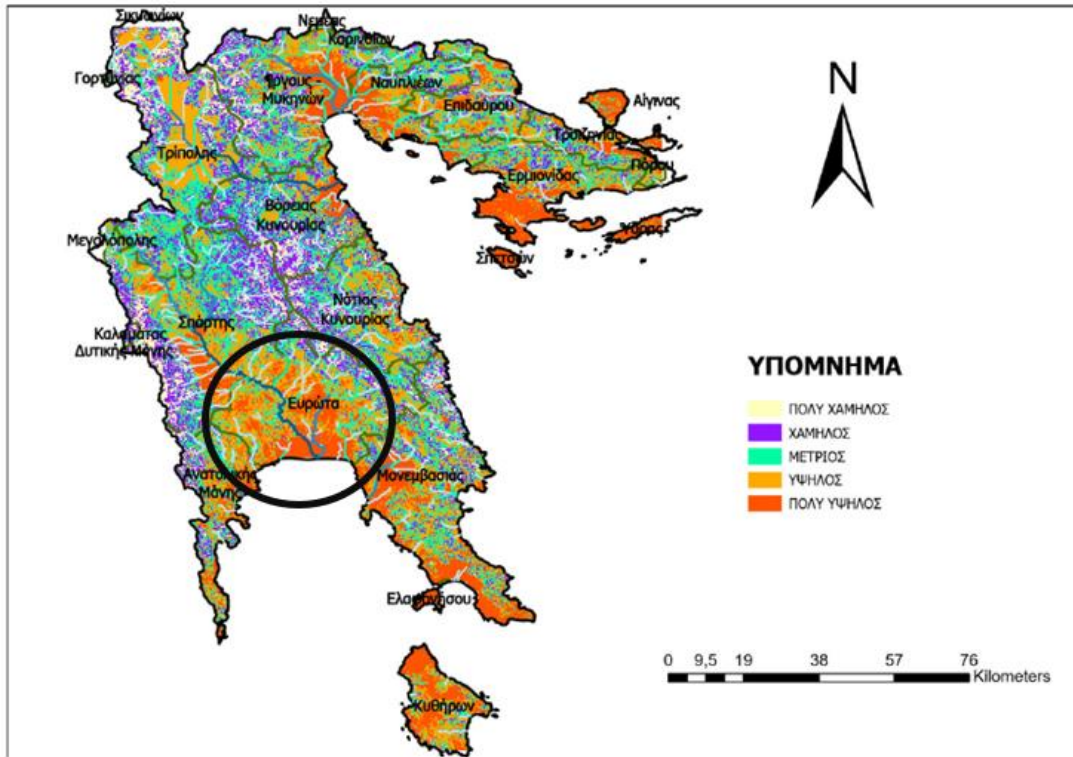
Σχήμα 6-6: Τυποποιημένα στρώματα Απορροϊκού συντελεστή CN και Ευκλείδειας απόστασης



Σχήμα 6-7: Τυποποιημένο στρώμα εντάσεων βροχόπτωσης

6.1.2 Σύνθεση κριτηρίων – Αποτελέσματα

Ως αποτέλεσμα επιδιώκουμε έναν τελικό χάρτη, αποτελούμενο από όλα τα επιμέρους στρώματα σε συστάδα όπου θα προβάλλονται με σαφήνεια, οι λιγότερο καθώς και οι περισσότερο ευάλωτες περιοχές, που δύναται να αντιμετωπίσουν ένα ισχυρό πλημμυρικό επεισόδιο. Κατά την διαδικασία της σύνθεσης κάνουμε χρήση των «βαρών» των κριτηρίων που υπολογίσθηκαν προγενέστερα. Εφόσον έχουμε ενιαία κλίμακα μεγεθών στα στρώματα (Layers) των κριτηρίων και στα ίδια τα βάρη θα πολλαπλασιάσουμε την κάθε τιμή κριτηρίου με το αντίστοιχο βάρος του και τελικά θα αθροίσουμε τα 5 κριτήρια μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα θα είναι ένα καινούριο Layer το οποίο θα εμπεριέχει τιμές εύρους από 0 μέχρι 1. Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται με την μεγαλύτερη βαθμολογία αποτελούν και τις πιο ευάλωτες στα πλημμυρικά γεγονότα. Στο Σχήμα 6-8 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και διακρίνεται ξεκάθαρα ότι η περιοχή της Σκάλας Λακωνίας του δημοτικού διαμερίσματος Ευρώτα χαρακτηρίζεται ως περιοχή με υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα.



Σχήμα 6-8: Παρουσίαση αποτελεσμάτων πολυκριτηριακής ανάλυσης, πλημμυρικής επικινδυνότητας, Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)

6.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Βροχής-Απορροής

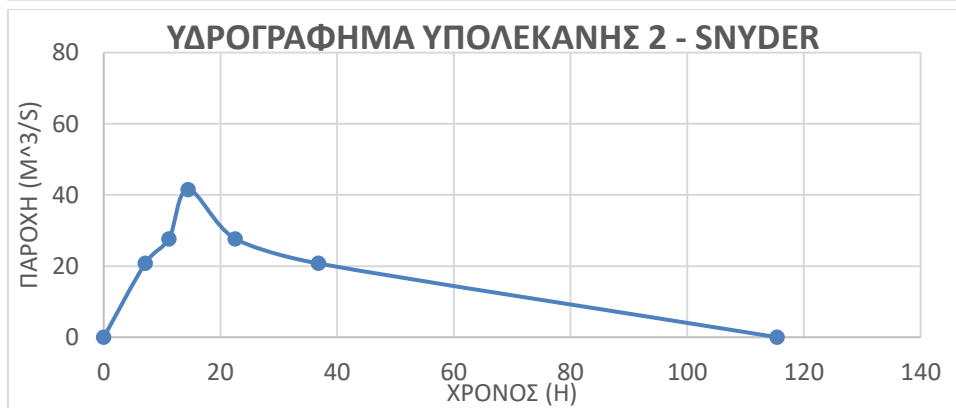
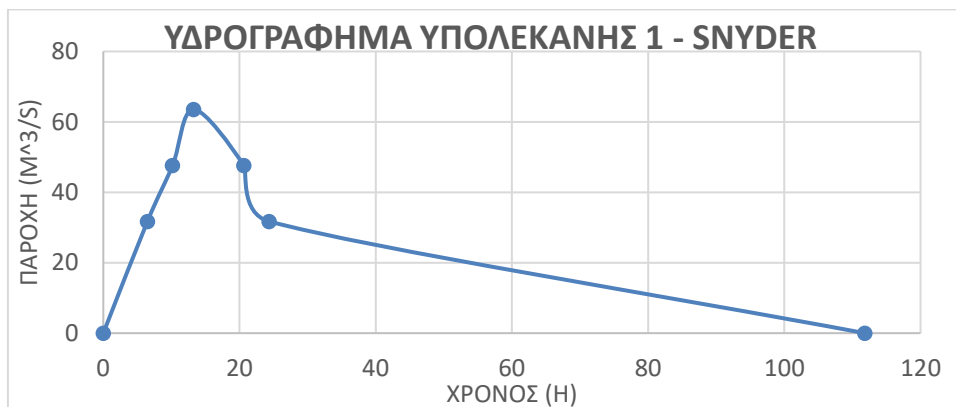
6.2.1 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder

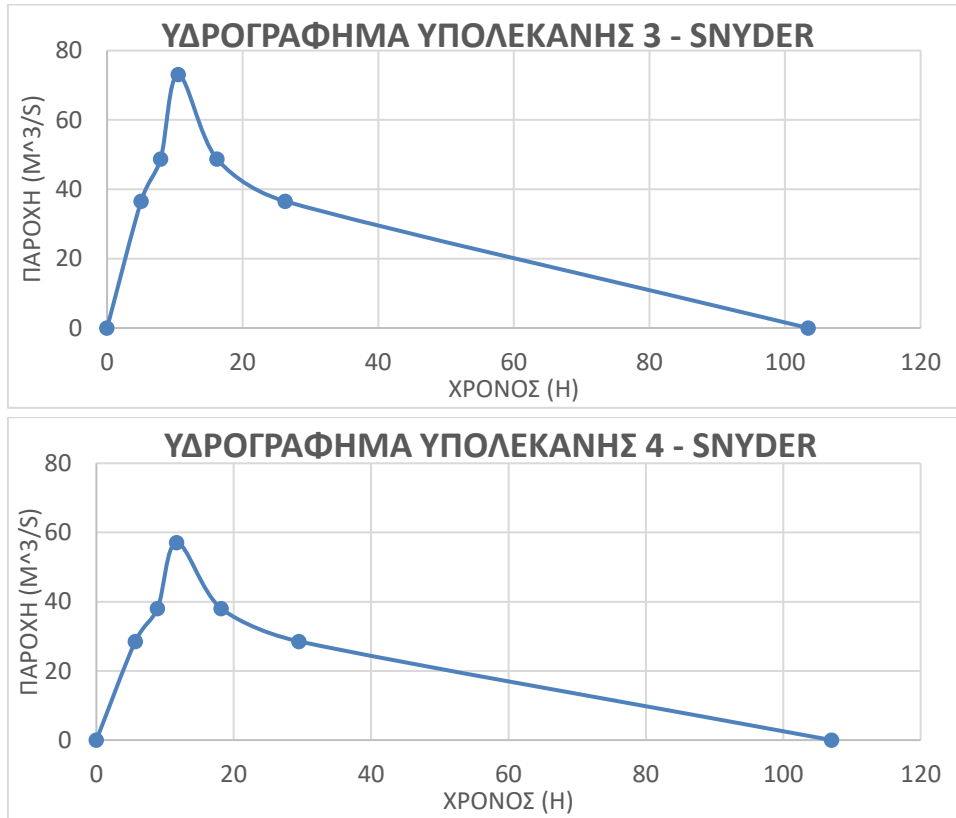
Βάση των εξισώσεων του ΜΥΓ κατά Snyder υπολογίσθηκαν τα μεγέθη για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά διαμέσου του λογισμικού Microsoft Excel και παρουσιάζονται στον Πίνακας 6-6 και στο Σχήμα 6-9 που ακολουθούν.

Πίνακας 6-6: Τιμές παραμέτρων μοντέλου βροχής – απορροής κατά Snyder

		ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
tL (h)	Χρόνος Υστέρησης	13,26	14,46	10,49	11,71
Qp (m ³ /s)	Παροχή Αιχμής	63,50	41,47	73,08	57,04
T (days)	Χρονική Βάση Υδρογραφήματος	4,66	4,81	4,31	4,46
tR (h)	Διάρκεια Ενεργού Βροχόπτωσης	2,41	2,63	1,91	2,13
W50 (h)	Πλάτος ΜΥΓ 50	19,44	21,34	15,09	17,01

		ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
1/3 W50 (h)	1/3 Πλάτους 50	6,48	7,11	5,03	5,67
2/3 W50 (h)	2/3 Πλάτους 50	12,96	14,23	10,06	11,34
W75 (h)	Πλάτος ΜΥΓ 75	11,08	12,17	8,60	9,70
1/3 W75 (h)	1/3 Πλάτους 75	3,69	4,06	2,87	3,23
2/3 W75 (h)	2/3 Πλάτους 75	7,39	8,11	5,73	6,46
Ct (1.80 - 2.20)	Αδιάστατος Συντελεστής	2,00	2,00	2,00	2,00
Cr (0.56 - 0.69)	Αδιάστατος Συντελεστής	0,63	0,63	0,63	0,63
L (Km)	Μήκος κύριου Υδατορεύματος	58,79	47,36	42,44	47,37
Lca (Km)	Μήκος κύριου Υδατορεύματος από το κέντρο θάρους της λεκάνης	24,28	40,23	15,39	19,95
A (Km ²)	Έκταση Λεκάνης Απορροής	489,79	348,84	445,86	388,77





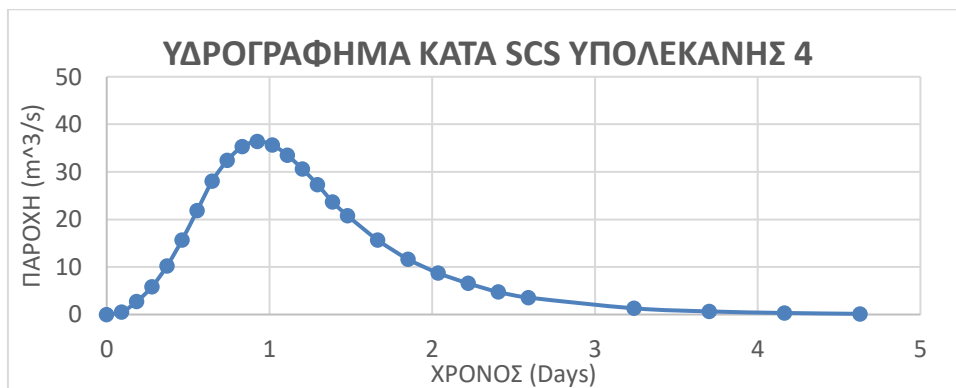
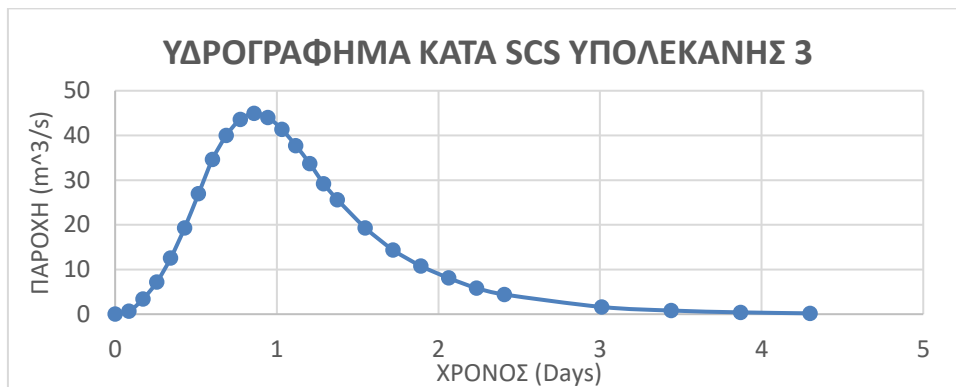
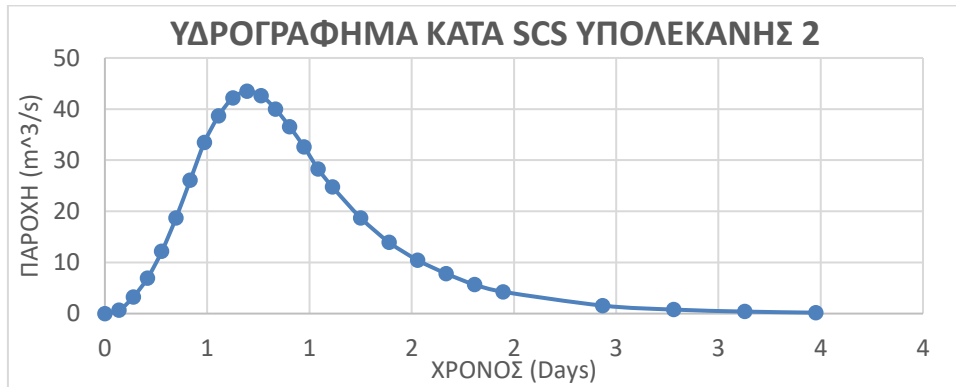
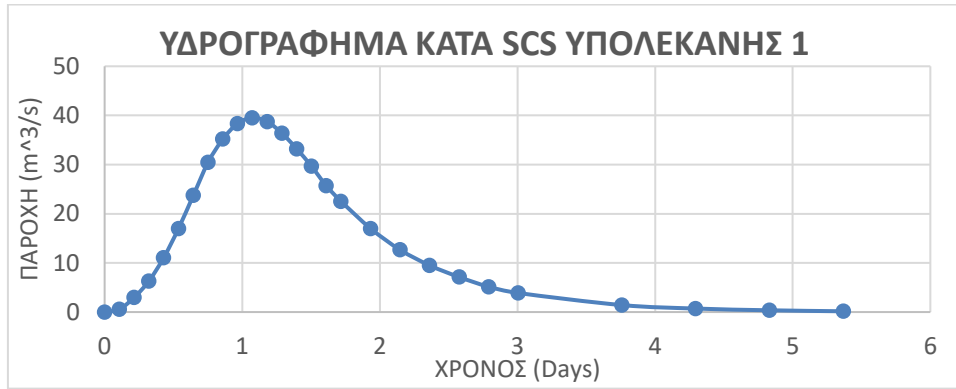
Σχήμα 6-9: Υδρογραφήματα υπολεκανών κατά Snyder

6.2.2 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS

Δεδομένων των εξισώσεων του ΜΥΓ κατά SCS υπολογίσθηκαν τα μεγέθη και συντέθηκαν τα υδρογραφήματα για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά διαμέσου του λογισμικού Microsoft Excel. Παρουσιάζονται στον Πίνακας 6-7 και στο Σχήμα 6-10 που ακολουθούν.

Πίνακας 6-7: Χρόνος αιχμής και παροχή αιχμής για κάθε υπολεκάνη κατά SCS

		ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
tp (h)	Χρόνος Αιχμής	25,77	16,69	20,64	22,22
Qp (m³/s)	Παροχή Αιχμής	39,53	43,47	44,93	36,40

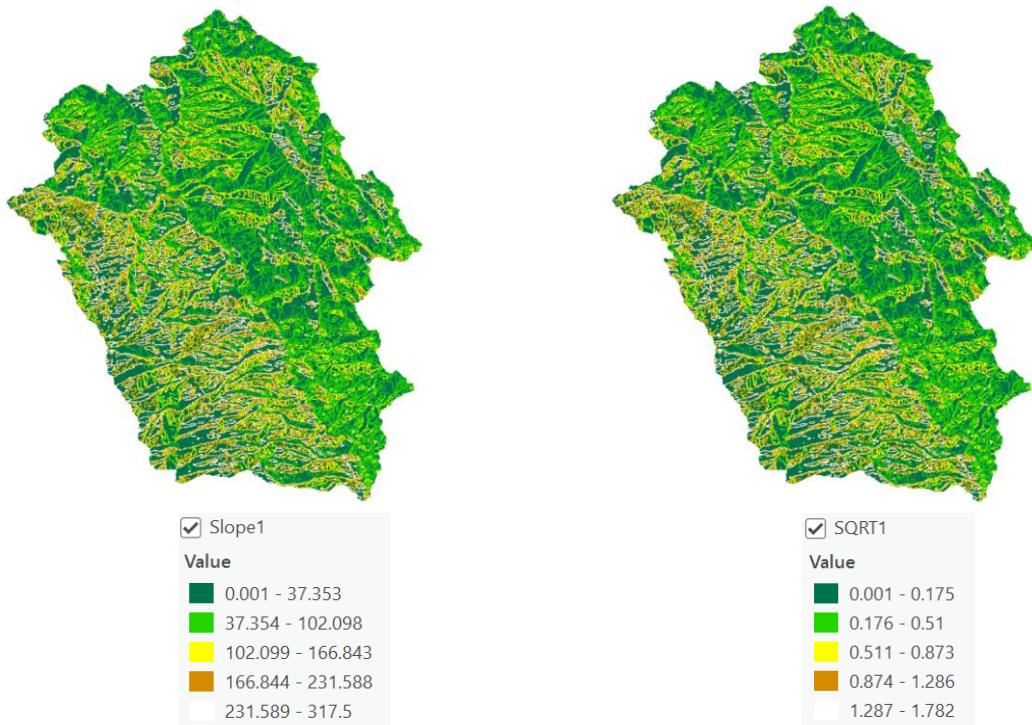


Σχήμα 6-10: Υδρογραφήματα υπολεκανών κατά SCS

6.2.3 Μοντέλο Ισόχρονων Καμπυλών

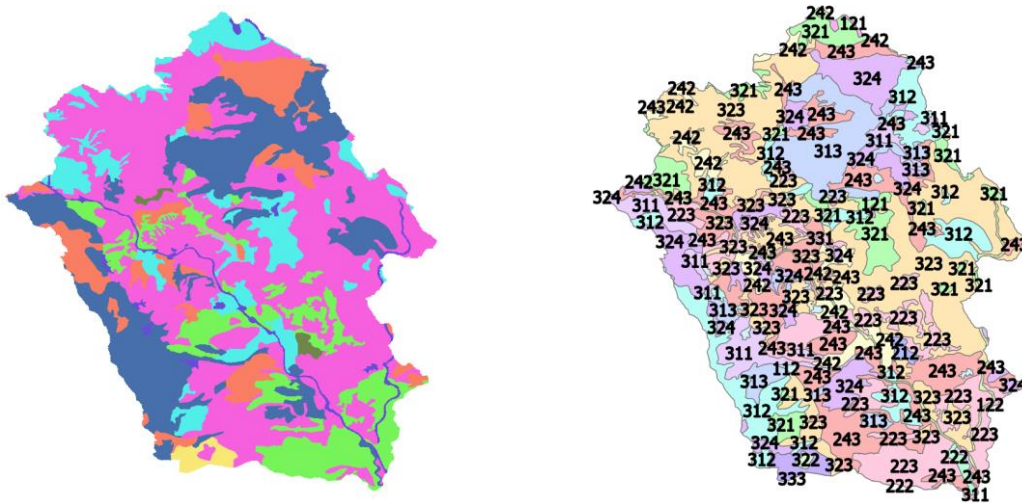
Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια της διαδικασίας για την 1^η λεκάνη απορροής του Ευρώτα (Σχήμα 6-11 έως Σχήμα 6-18) καθώς και τα ΜΥΓ που προέκυψαν για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά (Σχήμα 6-19).

i. Κάναβος εδαφικών κλίσεων



Σχήμα 6-11: Κάναβος εδαφικών κλίσεων 1^{ης} υπολεκάνης

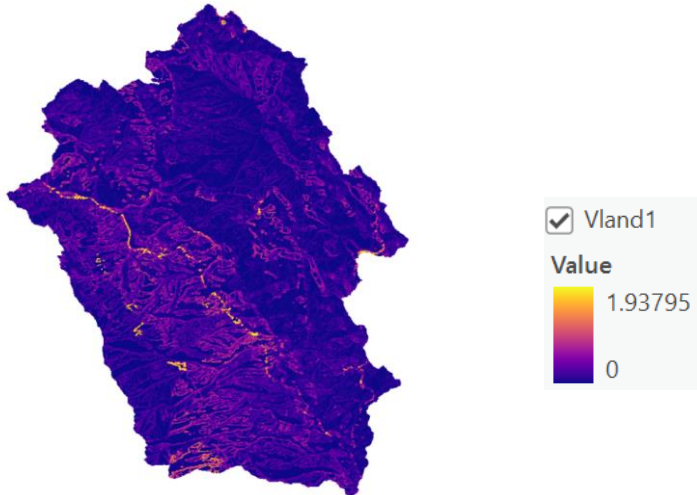
ii. Κάναβος τραχύτητας



Σχήμα 6-12: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης 1^{ης} υπολεκάνης

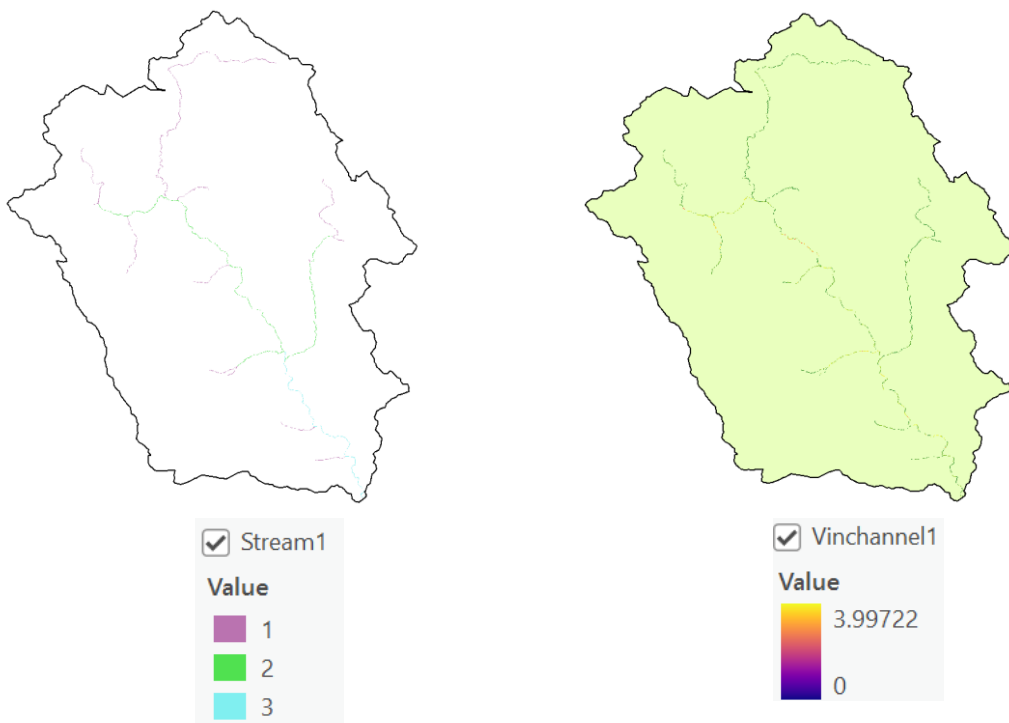
iii. Υπολογισμός ταχύτητας χερσαίας ροής

Γενικότερα, η ταχύτητα χερσαίας ροής κυμαίνεται από 0.00 – 1.50 m/s, ενώ μπορούμε να διακρίνουμε την μέγιστη τιμή για την 1^η υπολεκάνη να λαμβάνει την τιμή των 1.93 m/s.



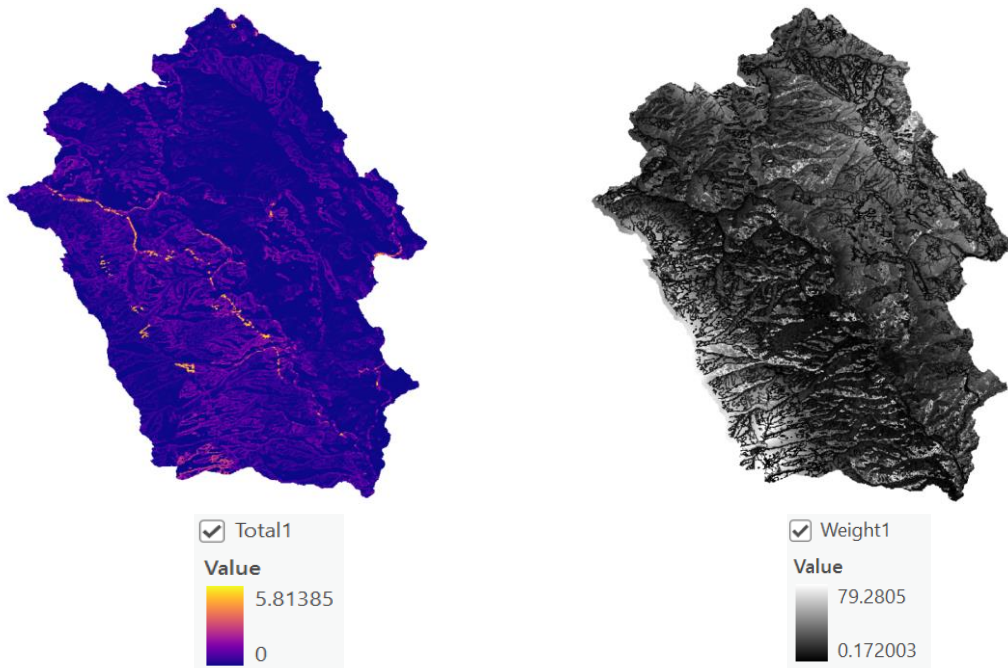
Σχήμα 6-13: Υπολογισμός ταχύτητας χερσαίας ροής 1^{ης} υπολεκάνης

iv. Υπολογισμός ταχύτητας εντός υδρογραφικού δικτύου



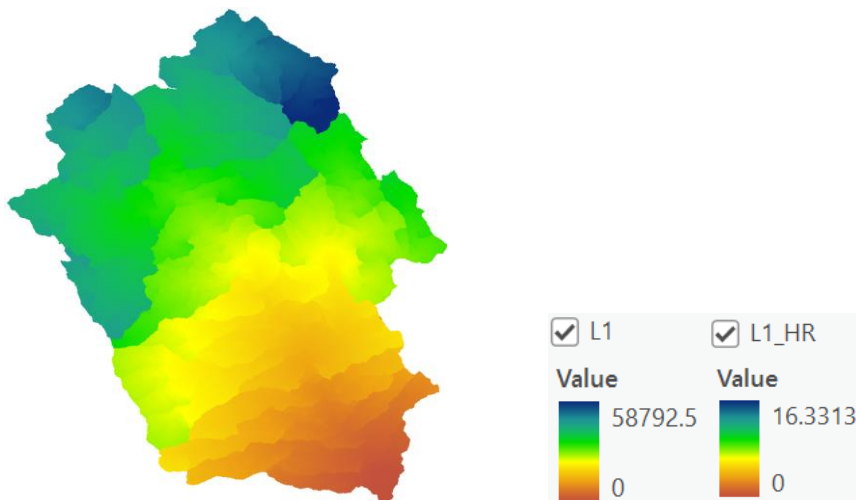
Σχήμα 6-14: Υπολογισμός ταχύτητας ροής εντός υδρογραφικού δικτύου 1^{ης} υπολεκάνης

v. Υπολογισμός συνολικής ταχύτητας

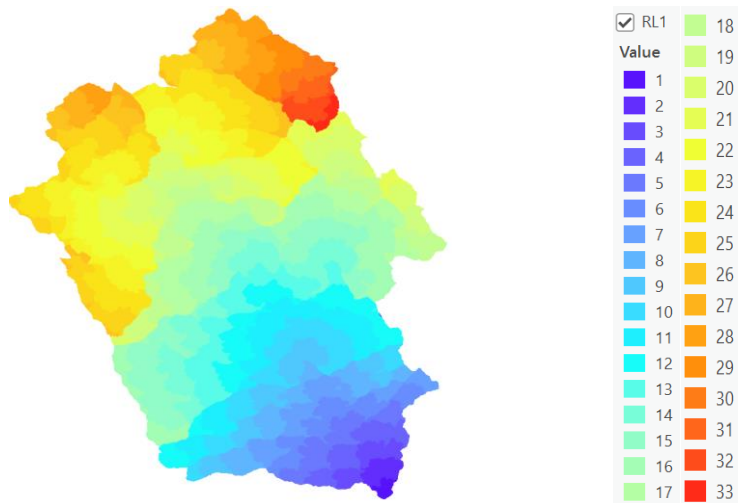


Σχήμα 6-15: Υπολογισμός συνολικής ταχύτητας απορροής και σύνθεση κανάβου βαρών ταχυτήτων 1^{ης} υπολεκάνης

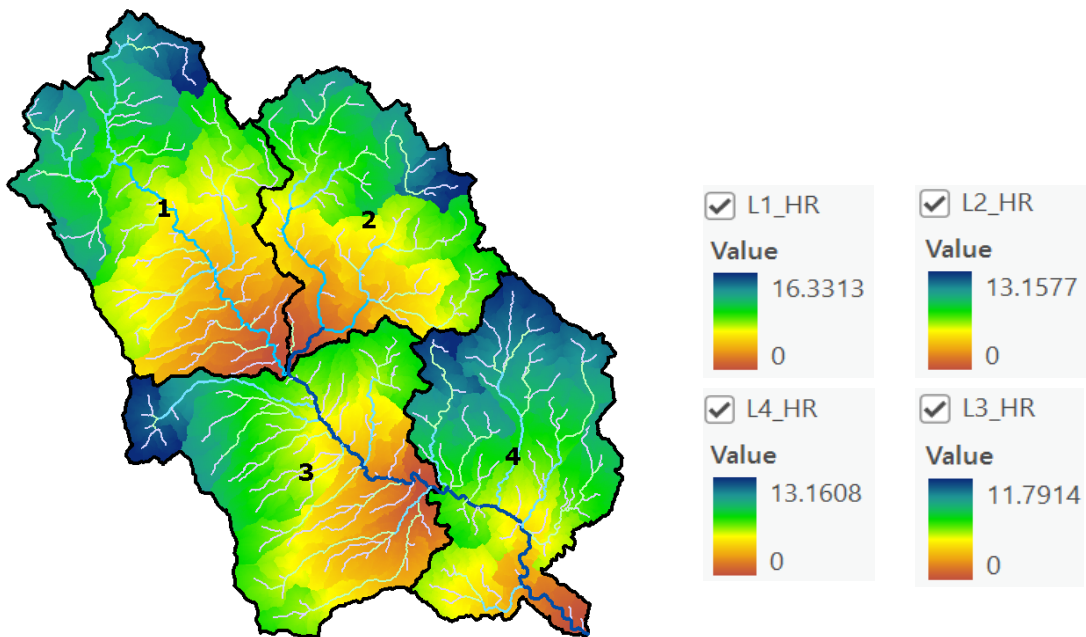
vi. Υπολογισμός κανάβου βαρών ταχύτητας και συγκεντρωτικού χρόνου ροής



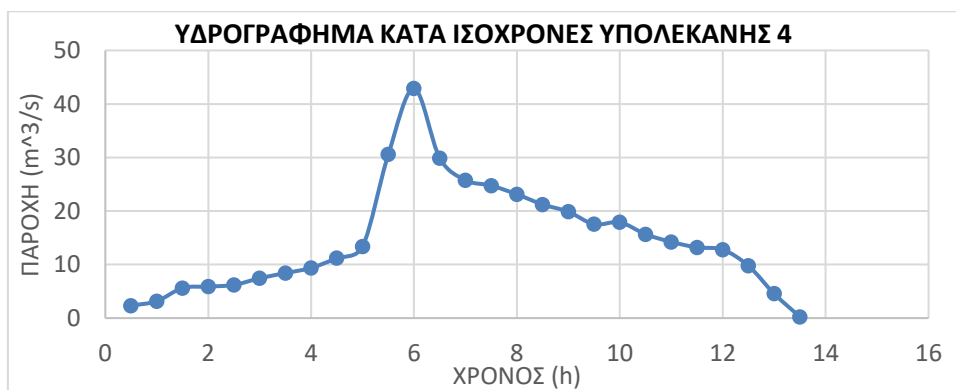
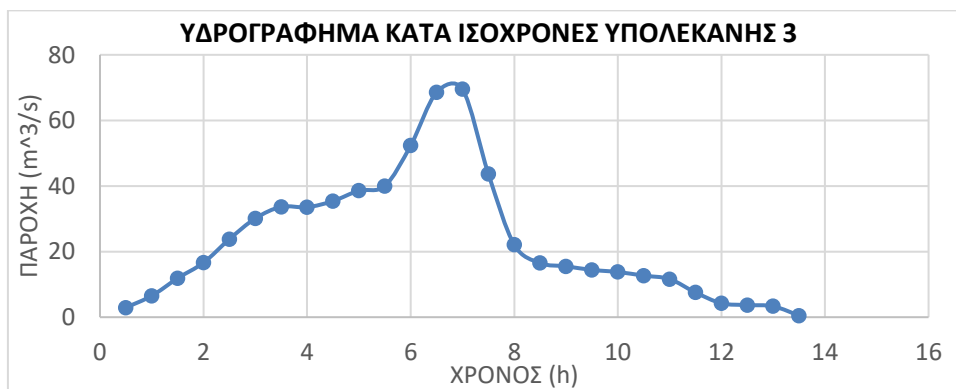
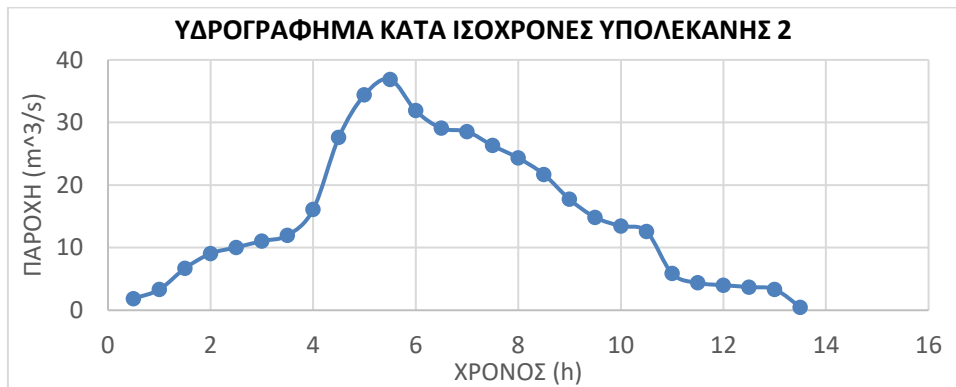
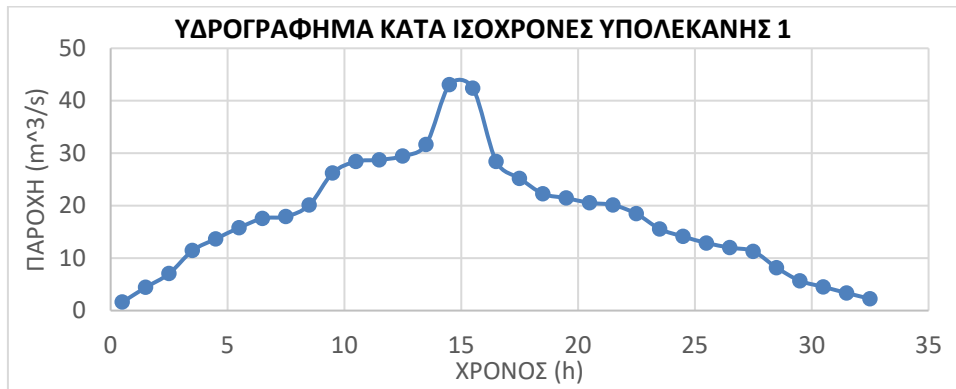
Σχήμα 6-16: Συγκεντρωτικός χρόνος ροής 1^{ης} υπολεκάνης σε ώρες



Σχήμα 6-17: Εμβαδά απορροής 1^{ης} υπολεκάνης



Σχήμα 6-18: Συγκεντρωτικοί χρόνοι ροής υπολεκανών απορροής



Σχήμα 6-19: Υδρογραφήματα υπολεκανών μοντέλου Ισόχρονων Καμπυλών

6.2.4 Συγκριτική Αξιολόγηση

Κατόπιν εφαρμογής των τριών διαφορετικών μοντέλων βροχής-απορροής παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, στον Πίνακα 6-8 που ακολουθεί, οι παροχές αιχμής που προέκυψαν σε m^3/s . Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για την λεκάνη απορροής του Ευρώτα ποταμού το ΜΥΓ κατά Snyder παράγει τις πλέον δυσμενέστερες παροχές σχεδιασμού, με την μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών να ακολουθεί και την μέθοδο της Soil Conservation Service (SCS) τις πλέον ευμενέστερες. Τα πορίσματα αυτά αφορούν την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής της υπό μελέτης περιοχής και δεν αποτελούν μια γενικότερη τοποθέτηση για παρόμοιες περιπτώσεις εφαρμογών.

Πίνακας 6-8: Σύγκριση υπολογισμένων παροχών αιχμής

	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
Snyder	63.50	41.47	73.08	57.04
SCS	39.53	43.47	44.93	36.40
Ισόχρονες	43.07	36.89	69.50	42.88

6.2.5 Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων υπολογισμού Χρόνου Συγκέντρωσης

Κατόπιν υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης κάθε υπολεκάνης, με την εμπειρική σχέση καθώς και με την επικαιροποιημένη μορφή αυτής, προκύπτει με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι η επικαιροποιημένη σχέση υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης παράγει μικρότερες τιμές (Πίνακας 6-9). Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι πλέον συνυπολογίζονται οι εντάσεις βροχόπτωσης περιόδου επαναφοράς 5 και 50 ετών από τις όμβριες καμπύλες. Αναφέρεται ότι η εμπειρική σχέση υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης λαμβάνει υπόψη μόνο τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 6-9: Επικαιροποιημένες τιμές χρόνου συγκέντρωσης λεκανών απορροής κατά Giandotti

GIANDOTTI_New	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
Εμπειρική σχέση – Χρόνος Συγκέντρωσης t_c (h)	10.31	6.68	8.26	8.89
Επικαιροποιημένη σχέση – Χρόνος Συγκέντρωσης t_c (h)	7.65	4.95	6.12	6.57
Επικαιροποιημένη τιμή όμβριας $T=5$ ΕΤΗ (mm/h)	3.88	3.78	4.27	4.06
Επικαιροποιημένη τιμή όμβριας $T=50$ ΕΤΗ (mm/h)	7.05	6.88	7.76	7.41

6.3 Υετογράφημα Σχεδιασμού

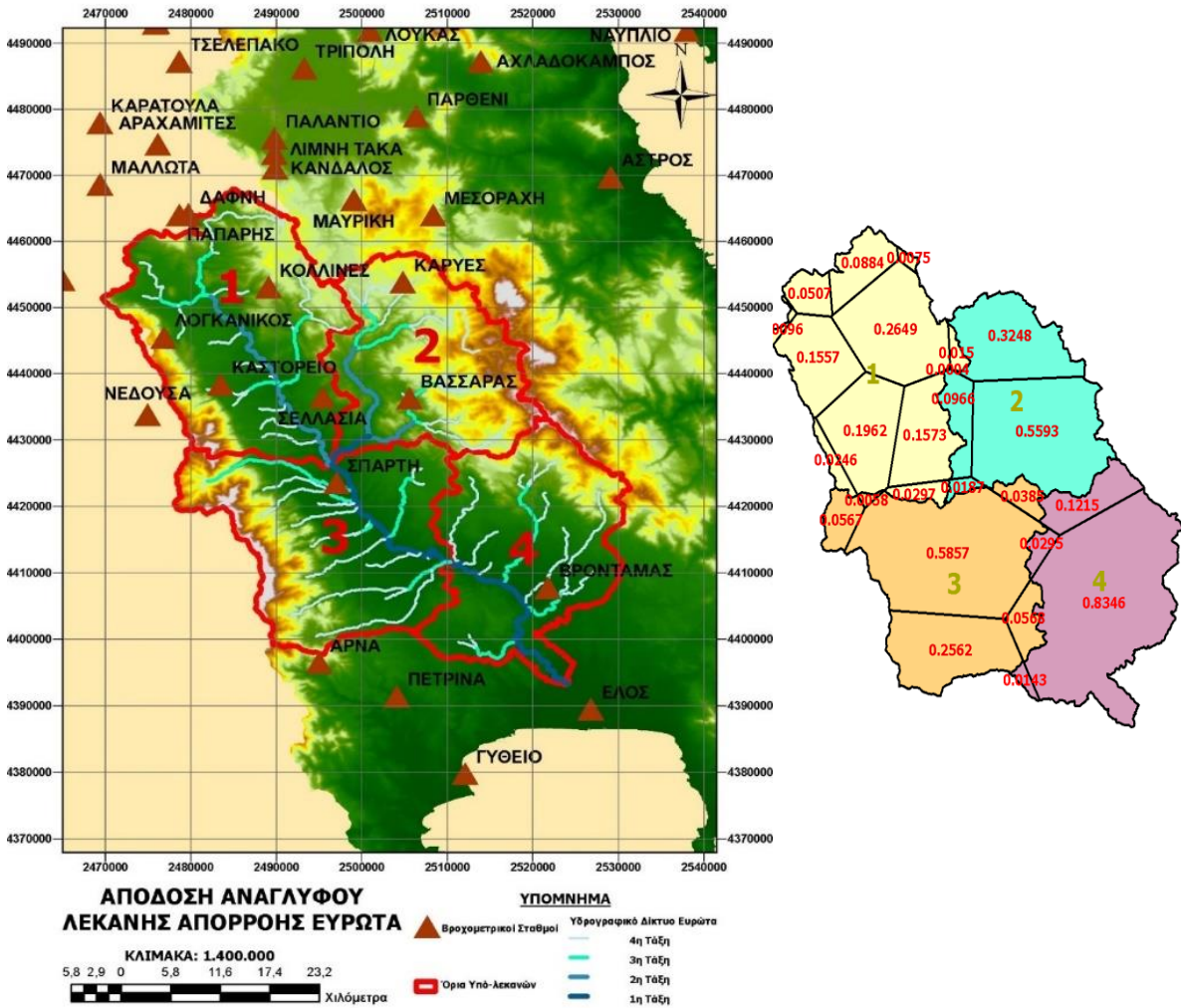
6.3.1 Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών

Στον χάρτη που προβάλλεται στο Σχήμα 6-20 προβάλλονται οι βροχομετρικοί σταθμοί βάση των οποίων συντέθηκαν τα υετογραφήματα σχεδιασμού όσο αφορά την προγενέστερη σχέση υπολογισμού των όμβριων καμπυλών. Επιπρόσθετα υπολογίσθηκαν τα πολύγωνα Thiessen της λεκάνης απορροής με τις τιμές των βαρών (Πίνακας 6-10) κάθε υπολεκάνης να φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 6-10: Τιμές βαρών πολυγώνων Thiessen ανά υπολεκάνη

	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
ΣΕΛΛΑΣΙΑ	0,16	0,10		
ΚΑΣΤΟΡΕΙΟ	0,20		0,01	
ΣΠΑΡΤΗ	0,03	0,02	0,59	0,03
ΛΟΓΚΑΝΙΚΟ	0,16			
ΜΑΥΡΙΚΗ	0,01			
ΚΟΛΛΙΝΕΣ	0,26	0,00		
ΠΟΤΑΜΙΑ	0,01			
ΠΑΠΑΡΗΣ	0,05			
ΝΕΔΟΥΣΑ	0,02		0,06	
ΔΑΦΝΗ	0,09			
ΚΑΡΥΕΣ	0,02	0,32		
ΒΑΣΣΑΡΑΣ		0,56	0,04	0,12

	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
ΑΡΝΑ			0,26	0,01
ΒΡΟΝΤΑΜΑ			0,06	0,83
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	1	1	1	1

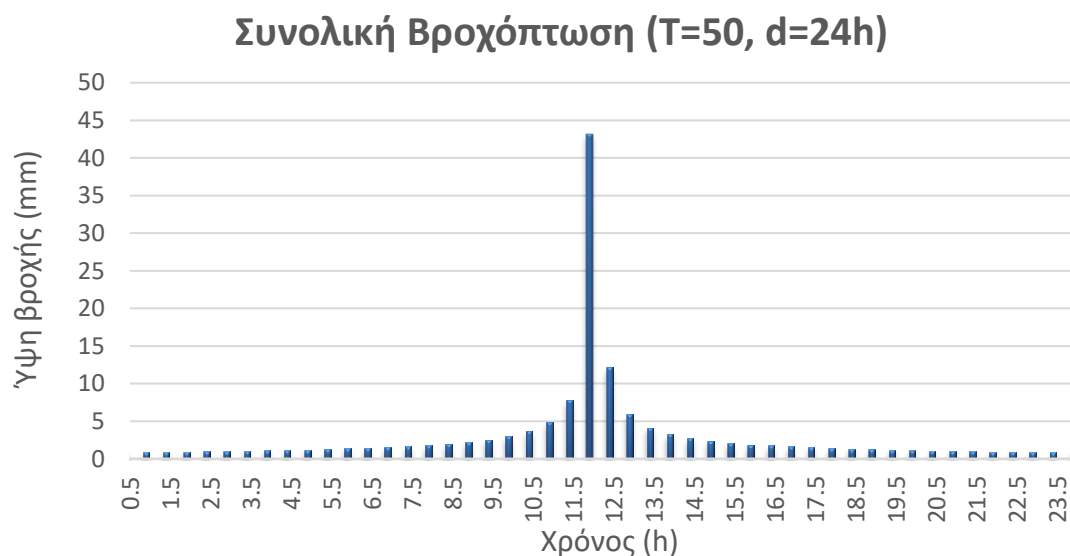


Σχήμα 6-20: Βροχομετρικοί σταθμοί λεκάνης απορροής Ευρώτα και πολύγωνα Thiessen

Στην συγκεκριμένη μελέτη υπολογίστηκαν καταιγίδες σχεδιασμού διαφορετικών περιόδων επαναφοράς (2,5,10,20,50,100 έτη). Για λόγους λακωνικότητας και αποφυγής μακροσκελών δεδομένων σε πίνακες θα προβάλουμε την διαδικασία (Πίνακας 6-11, Σχήμα 6-21) για ένα μόνο βροχομετρικό σταθμό, ονόματι Σελλασία, από τους 14 συνολικά στα πλαίσια της εργασίας. Για περαιτέρω πρόσβαση στα δεδομένα της μελέτης ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα συνοδευτικά αρχεία Excel.

Πίνακας 6-11 : Ένταση (i), ύψος βροχής σχεδιασμού (H), περίοδος επαναφοράς (T) και τιμές παραμέτρων όμβριας καμπύλης βροχομετρικού σταθμού Σελλασία

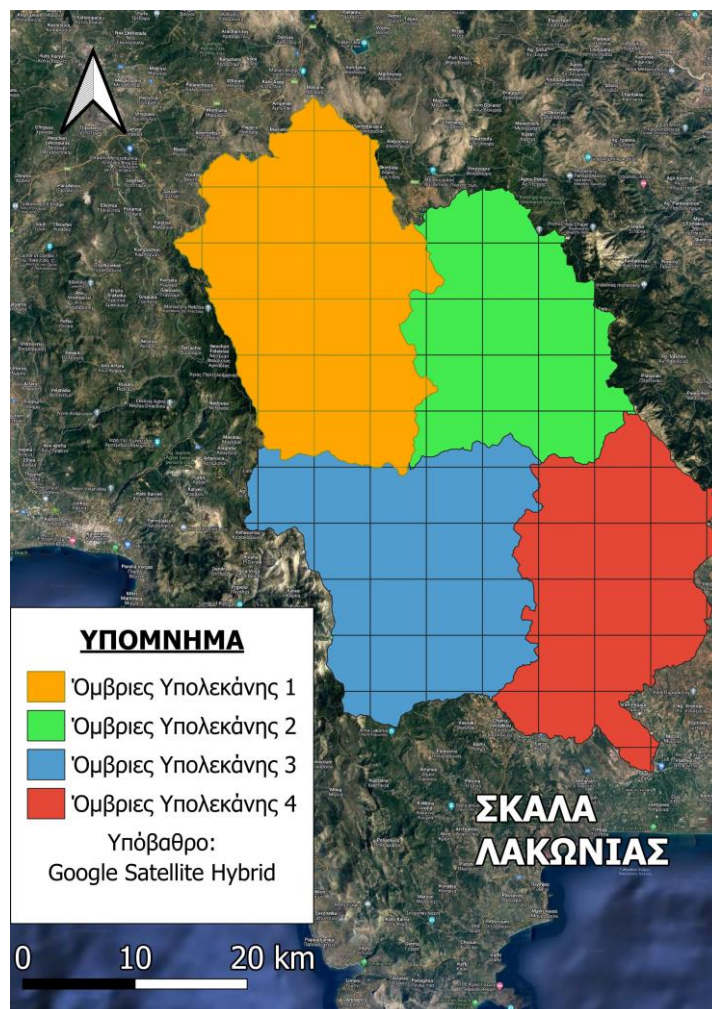
t (h)	24
λ	362.2
K	0.113
ψ	0.621
θ	0.089
n	0.724
T	50
i(mm/hr)	5.87
H event (mm)	140.88



Σχήμα 6-21: Υετογράφημα σχεδιασμού βροχομετρικού σταθμού Σελλασία διάρκειας 24 ωρών και περιόδου επαναφοράς 50 ετών

6.3.2 Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες

Στο κεφάλαιο 6.3.1 παρουσιάστηκε η εφαρμογή της μεθόδου για το βροχομετρικό σταθμό Σελλασία Λακωνίας συνθέτοντας το υετογράφημα σχεδιασμού βάση της προγενέστερης μορφής της σχέσης υπολογισμού όμβριων καμπυλών (Εξίσωση 31). Με βάση την επικαιροποιημένη σχέση καλούμαστε να συνθέσουμε εκ νέου τα υετογραφήματα (Πίνακας 6-12, Σχήμα 6-23), υπολογίζοντας αρχικά τις τιμές, για τις τρεις γεωγραφικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους λ , β , η , δεδομένου ότι τα α και ξ παραμένουν σταθερά και ίσα με 0.18 σε όλες τις χωρικές κλίμακες. Υπολογίσθηκαν εκ νέου τα υετογραφήματα δεδομένων των τιμών των πολυγώνων της μελετούμενης λεκάνης απορροής (Σχήμα 6-22).



Σχήμα 6-22: Πολύγωνα τιμών παραμέτρων επικαιροποιημένης σχέσης όμβριας καμπύλης

Πίνακας 6-12 : Ένταση (i), ύψος βροχής σχεδιασμού (H), περίοδος επαναφοράς (T) και τιμές παραμέτρων επικαιροποιημένης όμβριας καμπύλης 1^{ης} υπολεκάνης

t (h)	24
α	0.180
η	0.660
ξ	0.180
λ	58.175
β	0.019
τ	50
i(mm/h)	7.08
φ	0.90
H event (mm)	153.00



Σχήμα 6-23: Υετογράφημα πλημμύρας σχεδιασμού, πολυγώνου 1^{ης} υπολεκάνης

6.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αναφορικά της μελετώμενης περιοχής του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03) και κατά συνέπεια της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού, καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι οι νέες όμβριες συνθέτουν ευμενέστερα υετογραφήματα σχεδιασμού, κάτι που επιβεβαιώνεται στην συνέχεια των αποτελεσμάτων της μελέτης, στα τελικά πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν. Οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ της προγενέστερης και της επικαιροποιημένης σχέσης όμβριων καμπυλών προβάλλονται στον Πίνακα 6-13.

Πίνακας 6-13: Ύψη βροχής προγενέστερης και επικαιροποιημένης σχέσης όμβριων καμπυλών

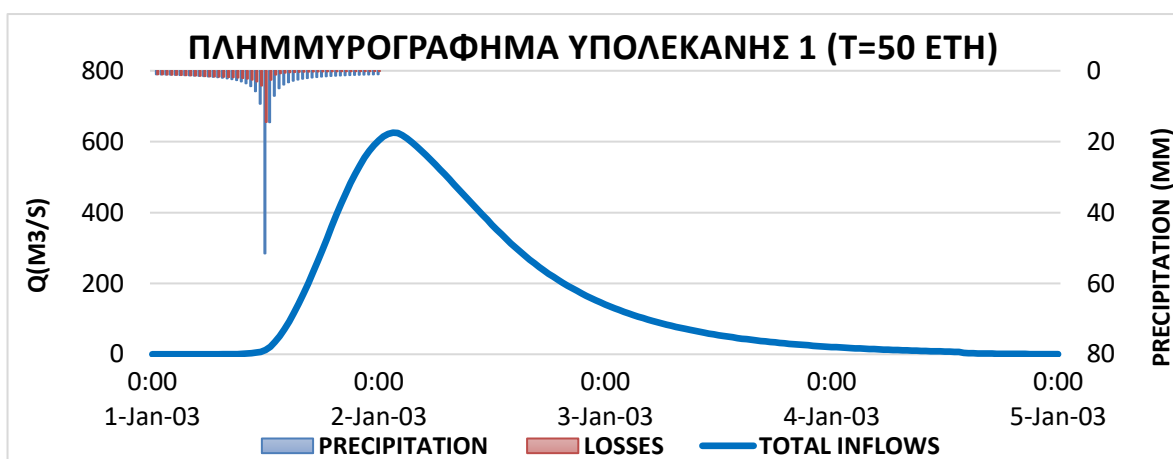
	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΟΜΒΡΙΕΣ (mm/24h)	168.48	157.09	198.48	167.79
ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΟΜΒΡΙΕΣ (mm/24h)	152.72	147.54	165.72	158.89
ΔΙΑΦΟΡΑ (mm/24h)	15.76	9.55	32.76	8.90
ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	9.35	6.08	16.51	5.30

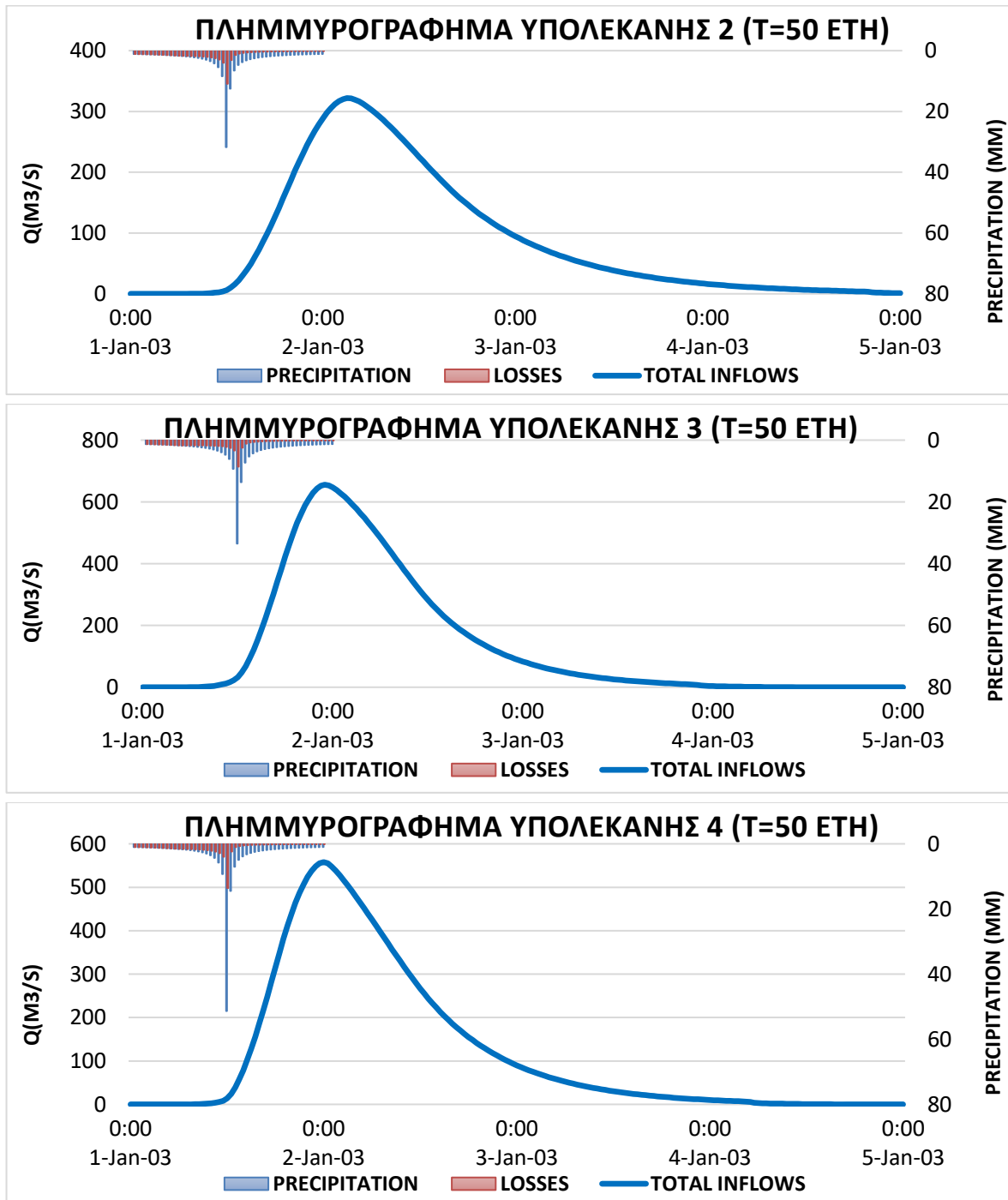
6.4 Υδρολογική Ανάλυση – Πλημμυρογραφήματα

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλημμυρογραφήματα όπως αυτά υπολογίσθηκαν, διαδοχικά κατά τα στάδια της μελέτης, παρέχοντας μια γενικότερη εικόνα και δυνατότητα σύγκρισης στον αναγνώστη.

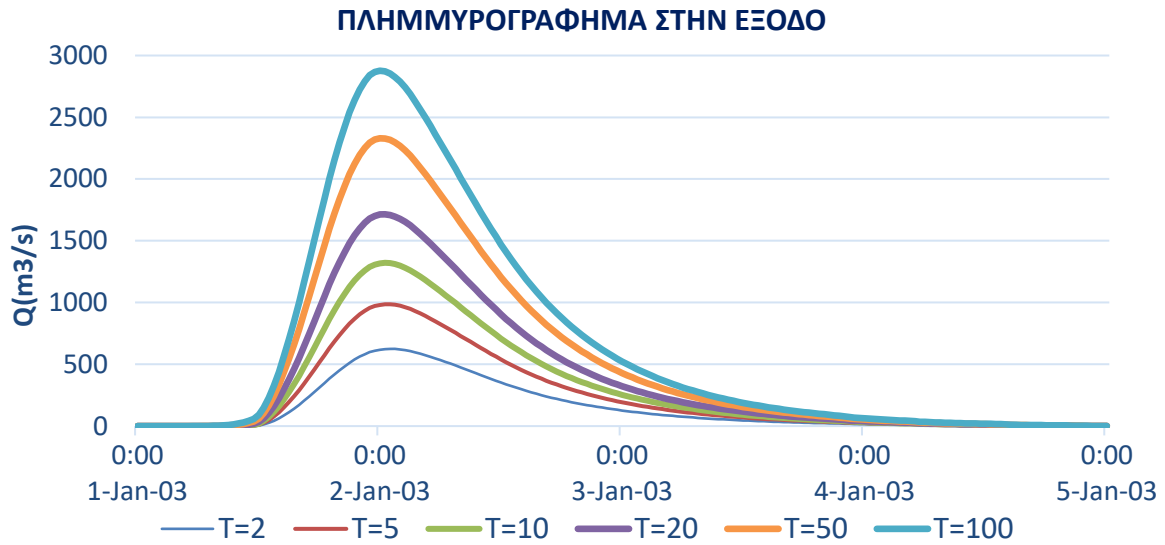
6.4.1 Πλημμυρογραφήματα προγενέστερης μορφής όμβριων καμπυλών

Δεδομένης της προγενέστερης μορφής της σχέσης υπολογισμού όμβριων καμπυλών προέκυψαν τα πρώτα αποτελέσματα και προβάλλονται στο Σχήμα 6-24 και στο Σχήμα 6-25 αντίστοιχα.





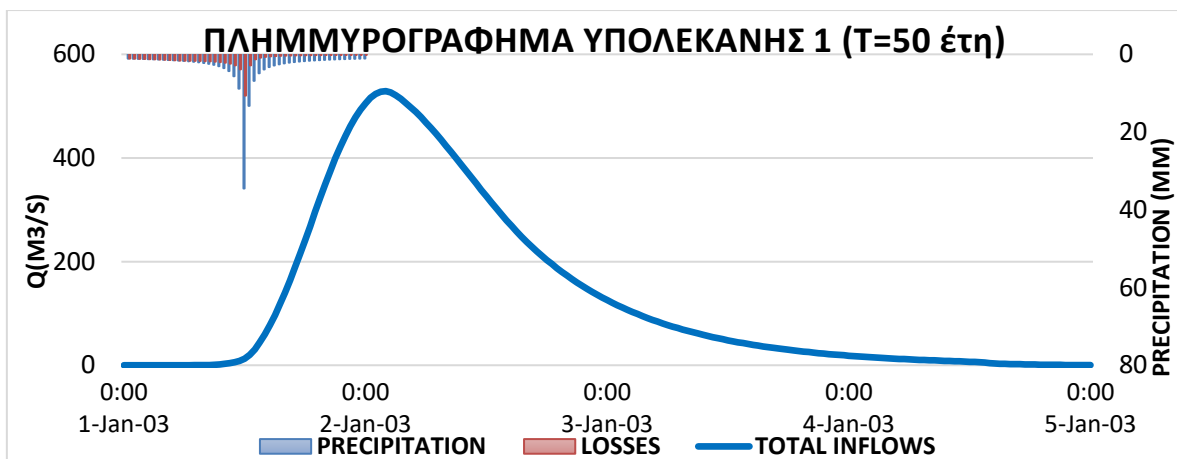
Σχήμα 6-24: Πλημμυρογραφήματα υπολεκανών προγενέστερης μορφής όμβριων καμπυλών για T=50 έτη

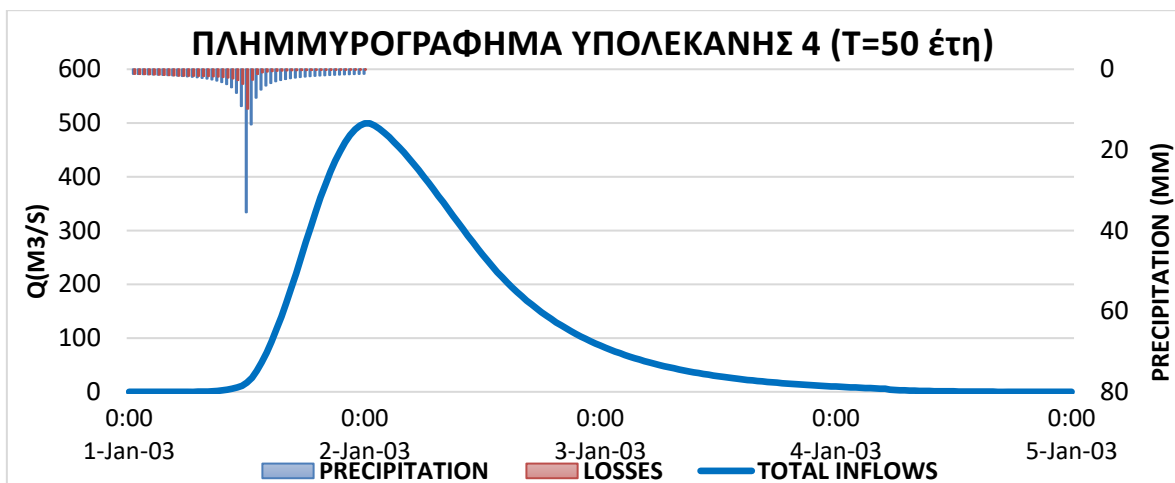
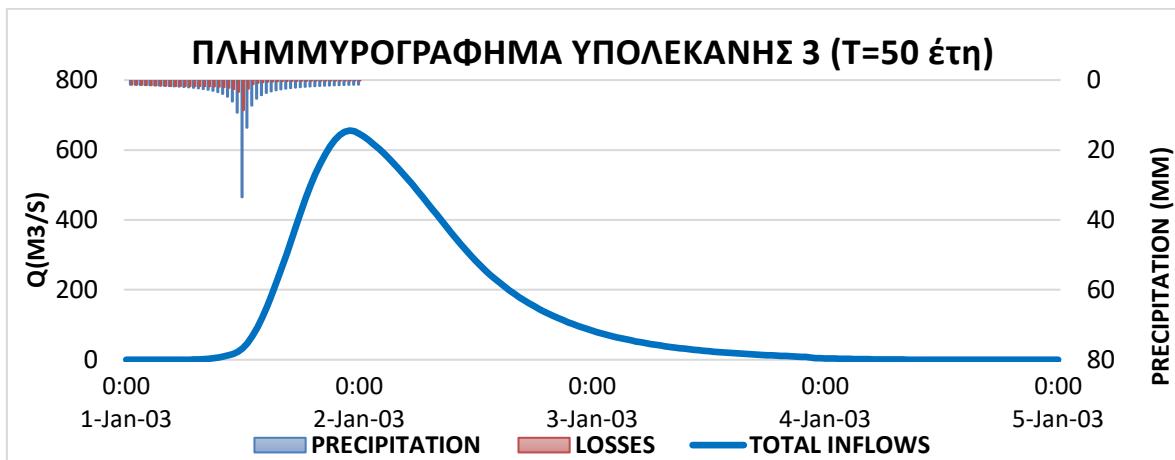
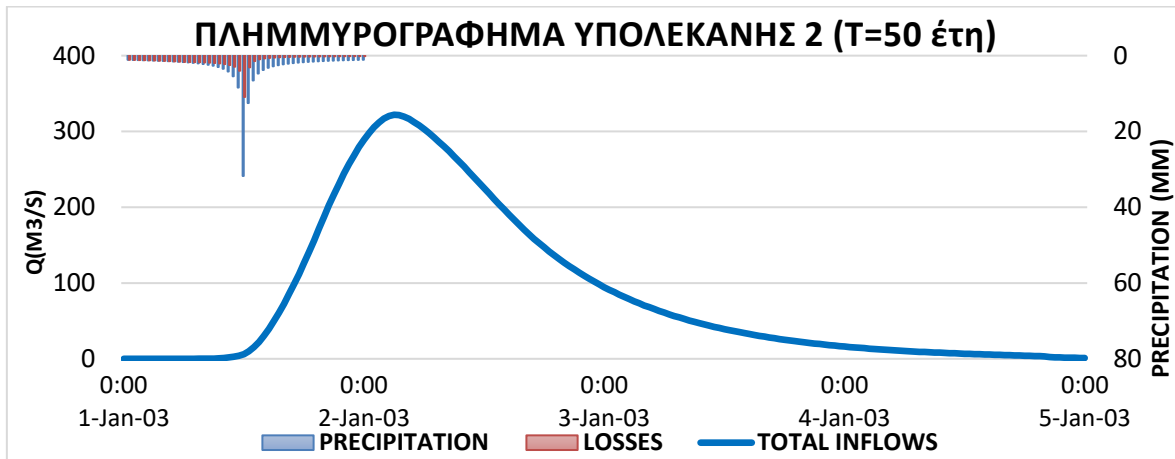


Σχήμα 6-25: Πλημμυρογράφημα διαφόρων περιόδων επαναφοράς λεκάνης απορροής Ευρώτα ποταμού

6.4.2 Πλημμυρογραφήματα επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών

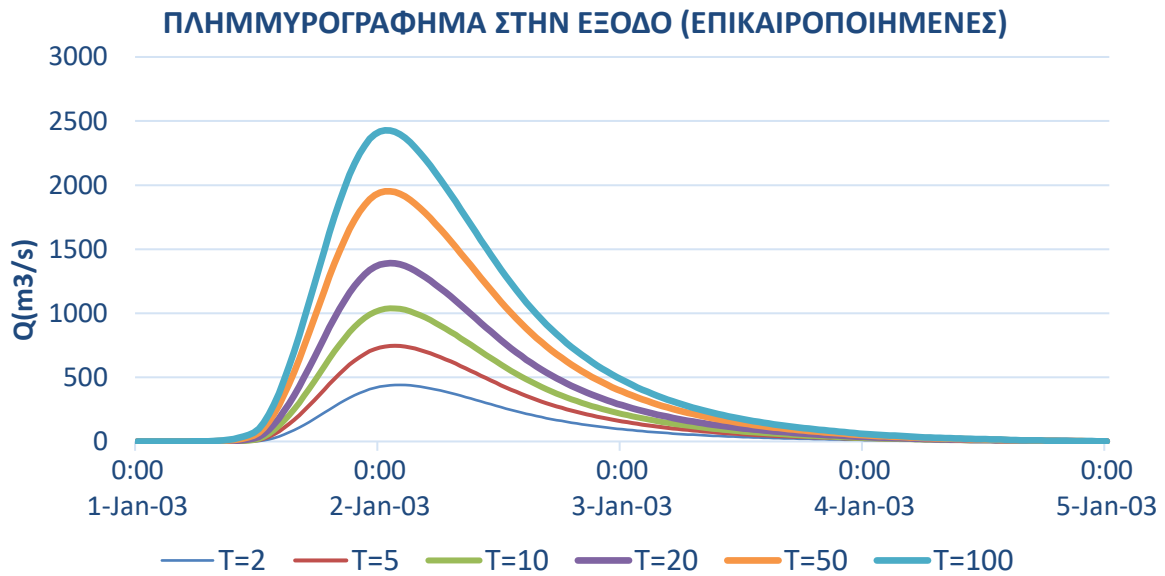
Εφόσον η σχέση υπολογισμού όμβριων καμπυλών διαφοροποιήθηκε μεταβάλλονται τα υετογραφήματα σχεδιασμού και τροποποιούνται τα πλημμυρογραφήματα εξόδου σε κάθε υπολεκάνη απορροής. Αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-26 που ακολουθεί.





Σχήμα 6-26: Πλημμυρογραφήματα υπολεκανών επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών για $T=50$ έτη

Μετά το πέρας της σύνθεσης όλων των υετογραφημάτων σχεδιασμού εισάγουμε εκ νέου τα δεδομένα στο λογισμικό HEC-HMS βάση του οποίου θα εκρεύσουν τα πλημμυρογραφήματα κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά όπως και του πλημμυρογραφήματος στην έξοδο της ευρύτερης λεκάνης απορροής. Στο Σχήμα 6-27 που ακολουθεί απεικονίζονται αποτελέσματα για βροχές περιόδου επαναφοράς 2, 5, 10, 20, 50 και 100 ετών.



Σχήμα 6-27: Πλημμυρογράφημα λεκάνης απορροής Ευρώτα βάση επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών

6.5 Εφαρμογή μεθόδων Φυσικών λύσεων

6.5.1 Μέθοδος δενδροφύτευσης επί της λεκάνης απορροής ποταμού

Η συνολική έκταση που απαιτήθηκε προς σχεδιασμό και εφαρμογή των νέων χρήσεων γης έφτασε τα 27.14 Km². Στο Σχήμα 6-28 προβάλλεται στο εργασιακό περιβάλλον του ArcGis PRO οι χρήσεις γης σε συνδυασμό με τις τιμές του απορροϊκού συντελεστή CN βάσει του οποίου ορίστηκαν οι περιοχές προς δενδροφύτευση. Προβάλλονται αναλυτικά στο Σχήμα 6-29 οι εκτάσεις που απαιτήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου και στον Πίνακα 6-14 σημειώνονται οι μεταβολές του απορροϊκού συντελεστή CN.



Σχήμα 6-28: Υφιστάμενες χρήσεις γης και τιμές απορροϊκού συντελεστή CN για κάθε υπολεκάνη

Πίνακας 6-14: Μεταβολή τιμών απορροϊκού συντελεστή

	NBS CN VALUES			
	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
ΧΩΡΙΣ NBS	78.24	77.01	79.42	79.15
ΜΕ NBS	78.11	75.06	77.29	78.60



Σχήμα 6-29: Εκτάσεις εφαρμογής δενδροφύτευσης
(Υπόβαθρο: Google Earth Pro)

6.5.2 Μέθοδος αποκατάστασης μαιανδρισμών ποταμών

Σύμφωνα με τις αεροφωτογραφίες του φορέα «Ελληνικό Κτηματολόγιο», η υφιστάμενη κατάσταση της κοίτης δεν εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις ως προς τη θέση της σε σχέση με το παρελθόν (Σχήμα 6-31). Κατά περιπτώσεις εντοπίστηκαν περιοχές, κατάλληλων υψομετρικών διαφορών, όπου υποστηρίζουν την αποκατάσταση των μαιανδρισμών προκαλώντας ικανοποιητική αύξηση στο συνολικό μήκος του ποταμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τμήμα του ποταμού στο Σχήμα 6-30.



Σχήμα 6-30: Σχεδιασμός μαιανδρισμών στον ρου του ποταμού Ευρώτα
(Υπόβαθρο: Google Earth Pro)

Το συνολικό μήκος τμημάτων ποταμού που αποκαταστάθηκαν οι μαιανδρισμοί αντιστοιχεί σε **8.53 Km** και στον Πίνακα 6-15 που ακολουθεί προβάλλονται οι διαφορές που προέκυψαν κατά την εφαρμογή στο μοντέλο βροχής – απορροής του Snyder.



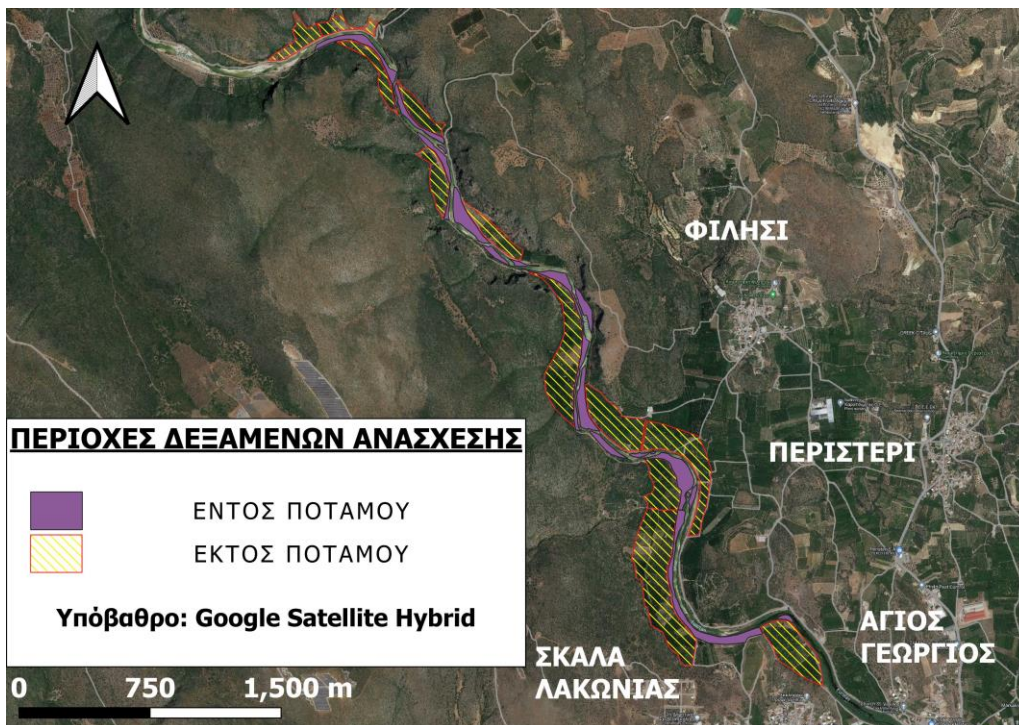
Σχήμα 6-31: Διερεύνηση ιστορικής κοίτης ποταμού Ευρώτα
(Πηγή: Αεροφωτογραφίες φορέα «Ελληνικό Κτηματολόγιο»)

Πίνακας 6-15: Εφαρμογή μοντέλου βροχής – απορροής κατά Snyder

Παράμετρος		ΥΠΟ- ΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟ- ΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟ- ΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟ- ΛΕΚΑΝΗ 4	
ΧΩΡΙΣ NBS	tL (h)	Χρόνος Υστέρησης (Snyder)	13.26	14.46	10.49	11.71
	L (Km)	Μήκος κύριου Υδατορέματος	58.79	47.36	42.44	47.37
	Lca (Km)	Μήκος κύριου Υδατορέματος από το κέντρο βάρους της λεκάνης	24.28	40.23	15.39	19.95
ΜΕ NBS	tL (h)	Χρόνος Υστέρησης (Snyder)	13.81	14.53	10.89	11.84
	L (Km)	Μήκος κύριου Υδατορέματος	61.23	47.72	47.56	47.98
	Lca (Km)	Μήκος κύριου Υδατορέματος από το κέντρο βάρους της λεκάνης	26.72	40.59	15.59	20.41

6.5.3 Μέθοδος δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων

Κατά την χρήση των δεξαμενών ανάσχεσης στην περίπτωση του Ευρώτα ποταμού απαιτήθηκε συνολική εδαφική έκταση μεγέθους 1.06 Km^2 . Κατόπιν διερεύνησης των κλίσεων αλλά και των χρήσεων γης της λεκάνης, ανάντη του σημείου ενδιαφέροντος, διαπιστώθηκε ότι ο μέγιστος όγκος που μπορεί να εξασφαλισθεί για τη δημιουργία λεκανών κατακράτησης είναι τα $2.121.615 \text{ m}^3$, δεδομένου ότι ο μέσος όρος του βάθους των εκσκαφών εντός και εκτός του ποταμού είναι τα 2 m . Στον Πίνακα 6-16 που ακολουθεί προβάλλονται τα ποσοστά μείωσης της πλημμυρικής αιχμής καθώς και του πλημμυρικού όγκου που σημειώθηκαν μετά την εφαρμογή της μεθόδου των δεξαμενών ανάσχεσης. Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 6-32 φαίνονται οι ακριβείς τοποθεσίες περιμετρικά της όχθης, όπου πραγματοποιήθηκαν οι εκσκαφές, προς δημιουργία των δεξαμενών ανάσχεσης εντός και εκτός της κοίτης του Ευρώτα ποταμού.



Σχήμα 6-32: Περιοχές κατασκευής δεξαμενών ανάσχεσης

Πίνακας 6-16: Ποσοστά μείωσης παροχής αιχμής και πλημμυρικού όγκου πλημμύρας

T	ΜΕΙΩΣΗ Q αιχμής (%)	ΜΕΙΩΣΗ V (%)
2	100	100
5	59.76	47.36
10	33.36	28.64
20	19.24	14.26
50	10.37	6.01
100	8.32	2.95

6.5.4 Ενημερωμένοι χρόνοι συγκέντρωσης υπολεκανών απορροής κατά Giandotti

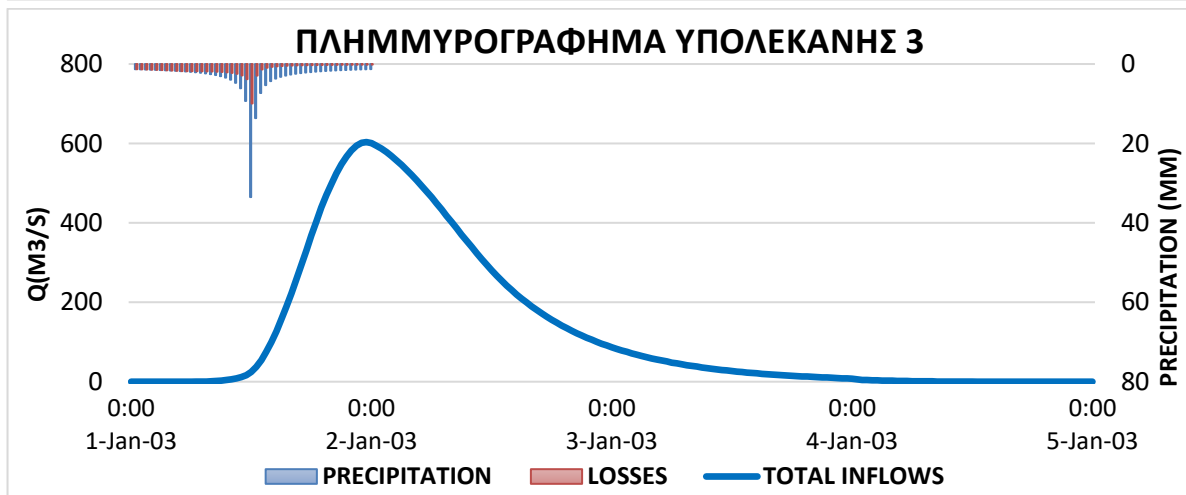
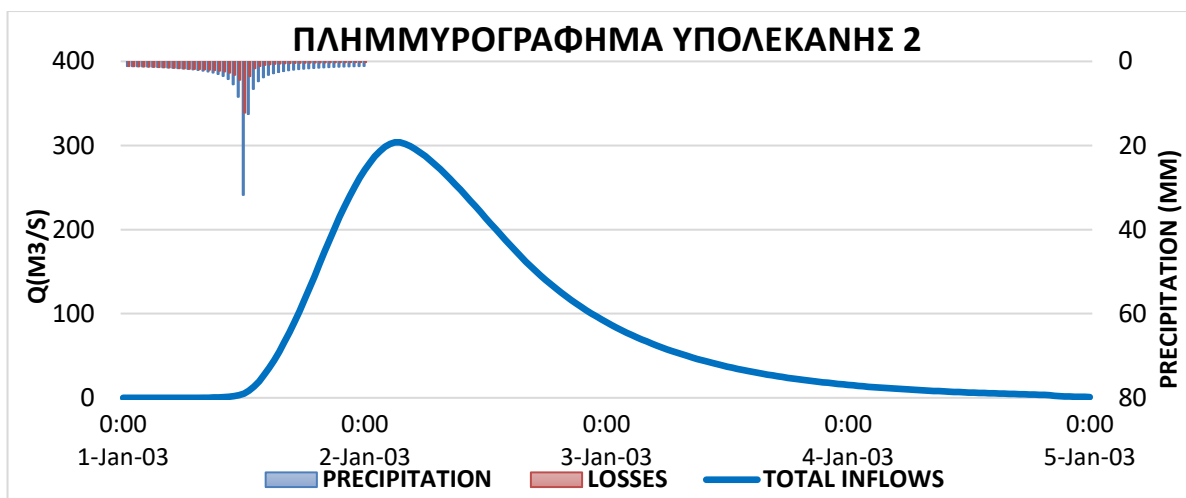
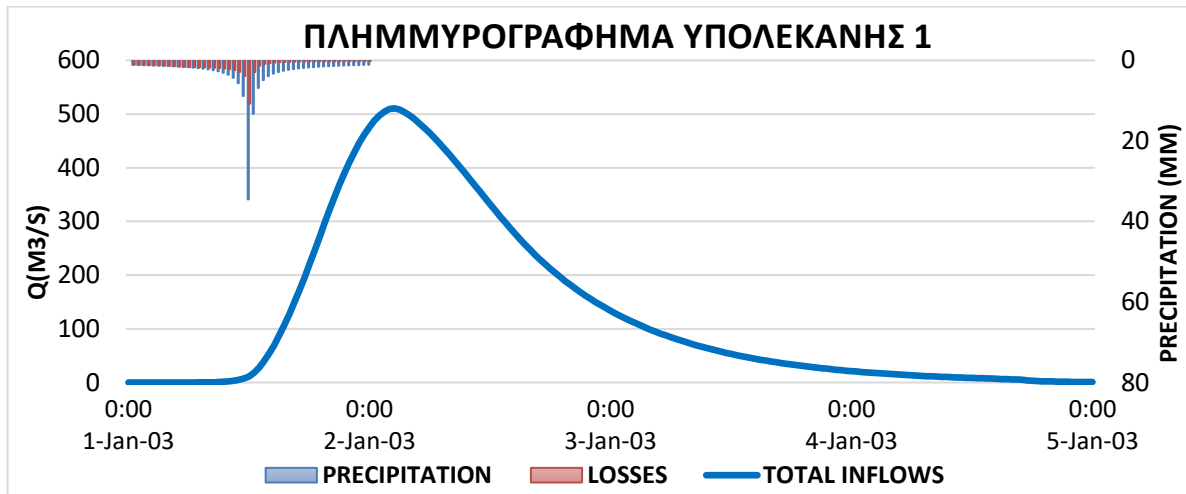
Εφόσον πραγματοποιήθηκαν οι ανάλογες τεχνικές φυσικές παρεμβάσεις σε κάθε υπολεκάνη, υπολογίσθηκαν ξανά οι χρόνοι συγκέντρωσης κατά Giandotti, δεδομένου ότι τροποποιήθηκαν τα αντίστοιχα μήκη των κεντρικών κλάδων των υδατορεμάτων κάθε λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6-17.

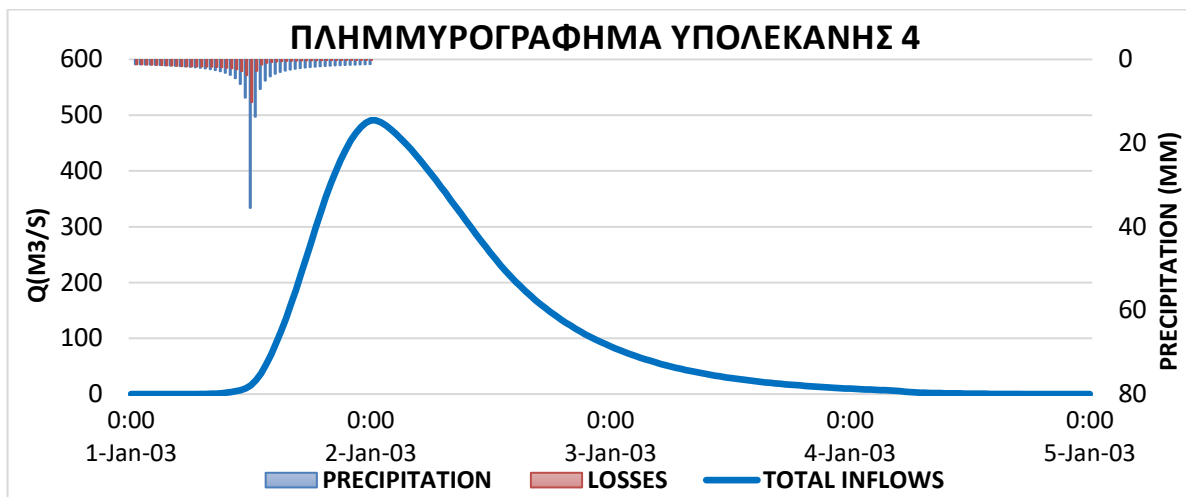
Πίνακας 6-17: Ενημερωμένες τιμές χρόνου συγκέντρωσης με εφαρμογή μεθόδων Φυσικών λύσεων

	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 1	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 2	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 3	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ 4
Χρόνος Συγκέντρωσης t_c (h) – ΧΩΡΙΣ NBS	7.65	4.95	6.12	6.57
Χρόνος Συγκέντρωσης t_c (h) – NBS	10.52	6.70	8.68	8.94

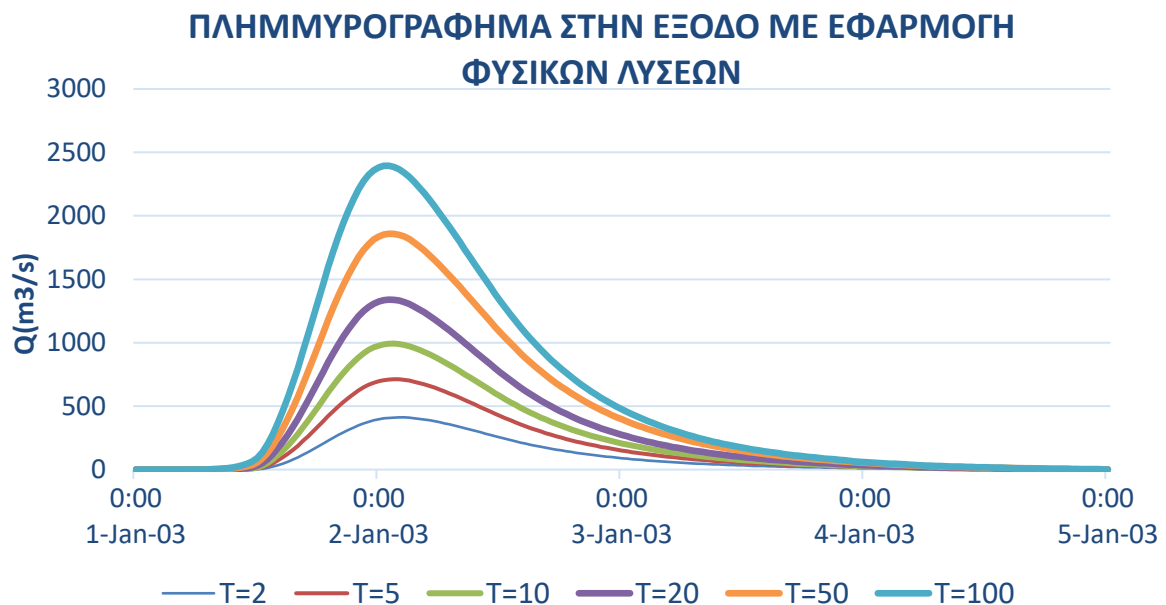
6.5.5 Πλημμυρογραφήματα Δενδροφύτευσης και Αποκατάστασης Μαιανδρισμών ποταμών

Μετά τον επανυπολογισμό των υδρογραφημάτων, λόγω εφαρμογής των δύο αρχικών μεθόδων Φυσικών λύσεων, προκύπτουν τα εξής διαφοροποιημένα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών (Σχήμα 6-33) καθώς και το συνολικό της ευρύτερης λεκάνης απορροής (Σχήμα 6-34). Αυτό που κρίνεται άμεσα άξιο αναφοράς είναι ότι παρατηρήθηκε μείωση των πλημμυρικών αιχμών, για κάθε περίοδο επαναφοράς της προσομοίωσης, κάτι που αιτιολογεί την ουσιαστική επίδραση των μεθόδων στην άμεση και την βασική απορροή εντός της λεκάνης απορροής.





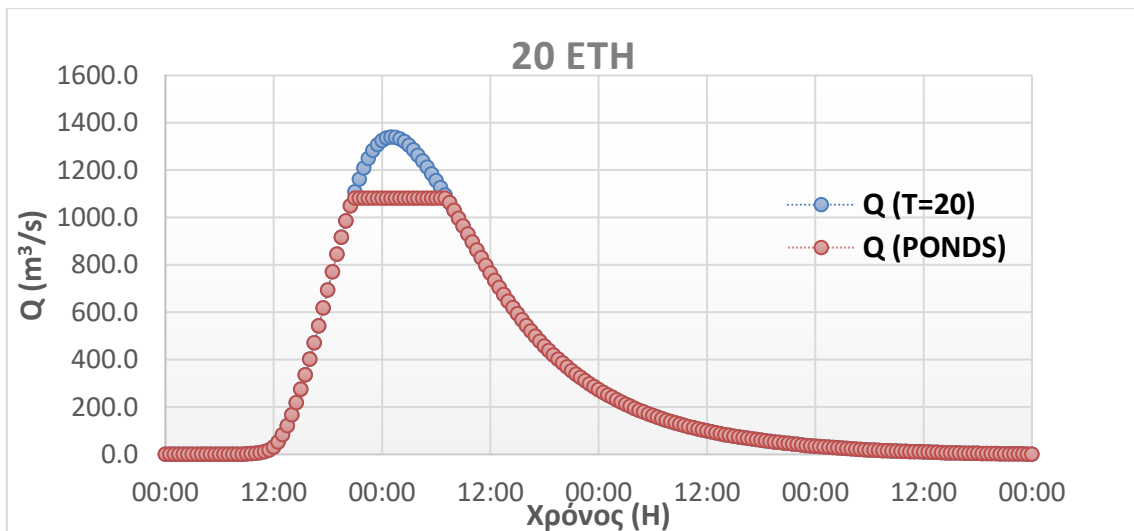
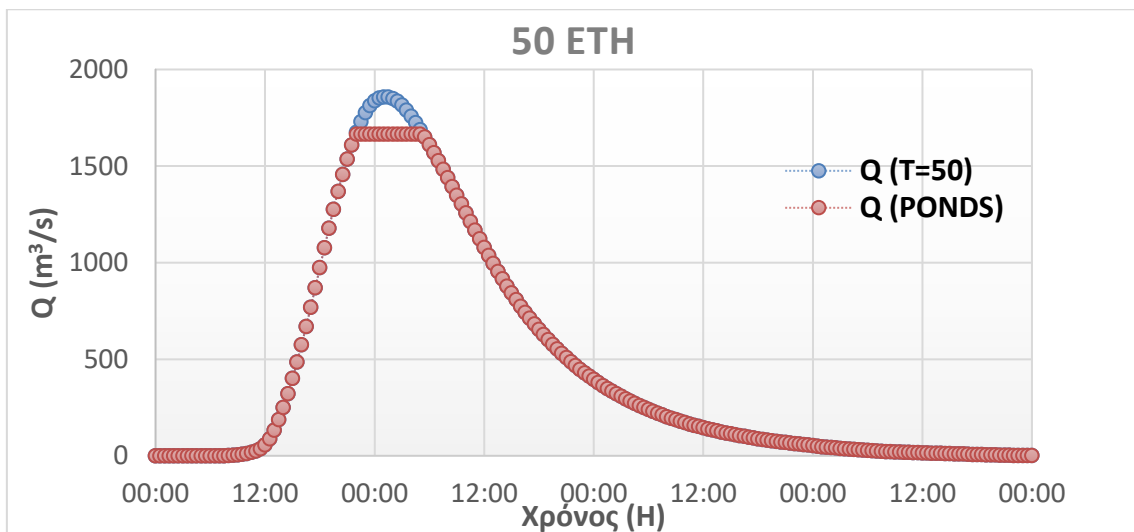
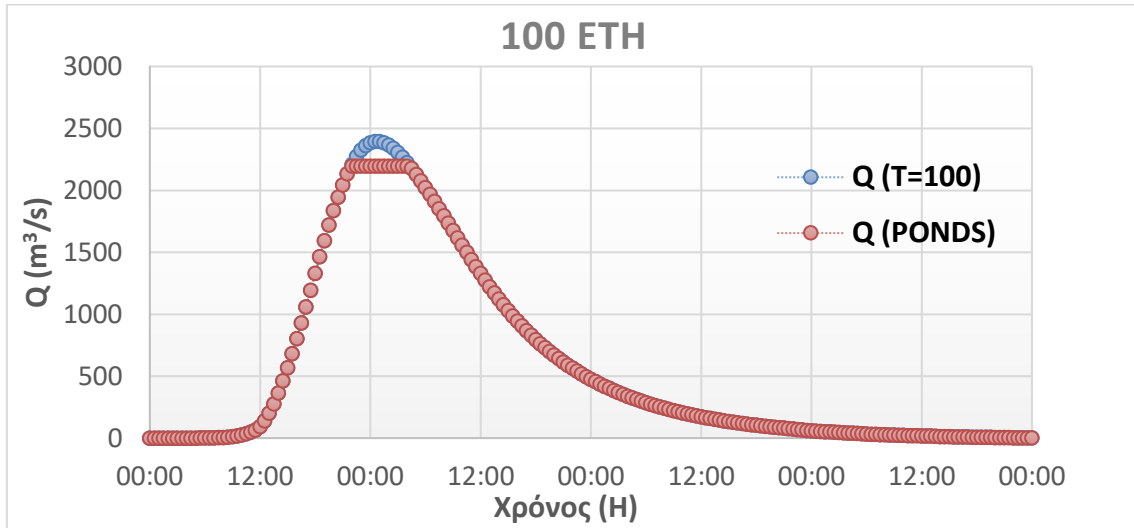
Σχήμα 6-33: Πλημμυρογραφήματα υπολεκανών με χρήση των τεχνικών NBS για T=50 έτη

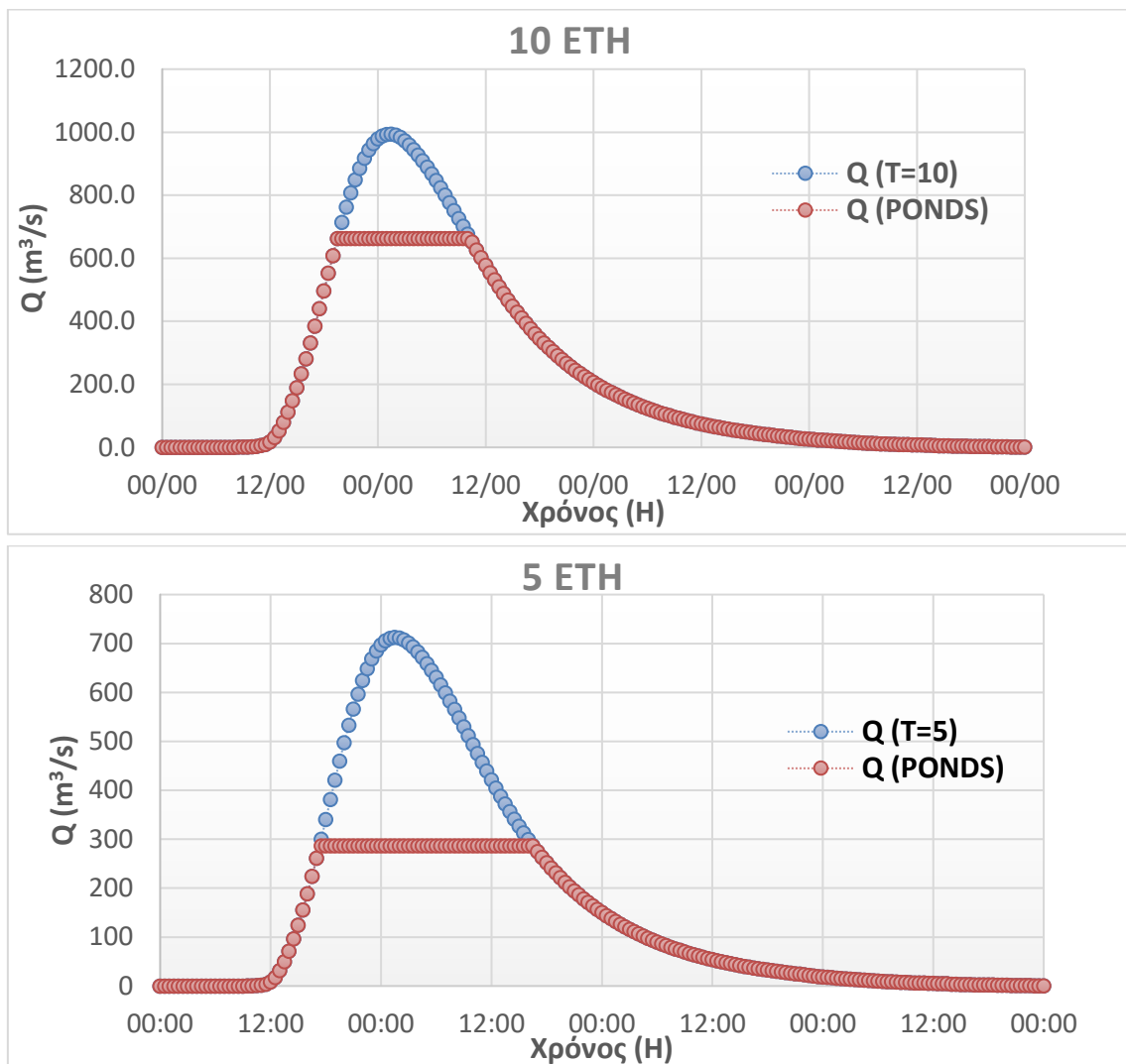


Σχήμα 6-34: Πλημμυρογράφημα διαφόρων περιόδων επαναφοράς με εφαρμογή Φυσικών λύσεων

6.5.6 Πλημμυρογραφήματα με επιπρόσθετη εφαρμογή μεθόδου λεκανών ανάσχεσης

Στην συνέχεια προβάλλονται τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των αρχικών μεθόδων Φυσικών λύσεων με μπλε χρώμα και με ερυθρό απεικονίζονται τα πλημμυρογραφήματα που υπολογίστηκαν με την επιπρόσθετη τοποθέτηση των δεξαμενών ανάσχεσης στην κοίτη και την όχθη του ποταμού Ευρώτα (Σχήμα 6-35).



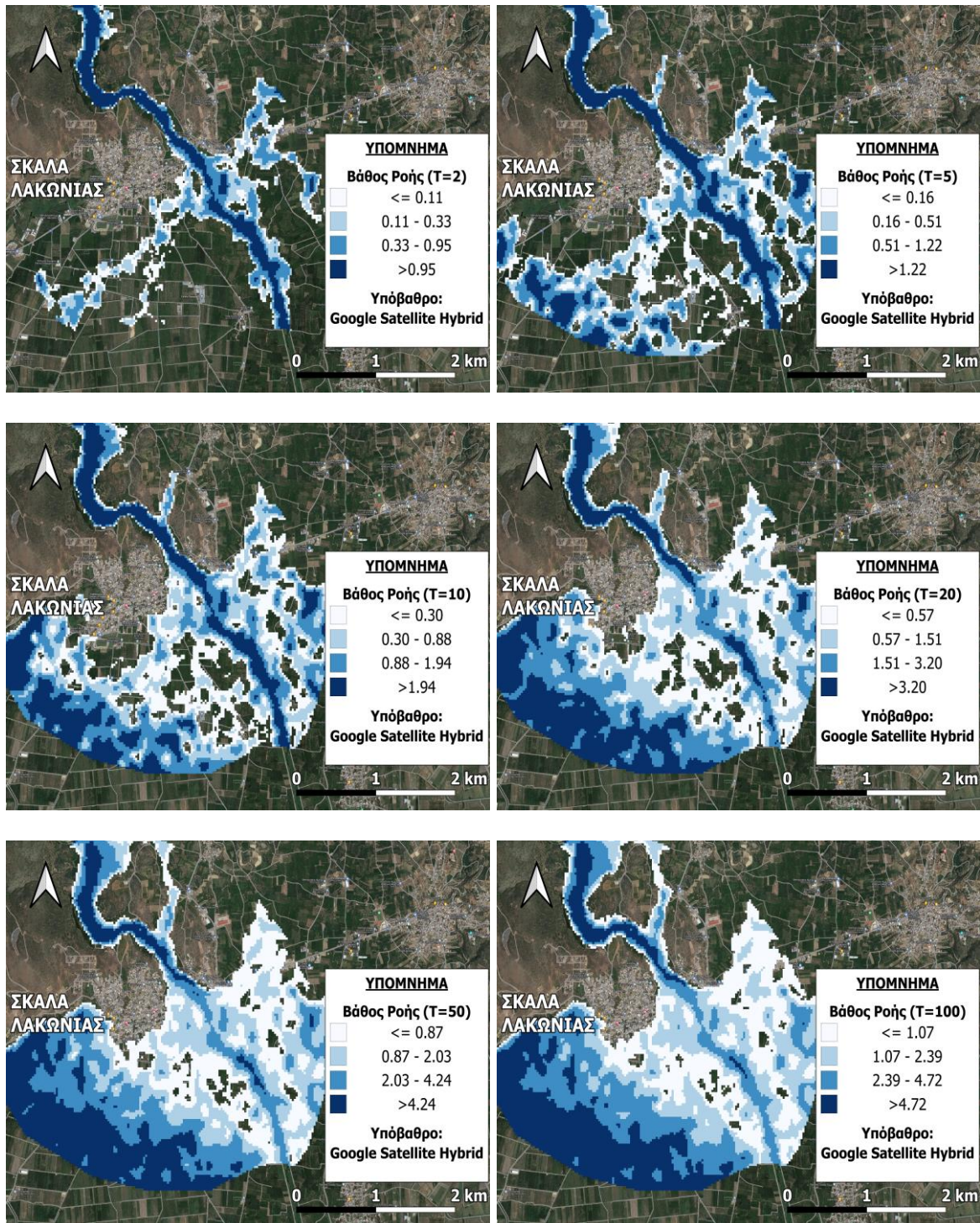


Σχήμα 6-35: Πλημμυρογραφήματα διαφόρων περιόδων επαναφοράς χωρίς και με την χρήση δεξαμενών ανάσχεσης

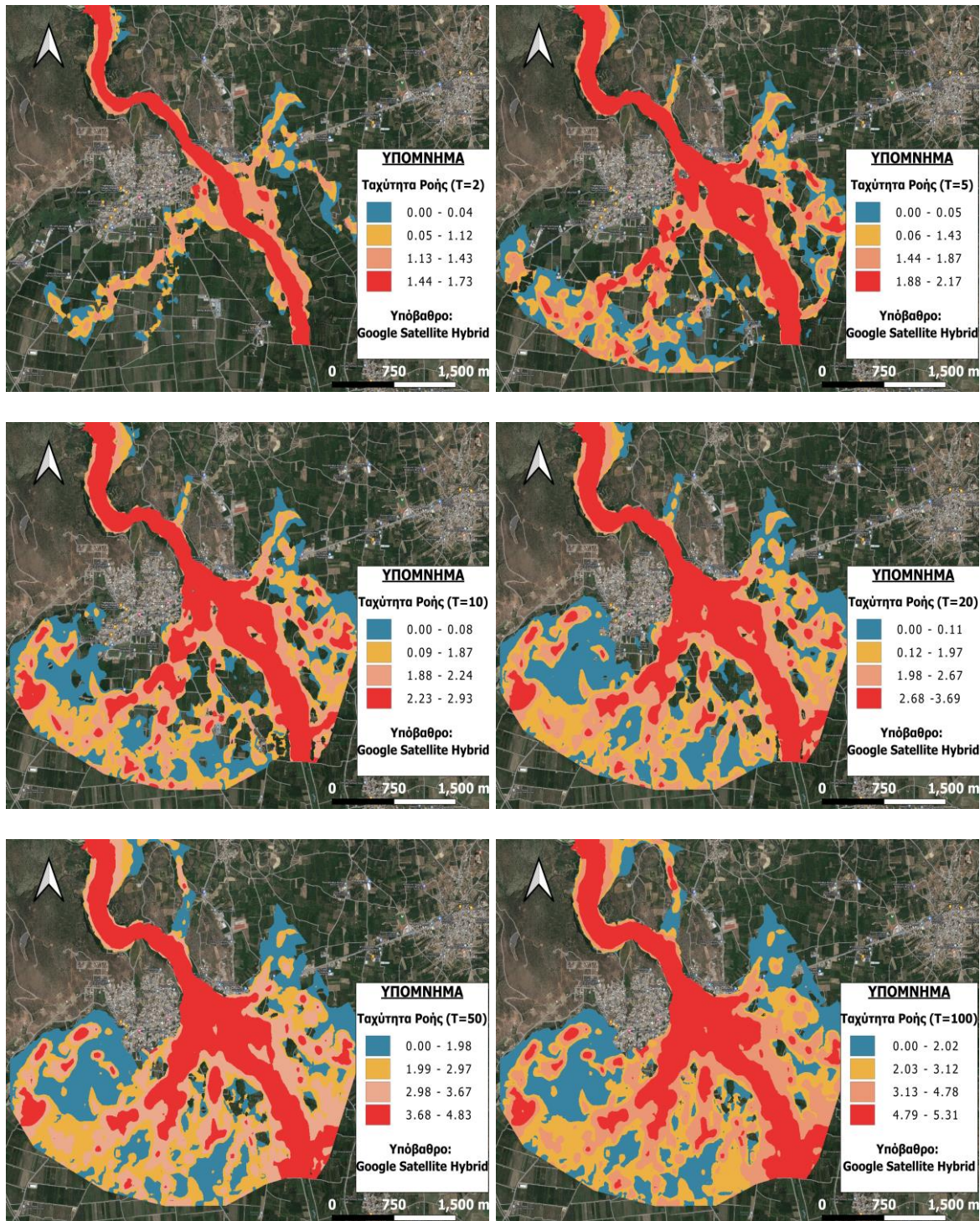
6.6 Χάρτες πλημμυρικού πεδίου

6.6.1 Προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών

Στο κεφάλαιο αυτό θα προβληθούν χάρτες που απεικονίζουν τις μεταβολές του βάθους ροής και της ταχύτητας ροής του πλημμυρικού πεδίου για βροχές διαφορετικών περιόδων επαναφοράς σε κάθε στάδιο της μελέτης. Αρχικά έλαβαν χώρα προσομοιώσεις, δεδομένων των υετογραφημάτων σχεδιασμού, που υπολόγισε η προγενέστερη μορφή όμβριων καμπυλών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-36 και στο Σχήμα 6-37.



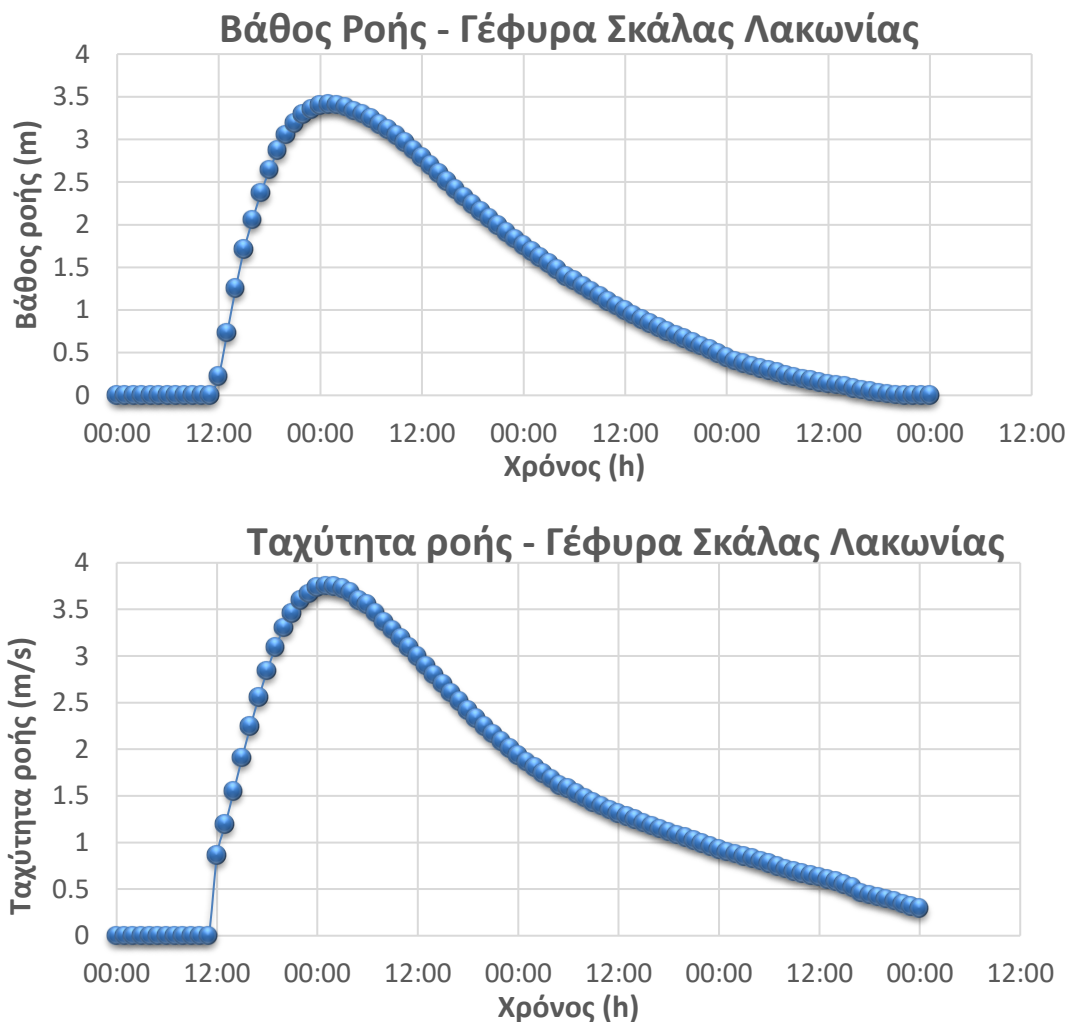
Σχήμα 6-36: Βάθη ροής πλημμυρικού πεδίου Σκάλας Λακωνίας διαφορετικών περιόδων επαναφοράς



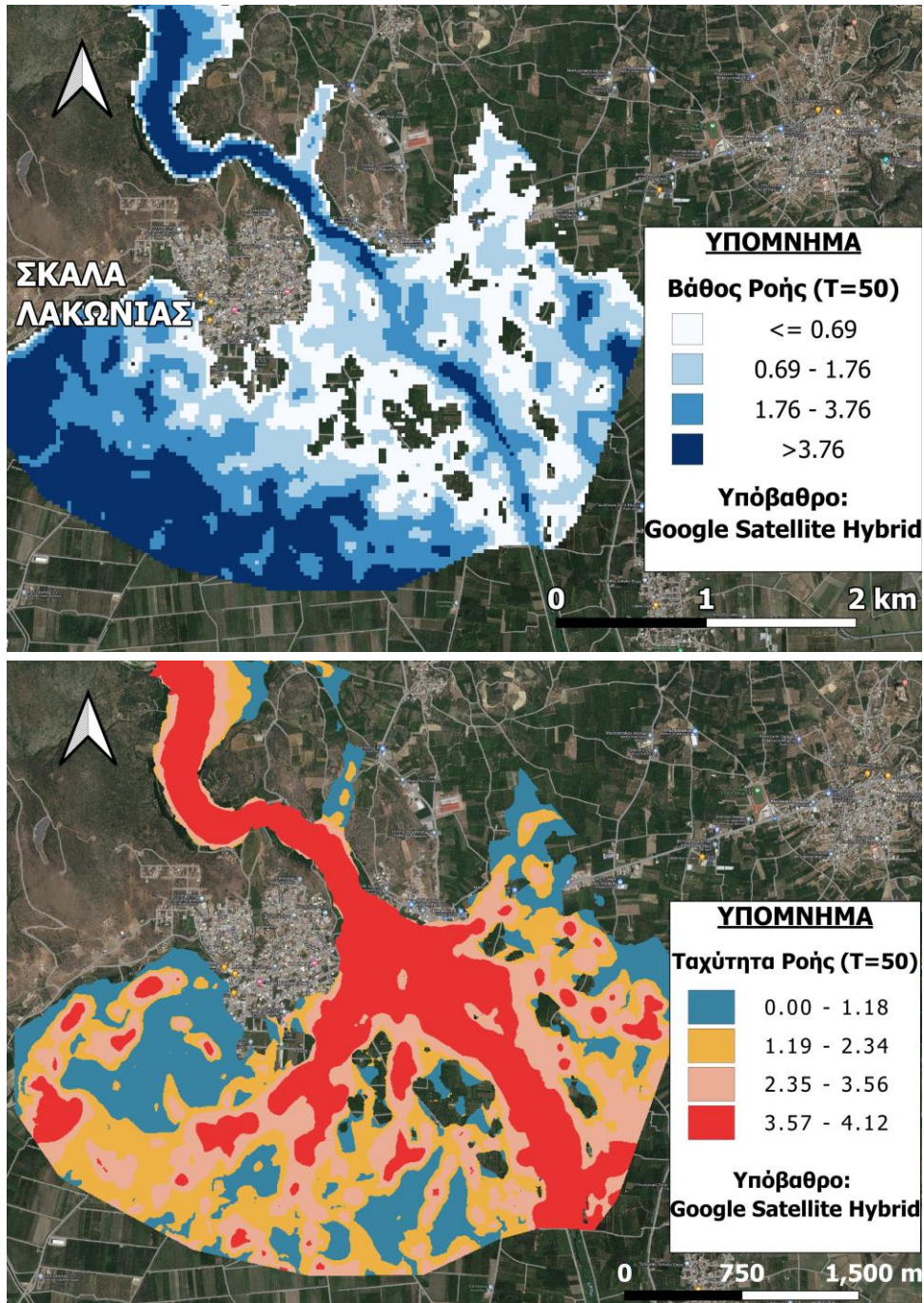
Σχήμα 6-37: Ταχύτητες ροής πλημμυρικού πεδίου Σκάλας Λακωνίας διαφορετικών περιόδων επαναφοράς

6.6.2 Επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες

Εφόσον εισάγουμε τα ενημερωμένα πλημμυρογράφηματα στο λογισμικό HEC-RAS λαμβάνουμε νέες πληροφορίες σχετικά με το βάθος ροής και την ταχύτητα ροής του πλημμυρικού πεδίου στη Σκάλα Λακωνίας. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο βάθος ροής για ένα πλημμυρικό επεισόδιο περιόδου επαναφοράς 50 ετών αγγίζει τα 3.76 m, ενώ η μέγιστη ταχύτητα ροής κυμαίνεται από 3.57 m/s – 4.12 m/s (Σχήμα 6-39). Επιπρόσθετα στο Σχήμα 6-38 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των δύο αυτών μεγεθών σημειακά στην γέφυρα της Σκάλας Λακωνίας.



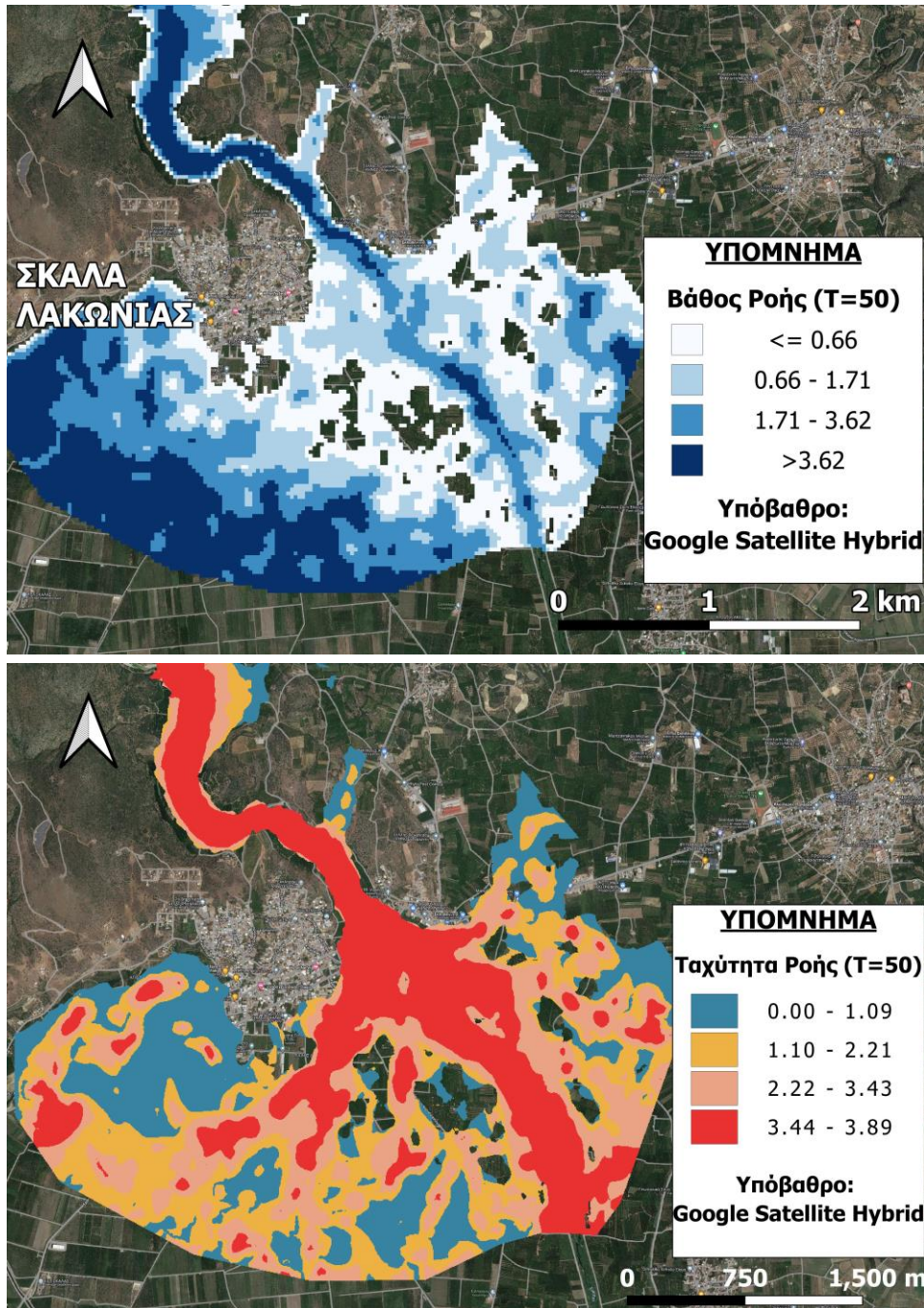
Σχήμα 6-38: Βάθος ροής και Ταχύτητα ροής στη γέφυρα της Σκάλας Λακωνίας για T=50 έτη



Σχήμα 6-39: Βάθος ροής και ταχύτητα ροής πλημμυρικού πεδίου βροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών

6.6.3 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων

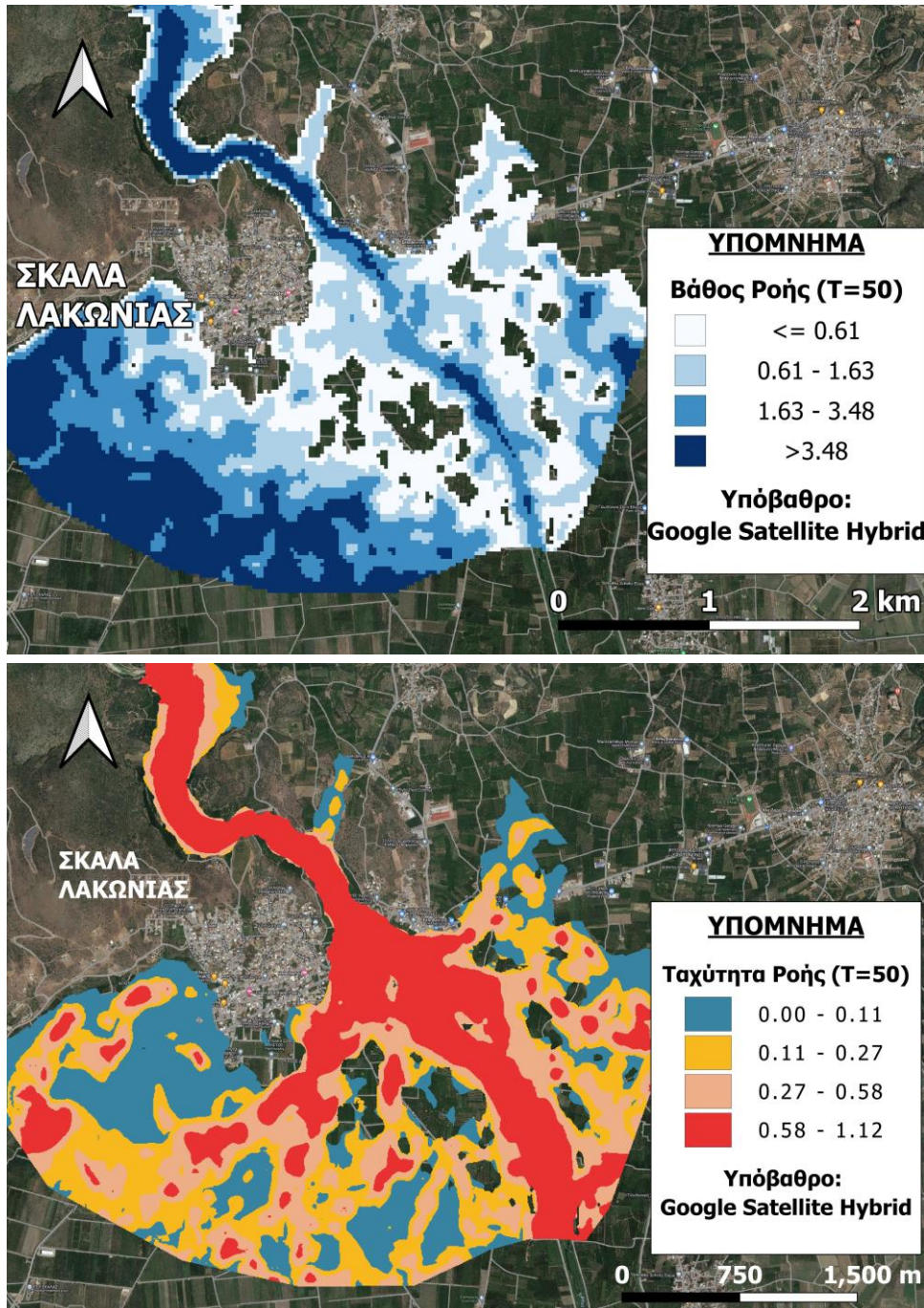
Ακολούθως, προβάλλονται οι χάρτες πλημμύρας στην περιοχή της Σκάλας Λακωνίας μετά την εφαρμογή των μεθόδων Φυσικών λύσεων τονίζοντας την μείωση που παρατηρήθηκε στο βάθος ροής και την ταχύτητα ροής αντίστοιχα (Σχήμα 6-40).



Σχήμα 6-40: Βάθος ροής και ταχύτητα ροής πλημμυρικού πεδίου βροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών κατόπιν εφαρμογής των δύο αρχικών μεθόδων Φυσικών λύσεων

6.6.4 Μέθοδοι Φυσικών λύσεων και Δεξαμενών Ανάσχεσης

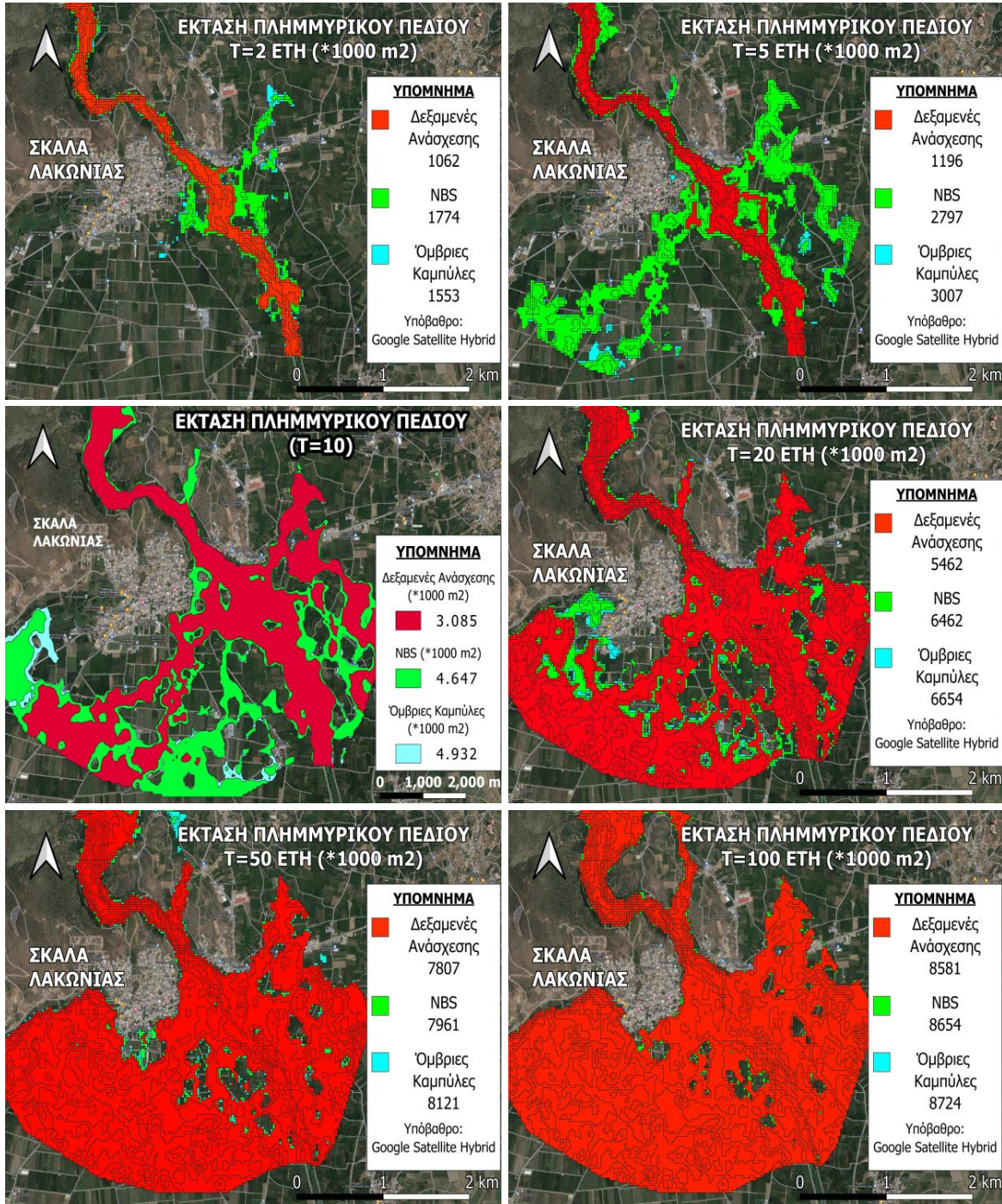
Τέλος, προβάλλεται η έκταση γης που κατακλύζεται κάθε φορά από πλημμυρικά ύδατα με την ταυτόχρονη χρήση των μεθόδων Φυσικών λύσεων και των δεξαμενών ανάσχεσης (Πίνακας 6-18, Σχήμα 6-42). Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 6-41 απεικονίζεται το βάθος ροής και η ταχύτητα ροής μετά την εφαρμογή της τεχνικής των δεξαμενών ανάσχεσης.



Σχήμα 6-41: Βάθος ροής και ταχύτητα ροής πλημμυρικού πεδίου βροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών κατόπιν κατασκευής δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών ροών

Πίνακας 6-18: Έκταση πλημμυρικού πεδίου χωρίς και με την εφαρμογή δεξαμενών ανάσχεσης

<u>ΕΚΤΑΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ</u>	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
ΧΩΡΙΣ PONDS (1000 m²)	1.475	2.684	4.647	6.462	7.962	8.655
ΜΕ PONDS (1000 m²)	1.063	1.196	3.085	5.899	7.807	8.581



Σχήμα 6-42: Μεταβολή προσομοιωμένης έκτασης πλημμυρικού πεδίου διαφόρων περιόδων επαναφοράς

6.6.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Συμπληρωματικά, προβάλλονται στον Πίνακα 6-19, οι μεταβολές των μεγεθών του πλημμυρικού όγκου, του μέσου βάθους ροής όπως και της μέσης ταχύτητας ροής, κατόπιν εφαρμογής όλων των μεθόδων Φυσικών λύσεων.

Πίνακας 6-19: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμύρας πριν και μετά την χρήση μεθόδων Φυσικών λύσεων

<u>ΝΕΕΣ ΟΜΒΡΙΕΣ</u>	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
ΟΓΚΟΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (1000 m³)	1.929	3.821	7.029	11.892	21.498	25.990
ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ (m)	0.15	0.29	0.53	0.9	1.63	1.97
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ (m/s)	0.11	0.16	0.22	0.3	0.39	0.46

<u>NATURE-BASED SOLUTIONS</u>	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
ΟΓΚΟΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (1000 m³)	1.821	3.550	6.361	11.025	20.463	25.513
ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ (m)	0.14	0.27	0.48	0.83	1.55	1.93
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ (m/s)	0.1	0.15	0.21	0.29	0.38	0.45

Στον Πίνακα 6-20 μας δίνεται η δυνατότητα να αξιολογήσουμε την αποδοτικότητα των δεξαμενών ανάσχεσης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με αυτά των προαναφερθέντων μεθόδων Φυσικών λύσεων που εφαρμόστηκαν.

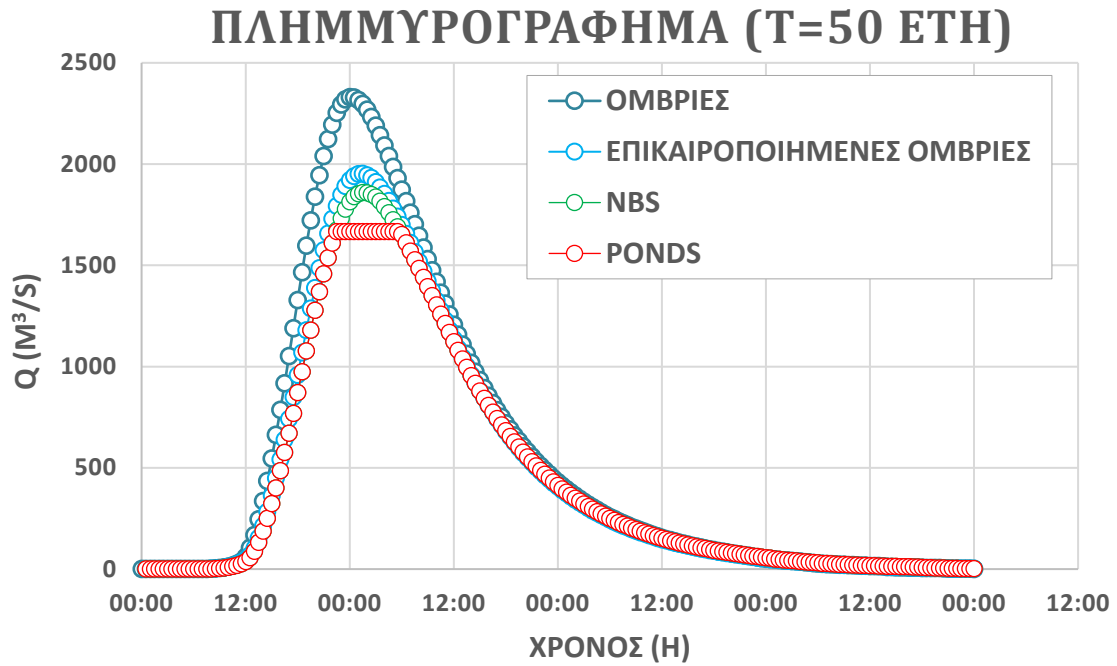
Πίνακας 6-20: Χαρακτηριστικά πλημμύρας μετά την τοποθέτηση δεξαμενών ανάσχεσης

<u>ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ</u>	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
ΟΓΚΟΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (1000 m³)	0	1.429	4.239	8.903	18.341	23.392
ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ (m)	0.1	0.11	0.28	0.65	1.46	1.87
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ (m/s)	0.08	0.09	0.15	0.23	0.36	0.43
ΜΕΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ (m³/s)	0	287	662	1.082	1.666	2.195
ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ (%)	100.0	59.8	33.4	19.2	10.4	8.3
ΗΕΣ -RAS / ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟΣ ΟΓΚΟΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (1000 m³)	0	1.869	4.539	9.453	19.232	24.762
ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΟΓΚΟΥ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (%)	100.0	47.4	28.6	14.3	6.0	2.9

Κρίνεται αξιοσημείωτο αναφοράς ότι ο όγκος απορροής των πλημμυρικών υδάτων μειώνεται σταδιακά μετά την χρήση των αρχικών μεθόδων Φυσικών λύσεων, ενώ με την τοποθέτηση των δεξαμενών ανάσχεσης παρατηρείται εντονότερη μείωση, κάτι που τονίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

6.7 Συγκριτική Αξιολόγηση μεθόδων – Τελικό πλημμυρογράφημα λεκάνης απορροής Ευρώτα ποταμού

Συμπερασματικά, παρουσιάζεται το συνολικό πλημμυρογράφημα (Σχήμα 6-43), υπολογισμένο στο ακριβές σημείο έδρασης της γέφυρας στη Σκάλας Λακωνίας, της συνολικής λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού όπως προέκυψε κατόπιν εφαρμογής των μεθόδων Φυσικών λύσεων. Γενικότερα, η επικαιροποιημένη σχέση των όμβριων καμπυλών σχεδιάζει μικρότερες παροχές αιχμής σε σχέση με την προηγούμενη μορφή της. Επιπρόσθετα, οι μέθοδοι Φυσικών λύσεων (NBS) που εφαρμόστηκαν προκάλεσαν μείωση της πλημμυρικής αιχμής του πλημμυρογραφήματος με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου υστέρησης και του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής. Τελικά, η μέθοδος δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων, κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικά την πλημμυρική παροχή αιχμής, αποθηκεύοντας και καθυστερώντας την απορροή αξιοσημείωτης ποσότητας υδάτων. Στον Πίνακα 6-21 παρουσιάζονται οι πλημμυρικοί όγκοι που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 6-43: Πλημμυρογράφημα λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα (T=50 έτη)

Πίνακας 6-21: Διαφοροποίηση παροχών σχεδιασμού και πλημμυρικών όγκων

	ΠΑΡΟΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ T=50 έτη (m ³ /s)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ	ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ T=50 έτη (1000m ³)
ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	2329.8		24.806
ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	1951.9	16%	21.498
ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (NATURE-BASED SOLUTIONS)	1859	20%	20.463
PONDS	1663.3	29%	19.232

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 Σύνοψη

Στην μελέτη αντιπλημμυρικής προστασίας που πραγματοποιήθηκε για τον Ευρώτα ποταμό, επί της περιοχής της Σκάλας Λακωνίας, παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι μέθοδοι Φυσικών λύσεων (Nature-Based Solutions) και εφαρμόστηκαν με στόχο τον κατευνασμό των πλημμυρικών φαινομένων. Η πλήρης γεωμορφολογική, υδρολογική και υδραυλική ανάλυση της λεκάνης απορροής του Ευρώτα αποτέλεσε μια σταθερή βάση πάνω στην οποία βρήκαν εφαρμογή οι τεχνικές αυτές. Προβλήθηκαν τα αποτελέσματα σε χάρτες, γραφήματα και πίνακες πριν και μετά την χρήση των μεθόδων Φυσικών λύσεων, τα κυριότερα των οποίων παρατίθενται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

7.2 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθούν τα σημαντικότερα, κατά την κρίση του γράφοντος, πορίσματα της εν λόγω μελέτης με στόχο την αποσαφήνιση αυτών στα πλαίσια μιας αντίστοιχης εφαρμογής στο ύπαιθρο. Αρχικά παρουσιάζονται οι τιμές των παροχών που υπολογίσθηκαν μετά το πέρας των υδραυλικών προσομοιώσεων, στην περιοχή της Σκάλας Λακωνίας, για υετογραφήματα σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Οι υπολογισμοί βασίσθηκαν στην γνωστή σχέση όμβριων καμπυλών μέχρι και σήμερα (εξίσωση 31), στη αντίστοιχη επικαιροποιημένη σχέση (εξίσωση 32) καθώς και στην επικαιροποιημένη σχέση με ταυτόχρονη εφαρμογή των μεθόδων Φυσικών λύσεων στο πεδίο.

Τονίζεται, ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιηθήκαν για όλες τις προαναφερθείσες περιόδους επαναφοράς (2, 5, 10, 20, 50 και 100 έτη) και αναλυτικοί πίνακες εμπεριέχονται στο συνοδευτικό αρχείο Excel της μελέτης. Ωστόσο, επιλέχθηκε να στραφεί η προσοχή του αναγνώστη στην πλημμυρική παροχή αιχμής περιόδου επαναφοράς των 50 ετών δεδομένου ότι αυτή ορίζεται από την Κ.Υ.Α. 140055/13-1-2017 περί οριοθέτησης υδατορεμάτων (ΦΕΚ 428/Β/2017).

Τα κυριότερα συμπεράσματα σταθμοί που απέρρευσαν μετά το πέρας της μελέτης είναι τα εξής:

- Διαμέσου της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης και λήψης αποφάσεων καταφέραμε αποτελεσματικά να εντοπίσουμε τις τρωτές περιοχές, έναντι πλημμυρικών φαινομένων, του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03) εκ των οποίων συγκαταλέγεται και η κωμόπολη της Σκάλας του νομού Λακωνίας. Ως περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου αναγνωρίστηκαν επίσης οι πόλεις Άργος (Ίναχος ποταμός), Γύθειο (Πλατύς ποταμός / Αρδελολάγκαδο ρέμα), Σπάρτη (Ευρώτας ποταμός), Άστρος Κυνουρίας (Τάνος ποταμός) και ο οικισμός Ίρια (Ράδος ποταμός).
- Εφαρμόζοντας τα μοντέλα βροχής – απορροής ΜΥΓ κατά Snyder, ΜΥΓ κατά SCS και Ισόχρονων Καμπυλών καταλήγουμε στο ασφαλές συμπέρασμα ότι το μοντέλο της Soil Conservation Service υπολογίζει τις πλέον ευμενέστερες τιμές παροχών αιχμής, με την μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών να ακολουθεί και το ΜΥΓ κατά Snyder να υπολογίζει τις δυσμενέστερες αυτών.
- Οι επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες σχεδίασαν ευμενέστερες βροχοπτώσεις συγκριτικά της προγενέστερης μορφής αυτών. Σημειώθηκε μείωση ύψους βροχής έως **16%**.
- Δεδομένης της επικαιροποιημένης σχέσης υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης λεκάνης απορροής κατά Giandotti σημειώθηκε έντονη μείωση του χρόνου έως **28 %**.
- Οι μέθοδοι Φυσικών λύσεων έναντι των πλημμυρικών φαινομένων, αποτελούν μια φιλική προς το περιβάλλον ανθρώπινη παρέμβαση, δεδομένου ότι προσομοιώνουν τις φυσικές λειτουργίες των οικοσυστημάτων.
- Η αποτελεσματικότητα αυτών των τεχνικών αυξάνεται ραγδαία με την ταυτόχρονη εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων επί της λεκάνης απορροής, αποφεύγοντας τις μεμονωμένες υλοποιήσεις αυτών. Συμπληρωματικά, κρίνονται αποδοτικότερα όταν διαδραματίζουν ρόλο προληπτικό, επεμβαίνοντας σε μια υδρολογική λεκάνη, με στόχο την τροποποίηση του χρόνου συγκέντρωσης και την εξασθένηση της πλημμυρικής αιχμής. Τέλος, απαιτείται μεγάλη έκταση για την εφαρμογή τους και εφαρμόζονται κατά κόρον σε μικρότερα υδατορέματα καθώς αξιοποιούνται ταυτόχρονα και ως αντιδιαβρωτικά έργα.

- Μετά την εφαρμογή των μεθόδων Φυσικών λύσεων σημειώθηκε μείωση **5%** της πλημμυρικής αιχμής, βάση της σχέσης των επικαιροποιημένων όμβριων καμπυλών, καθώς και μειώσεις στα βάθη ροής και στις ταχύτητες ροής της πλημμύρας. Συγκεκριμένα το βάθος ροής σημείωσε μείωση της μέγιστης τιμής του από 3.76 m στα 3.62 m, ενώ για την ταχύτητα ροής παρατηρήθηκε μείωση από τα 4.12 m/s στα 3.89 m/s. Με την τοποθέτηση των δεξαμενών ανάσχεσης οι τιμές άγγιξαν τα 3.48 m για το βάθος ροής ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ροής μειώθηκε αξιοσημείωτα στα 1.12 m/s. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι μέθοδοι δενδροφύτευσης επί της λεκάνης απορροής και αποκατάστασης μαιανδρισμών χρειάστηκαν **27.14 Km²** επιφάνειας και **8.53 Km** μήκους κοίτης ποταμού αντίστοιχα. Το χρονικό διάστημα που συμβαίνει η πλημμυρική αιχμή αυξήθηκε, γεγονός που λειτουργεί αρκετά ευεργετικά όσον αφορά στην μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης.
- Οι δεξαμενές ανάσχεσης κρίθηκαν πολύ περισσότερο αποδοτικές για πλημμυρικά επεισόδια μικρών περιόδων επαναφοράς (2,5,10,20 έτη), δεδομένου ότι στις μεγάλες περιόδους (50,100 έτη) σημειώθηκε μικρότερο ποσοστό μείωσης των πλημμυρικών αιχμών. Ειδικότερα, η μέθοδος απαιτεί μικρότερη επιφάνεια εφαρμογής συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους Φυσικών λύσεων, επιτυγχάνοντας αποθήκευση και επιβράδυνση **2.121.615 m³** πλημμυρικών υδάτων σε μόλις **1.06 Km²** εδαφικής έκτασης, προς μείωση **10%** της πλημμυρικής αιχμής συνολικά στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Τέλος, ο γραφών προτείνει ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα όπου φιλοδοξεί να αποτελέσουν το έναυσμα προς ενασχόληση από νέες μελέτες αντιπλημμυρικής προστασίας.

- Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων Φυσικών λύσεων σε μικρότερες λεκάνες απορροής και μικρότερου μήκους υδατορέματα.
- Η προσομοίωση διαφορετικών μεθόδων Φυσικών λύσεων μέσω μοντέλων ηλεκτρονικού υπολογιστή.
- Εφαρμογή και αποδοτικότητα των μεθόδων Φυσικών λύσεων σε αστικό περιβάλλον προς μείωση των καταστροφών από πλημμύρες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- ABUD Mérnökiroda Kft., (<https://abud.hu/nature-based-solutions-in-architecture-urban-planning-part-1-building-with-nature-a-need-or-an-obligation/>)
- Adam Mubeen, Arlex Sanchez Torrez & Laddaporn Ruangpan & Jasna Plavšić, 2020, Planning and Suitability Assessment of Large-scale Nature-based Solutions for Flood-risk Reduction, (<s11269-021-02848-w.pdf>)
- American Rivers, 2016, Reconnecting Rivers to Floodplains, Washington DC
- Baan P. J. A. & Klijn F., 2004, Flood risk perception and implications for flood risk management in the Netherlands, Int. J. River Basin Manag, 2, 113 – 122, (<https://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635226>)
- Bill Leber, 2015, Stormwater Basins: How Detention and Retention Ponds Work, (<https://info.wesslerengineering.com/blog/stormwater-basins-detention-retention-ponds>)
- Bournas A, Baltas E, 2022, Examination of retention ponds design volume and impact in reducing the flood inundation area. In: 16th Protection and Restoration of the Environment (PRE) Conference. Kalamata, Greece, p 7
- Bournas Apollon, 2023, Development and Implementation of a Methodological Framework for Early Warning of Intense Floods using Innovative Technologies, PhD Thesis, National Technical University of Athens, Athens
- Catchment Based Approach, What is Natural Flood Management, Europe, (<https://catchmentbasedapproach.org/learn/what-is-natural-flood-management/>)
- California Department of Transportation, 2020, Detention Basins, Sacramento
- Christos Spyrou, Michael Loupis, Angeliki Mentzafou, George Varlas, Nikos Charizopoulos, Ilektra Apostolidou, Anastasios Papadopoulos, Lamprini Gkeka, Paul Bowyer, Susanne Pfeifer, Sisay E. Debele, Elias Dimitriou, Depy Panga, and PrashantKumar, 2021, Evaluating Nature-Based Solution for Flood Reduction in Spercheios River Basin under Current and Future Climate Conditions, (<sustainability-13-03885.pdf>)
- Debele, Sisay and Sahani, Jeetendra and Alfieri, Silvia Maria and Bowyer, Paul and Charizopoulos, Nikos and Loupis, Michael and Menenti, Massimo and Renaud, Fabrice and Aminur Rahman Shah, Mohammad and Spyrou, Christos and Zieher, Thomas and Di Sabatino, Silvana and Kumar, Prashant, Evaluating nature-based solutions in a non-stationary climate with changing risk of flooding, EGU General Assembly Conference Abstracts, 2021, EGU General Assembly Conference Abstracts, apr, EGU21-8012, EGU21-

8012,10.5194/egusphere-egu21-8012,

(<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021EGUGA..23.8012D>), Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System

- Eden Rivers Trust, Leaky Dams, England, (<https://www.edenriverstrust.org.uk/your-eden/explore-edens-rivers/leaky-dams/>)
- Esri, ArcGIS Pro Geoprocessing tool reference, (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>)
- Esri, An overview of the Hydrology toolset, (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>)
- European Environment Agency, 2018, Updated CLC illustrated nomenclature guidelines, Austria
- European Commission, 2020, Nature-Based Solutions State of the Art in EU-funded Projects, Luxembourg
- Francesco Pugliese, Gerardo Caroppi, Aude Zingraff-Hamed, Gerd Lupp, Carlo Gerundo, 2021, Assesment of NBS effectiveness for flood risk management: The Isar River case study, (iwaponline.com)
- George Mitsopoulos, Apollon Bournas, Aimilia Theochari, Michalis Diakakis, Aristeidis Bloutsos, Efthymios Lekkas, Evangelos Baltas and Anastasios I. Stamou, 2023, Flood Risk Reduction using Nature-Based Solutions in Climate Change Conditions, National Technical University of Athens, Greece
- Güneralp I, Marston R, 2012, Process–form linkages in meander morphodynamics. Progress in Physical Geography 36:. <https://doi.org/10.1177/0309133312451989>
- HEC-HMS Technical Reference Manual, SCS Unit Hydrograph Model, (<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/transform/scs-unit-hydrograph-model>)
- India's Lifelines, How Trees Reduce Flood and Droughts, Rallye for Rivers, (https://isha.sadhguru.org/rally-for-rivers/how-trees-reduce-flooddroughts/?gclid=CjwKCAjw5MOIBhBTEiwAAj8e1sTOPsht1I6Hx0qYSKSlzn002Wj2Ovo-UNssK3aOa0F4u6Yq3j7dGhoC4v0QAvD_BwE), India
- Keiko Hori, Tomomi Saito, Osamu Saito, Shizuka Hashimoto, Kentaro Taki, Takehito Yoshida, Katsue Fukamachi, Chiho Ochiai, Factors motivating residents of flood-prone areas to adopt nature-based solutions for flood-risk reduction, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 97, 2023, 103962, ISSN 2212-4209, (<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103962>).

- Kuriqi, A., Hysa, A. (2021), Multidimensional Aspects of Floods: Nature-Based Mitigation Measures from Basin to River Reach Scale, In: Ferreira, C.S.S., Kalantari, Z., Hartmann, T., Pereira, P. (eds) Nature-Based Solutions for Flood Mitigation, The Handbook of Environmental Chemistry, vol 107. Springer, Cham, (https://doi.org/10.1007/698_2021_773)
- MeandersRestoration, (http://www.extranet.vdot.state.va.us/locdes/hydraulic_design/nchrp_rpt_544/content/html/Meander_Restoration/Meander_Restoration.html)
- Mimikou MA, Baltas EA, Tsihrintzis VA, 2016, Hydrology and water resource systems analysis. CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, Boca Raton
- Richard Ashley, Berry Gersonius, Bruce Horton, 2020, Managing flooding: from a problem to an opportunity, The Royal Society
- River Restoration Program Spring, 2016, Reconnecting Rivers to Floodplains, (https://www.americanrivers.org/wp-content/uploads/2016/06/ReconnectingFloodplains_WP_Final.pdf)
- Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M. P., McClain, M. E., and Lopez-Gunn, E.: Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 243–270, (<https://doi.org/10.5194/nhess-20-243-2020>, 2020)
- Saskia Keesstra, Joao Nunes, Agata Novara, David Finger, David Avelar, Zahra Kalantari, Artemi Cerdà, The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services, Science of The Total Environment, Volumes 610–611, 2018, Pages997-1009, ISSN00489697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717320752>)
- Scottish Environment Protection Agency, August 2020, Sustainable Riverbank Protection- Reducing Riverbank Erosion, Scotland
- Taylor, M., & Clarke, 2021, Monitoring the impact of leaky barriers used for natural flood management on three river reaches in the Stroud Frome and Twyver catchments, Gloucestershire, UK
- Ternell, A., Stigson, P., Elmqvist, B., Olsson, J. A., Hanson, H., & Nilsson, A. M. (2020), Financial instruments for nature-based solutions to reduce the risks of flooding and drought, Ecocycles, 6(1), 110–133, (<https://doi.org/10.19040/ecocycles.v6i2.161>)
- Thames 21, 2021, Natural Flood Management - Leaky Woody Barrier Installation Guide, (<https://www.thames21.org.uk/uploads/2021/03>)
- The River Restoration Centre, Meanders Restoration, Cranfield University

- The Heart of England Forest, 2021, Trees and Natural Flood Management, (<https://heartofenglandforest.org/news/trees-and-natural-flood-management>), Stratford
- Thomas Hartmann, Lenka Slavikova, Simon McCarthy, 2019, Nature-Based Flood Risk Management on Private Land, Springer Open Switzerland
- Tyler Baumbach, Suzette R. Burckhard, Joanita M. Kant, 2015, Watershed Modelling Using Arc Hydro Tools. GeoHMS and HEC-HMS, South Dakota State University
- World Bank Nature-Based Solutions Program, 2018, Nature-Based Solutions For Disaster Risk Management

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Αργολικές Ειδήσεις, 2019, Χάραδρος: Ο ιστορικός "Ξεριάς" του Άργους (άγνωστες πτυχές της ιστορίας του), (https://www.argolikeseidhseis.gr/2014/09/blog-post_509.html)
- Βαφειάδης Μάριος, 2014, Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- Βαφειάδης Μάριος, 2001, Χρόνος Συγκεντρώσεως, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- Βαφειάδης Μάριος, 2004, Υδρογραφήματα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- Γκετμάνοβα Αναστασία, 2020, Πολυκριτηριακή ανάλυση σε περιβάλλον GIS για την επιλογή κατάλληλης θέσης εγκατάστασης Φ/Β πάρκου στη Νήσο Ζάκυνθο, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Χανιά
- Ελληνικό Δίκτυο Δήμων με Ποτάμια, (<https://rivers.gr/δημοσ-σπαρτησ/>), Τρίκαλα
- Ελληνικό Κτηματολόγιο, Αναζήτηση διαθεσιμότητας - πωλήσεις Αεροφωτογραφιών, (<https://gis.ktimanet.gr/gis/apr/>)
- Elpida Panagiotatou, 2021, River Ecosystem Management, Athens
- Καραπλή Φωτεινή, 2016, Μελέτη υπογείων νερών και εδαφών περιοχής Σκάλας Λακωνίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μάρης Π. Φώτιος, Υδρολογικές απώλειες στο έδαφος, Τεχνική Υδρολογία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη
- Μπαλτάς Ευάγγελος, Θεοχάρη Αιμιλία, Εκτίμηση Πλημμυρικά Ευάλωτων Περιοχών και βέλτιστη χωροθέτηση υδρομετεωρολογικών - υδρομετρικών σταθμών με χρήση μεθόδων GIS και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

- Μπαλτάς Ευάγγελος, Μπουρνάς Απόλλων, Γεωμορφολογική ανάλυση λεκάνης απορροής χρησιμοποιώντας εργαλεία GIS, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μπαλτάς Ευάγγελος, Μπουρνάς Απόλλων, Εφαρμογή Ισόχρονων Καμπυλών στο Λογισμικό Arc-GIS, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μπαλτάς Ευάγγελος, Υδρολογία Πλημμυρών, Εκτίμηση αιχμών απορροής και Μοναδιαία Υδρογραφήματα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μπαλτάς Ευάγγελος, 2015-2016, Υδρομετεωρολογία, Κατακρήμνιση - Μέρος Ι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μπαλτάς Ευάγγελος, 2015-2016, Υδρομετεωρολογία, Κατακρήμνιση - Μέρος ΙΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Πλύτρα, Δήμος Μονεμβασιάς, (<https://www.plytra.gr/index.php/nomos-lakonias/morfologia>), Νομός Λακωνίας
- Ροντήρης Γεώργιος, 2021, Σχεδιασμός και μαθηματική προσομοίωση δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Συγγούνα Βασιλική, 2022, Τεχνική Υδρολογία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα
- Τατάκης Άγγελος, 2018, Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση GIS στην χωροθέτηση καλλιεργήσιμης έκτασης στην ευρύτερη περιοχή της Σάμου, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Καρλόβασι
- Τσακίρης Γ., 2013. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Εκδόσεις Συμμετρία
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018-2019, Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, (https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=261&Itemid=749)
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018-2019, Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών, Εγκεκριμένα Σχέδια Διαχείρισης ΛΑΠ – 1^η Αναθεώρηση, (ypeka.gr)