

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**Εκτίμηση πλημμυρικού  
κινδύνου και διερεύνηση της  
στερεομεταφοράς στον  
Πηνειό ποταμό Ηλείας**

**Διπλωματική  
Εργασία**

**Κατερίνα Ρεκλείτη**

**Επιβλέπων:  
Ευάγγελος Μπαλτάς,  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Οκτώβρης 2022**

*“Κι ήθελε ακόμη πολύ φως να ξημερώσει,  
όμως εγώ δεν παραδέχτηκα την ήττα.”*

*Μ. Αναγνωστάκης, Τα ποιήματα 1941-1971, Στιγμή*

Copyright © Katerina Rekleiti, 2022. All rights reserved.

# Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
Ευρετήριο Σχημάτων .....	viii
Ευρετήριο Πινάκων.....	x
ABSTRACT.....	xii
EXTENDED SUMMARY.....	xiii
INTRODUCTION .....	xiii
MATERIALS AND METHODS .....	xiii
Study Area .....	xiii
Hydrological and Hydraulic Analysis.....	xv
Soil Erosion and Sediment Yield .....	xx
RESULTS AND DISCUSSION.....	xxviii
List of Figures .....	xxxiii
List of Tables .....	xxxiv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Νομικό Πλαίσιο-Οδηγία 2007/60 .....	1
1.2 Αξιολόγηση τρωτότητας σε διάβρωση εδαφών .....	3
1.3 Αντικείμενο Εργασίας .....	4
1.4 Διάρθρωση Εργασίας .....	4
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	7
2.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά .....	7
2.1.1 Γεωγραφικά και μορφολογικά στοιχεία .....	7
2.1.2 Γεωλογία και Υδρογεωλογία .....	8
2.1.3 Κλιματικά στοιχεία .....	9
2.1.4 Συστήματα Επιφανειακών Υδάτων .....	12
2.2 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά .....	15
2.2.1 Διοίκηση .....	15
2.2.2 Πληθυσμός .....	16
2.2.3 Οικονομία .....	17
2.2.4 Περιοχές Natura .....	17
2.2.5 Χρήσεις Γης.....	19
2.3 Ιστορικό πλημμυρών και κατολισθήσεων .....	21

3.ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	27
3.1 ArcGIS 10.5.1 .....	27
3.2 HEC-GeoHMS 10.5.....	28
3.3 HEC-HMS 4.9 .....	28
3.4 HEC-RAS 6.2.....	29
4.ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ-ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	31
4.1 Γεωμορφολογική ανάλυση .....	31
4.2 Υετογράφημα .....	32
4.2.1 Όμβριες Καμπύλες .....	32
4.2.2 Επιφανειακή Αναγωγή σημειακών υψών βροχής .....	35
4.2.3 Καταιγίδα Σχεδιασμού .....	37
4.3 Αριθμός Καμπύλης Απορροής CN.....	38
4.4 Υδρολογικά Ελλείμματα.....	41
4.4.1 Η μέθοδος του δείκτη φ .....	41
4.4.2 Η μέθοδος SCS-CN .....	41
4.5 Μοναδιαίο Υδρογράφημα .....	42
4.5.1 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder .....	42
4.5.2. Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS.....	43
4.5.3 Μέθοδος των Ισόχρονων Καμπυλών .....	44
4.6 Εφαρμογή σε περιβάλλον HEC-HMS .....	47
4.7 Υδραυλική Προσομοίωση .....	49
5.ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ .....	52
5.1 Μοντέλο RUSLE .....	54
5.1.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R.....	55
5.1.2 Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K.....	62
5.1.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS.....	65
5.1.4 Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης C.....	68
5.1.5 Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης P.....	69
5.2 Μέθοδος Gavrilovic.....	71
5.2.1 Συντελεστής θερμοκρασίας T.....	72
5.2.2 Παράμετρος διάβρωσης Z.....	73
5.3 Στερεοαπορροή.....	79
5.3.1 Συντελεστής Στερεοαπορροής SDR.....	79

5.3.2 Συντελεστής Κατακράτησης R .....	81
5.3.3 Σχέση Κουτσογιάννη - Ταρλά .....	81
6.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	83
6.1 Υδρολογική Ανάλυση .....	83
6.2. Υδραυλική Προσομοίωση .....	85
6.3. Στερεομεταφορά.....	87
7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
7.1 Σύνοψη .....	93
7.2 Γενικά Συμπεράσματα.....	93
7.3 Ειδικά Συμπεράσματα.....	94
7.4 Μελλοντικές Προτάσεις .....	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μπαλτά, που στο μάθημα κατεύθυνσης του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου «Διαχείριση Πλημμυρικού Κινδύνου», μου έδωσε το έναυσμα να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο που με γοήτευσε, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε με αυτή τη διπλωματική να διαλέξω ένα θέμα που σαν απώτερο στόχο έχει την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Να ευχαριστήσω, ακόμη, για τη συμβολή τους και τους καθηγητές της Σχολής κ. Ευστρατιάδη και κ. Μαμάση που συμμετείχαν στην Εξεταστική Επιτροπή της παρουσίασής μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Αιμιλία-Παναγιώτα Θεοχάρη, για την καθοριστικής σημασίας βοήθεια που μου παρείχε από την αρχή μέχρι το τέλος αυτής της διπλωματικής εργασίας και που χωρίς αυτήν δε θα είχε ολοκληρωθεί.

Δεν μπορώ να παραλείψω βεβαίως την οικογένειά μου, που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζει, ακόμη και αν κάποιες φορές δε συμφωνεί με τις επιλογές μου.

Τα φοιτητικά μου χρόνια κλείνουν με τον πιο ωραίο τρόπο, γνωρίζοντας ότι οι άνθρωποι που έχω δίπλα μου με στηρίζουν, με ανέχονται και με αγαπούν πραγματικά. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε και που θα ζήσουμε από εδώ και στο εξής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά προσεγγίζει υδρολογικά και υδραυλικά μέρη της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού στην Ηλεία και στη συνέχεια στοχεύει στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης ανά μονάδα επιφάνειας, και τελικά στην εκτίμηση της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης. Στην αρχή, με βάση τα εργαλεία γεωμορφολογικής ανάλυσης σε περιβάλλον ArcGIS εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο και τα βασικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, προκειμένου να εισαχθούν στη συνέχεια σε περιβάλλον HEC-HMS, και να παραχθεί το τελικό πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Για την επίτευξη του τελευταίου, με βάση τις όμβριες καμπύλες και τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ υπολογίζεται το υετογράφημα σχεδιασμού για ενεργό βροχόπτωση ίση με 12 ώρες, το οποίο εισάγεται στο HEC-HMS μαζί με τα βάρη των σταθμών, που προκύπτουν από τη μέθοδο Thiessen. Παράγονται τρία πλημμυρογραφήματα με βάση τις μεθόδους μετασχηματισμού βροχής σε απορροή: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder, Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS και Μοναδιαίο Υδρογράφημα μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται σε περιβάλλον HEC-RAS και εξάγονται οι τελικοί χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής κατάντη της εξόδου της λεκάνης απορροής. Τέλος, διερευνάται η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση με βάση τα μοντέλα RUSLE και Gavrilovic, ενώ κατόπιν με βάση τους συντελεστές στερεοαπορροής και κατακράτησης εκτιμάται η στερεοαπορροή σε τόνους ανά έτος, στην έξοδο της λεκάνης. Η στερεοαπορροή, εκτιμάται, επίσης και από τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά, και παρουσιάζονται συγκριτικά τα τελικά αποτελέσματα.

Λέξεις-κλειδιά: Υδρολογική ανάλυση, Υδραυλική προσομοίωση, RUSLE, Gavrilovic, Σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά



# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Όριο υπολεκάνης απορροής στο Google Hybrid.....	7
Σχήμα 2.2: Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, ανάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης και του πεδίου κατάκλισης.....	8
Σχήμα 2.3 Μέση μηνιαία βροχόπτωση με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.....	10
Σχήμα 2.4: Ημέρες Υετού με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.....	11
.....	11
Σχήμα 2.5: Μηνιαίες θερμοκρασίες με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.....	11
Σχήμα 2.6: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.....	12
Σχήμα 2.7: Μέση μηνιαία ένταση του ανέμου στο σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.....	12
Σχήμα 2.8: Υδατικά Συστήματα EL02 ( Ειδική Γραμματεία Υδάτων).....	15
Σχήμα 2.9: Δήμος Αρχαίας Ολυμπίας (πηγή: wikipedia).....	16
Σχήμα 2.10: Ποσοστό των εκτάσεων Natura επί της συνολικής έκτασης της λεκάνης. ....	18
Σχήμα 2.11: Το Δρυόδασος της Φολόης (πηγή: wikipedia).....	18
Σχήμα 2.12: Άποψη περιοχών Natura στο πρόγραμμα ARCGIS.....	19
Σχήμα 2.13: Ποσοστό χρήσεων γης επί της συνολικής έκτασης της περιοχής. ....	20
Σχήμα 2.14: Χρήσεις Γης (Ίδια επεξεργασία, πηγή: Copernicus 2018).....	20
Σχήμα 2.15: Εκτάσεις σε στρέμματα που καταστράφηκαν στην Ηλεία το 2007 (πηγή: fireservice).....	25
Σχήμα 2.16: Αριθμός περιστατικών πλημμύρας πριν και μετά τις πυρκαγιές του 2007 (Diakakis, Nikolopoulos , Vassilakis, & Korakaki E., 2017).....	25
Σχήμα 3.1: Σύνοψη χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων G.I.S. (πηγή: ESRI,ArcMap 10.8.).....	27
Σχήμα 3.2: Σύνοψη προετοιμασίας δεδομένων για το HEC-HMS (πηγή: anakteknik.co.id)....	28
Σχήμα 3.3: Πλημμυρογράφημα εξόδου μέσω του λογισμικού HEC-HMS (πηγή: HEC FactSheet HEC-HMS).....	29
Σχήμα 3.4: Μοντέλο HEC RAS (πηγή: understandrisk.org).....	30
Σχήμα 4.1: Μεθοδολογία γεωμορφολογικής ανάλυσης.....	31
Σχήμα 4.2: DEM και υδρογραφικό δίκτυο της υπολεκάνης απορροής.....	32
Σχήμα 4.3: Χωρική αναπαράσταση των σταθμών επιρροής της εξεταζόμενης λεκάνης. ....	34
Σχήμα 4.4: Όμβριες καμπύλες για το σταθμό «Αχλαδινή» για διάφορες περιόδους επαναφοράς.....	35
Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση της μεθόδου Thiessen στο ArcGIS.....	36
Σχήμα 4.6: Υετογράφημα σταθμού «Αχλαδινή» για περίοδο επαναφοράς T=100 years.....	38
Σχήμα 4.7: Τιμές CN στη λεκάνη απορροής του Πηνειού για μέσες συνθήκες υγρασίας.....	40
Σχήμα 4.8: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα 1 ώρας κατά Snyder.....	43
Σχήμα 4.9: Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS.....	44
Σχήμα 4.10: Μοναδιαία Υδρογραφήματα 1 ώρας κατά SCS.....	44
Σχήμα 4.11: Διαδικασία Υπολογισμού του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με τη μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών στο ArcGIS.....	45
Σχήμα 4.12: Μοναδιαίο Υδρογράφημα με τη μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών.....	46
Σχήμα 4.13: Συνολική ταχύτητα στη λεκάνη απορροής.....	46

<b>Σχήμα 4.14:</b> Περιβάλλον HEC-HMS.....	47
<b>Σχήμα 4.15:</b> Επεξεργασία της περιοχής μελέτης με το εργαλείο Geometry Data. ....	50
<b>Σχήμα 4.16:</b> Κεντρικό περιβάλλον επεξεργασίας RAS Mapper. ....	51
<b>Σχήμα 5.1:</b> Διαδικασία υπολογισμού της εδαφικής απώλειας σύμφωνα με το μοντέλο RUSLE, σε περιβάλλον Model Builder (πηγή: Ίδια Επεξεργασία). ....	55
<b>Σχήμα 5.2:</b> Τιμές συντελεστή $\alpha$ (Φλαμπούρης, 2008). ....	57
<b>Σχήμα 5.3:</b> Συσχέτιση βροχόπτωσης με το υψόμετρο των σταθμών. ....	58
<b>Σχήμα 5.4:</b> Χωρική Αναπαράσταση μέσης ετήσιας βροχόπτωσης $P(mm)$ . ....	59
<b>Σχήμα 5.5:</b> Χωρική αναπαράσταση συντελεστή $R$ , σύμφωνα με την εξίσωση $R = 1.2 * P$ ....	60
<b>Σχήμα 5.6:</b> Χωρική αναπαράσταση του συντελεστή $R$ , με βάση τη λογαριθμική εξίσωση. ....	61
<b>Σχήμα 5.7:</b> Χωρική αναπαράσταση του συντελεστή $R$ , με βάση τη μέθοδο του MFI.....	62
<b>Σχήμα 5.8:</b> Νομογράφημα για την εκτίμηση του συντελεστή $K$ (Wischmeier, Johnson, & Cross , A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, 1971). ....	63
<b>Σχήμα 5.9:</b> Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας $K$ , σύμφωνα με το νομογράφημα Wischmeier.....	65
<b>Σχήμα 5.10:</b> Χωρική κατανομή του συντελεστή $LS$ , με βάση τους Mitasova και Mitas (2001a). ....	67
<b>Σχήμα 5.11:</b> Χωρική κατανομή του συντελεστή $LS$ , με βάση τους Moore και Burch (1986). ..	67
<b>Σχήμα 5.12:</b> Καμπύλη NDVI-C για $a=2$ και $b=1$ (Van der Knijff, Jones, & Montanarella, 2000). ....	68
<b>Σχήμα 5.13:</b> Χωρική κατανομή του συντελεστή $C$ , με βάση τις χρήσεις γης.....	69
<b>Σχήμα 5.14:</b> Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης $P$ .....	71
<b>Σχήμα 5.15:</b> Γραμμική συσχέτιση θερμοκρασίας με το υψόμετρο. ....	73
<b>Σχήμα 5.16:</b> Χωρική αναπαράσταση συντελεστή $X$ της μεθόδου Gavrilovic. ....	76
<b>Σχήμα 5.17:</b> Χωρική αναπαράσταση συντελεστή $Y$ της μεθόδου Gavrilovic. ....	77
<b>Σχήμα 5.18:</b> Χωρική αναπαράσταση συντελεστή $\phi$ της μεθόδου Gavrilovic.....	78
<b>Σχήμα 5.19:</b> Κλίση (%) της λεκάνης απορροής. ....	78
<b>Σχήμα 5.20:</b> Χωρική αναπαράσταση παραμέτρου $Z$ της μεθόδου Gavrilovic.....	79
<b>Σχήμα 6.1:</b> Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για $CN_{II}=80$ . ....	83
<b>Σχήμα 6.2:</b> Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για $CN_I=60.70$ . ....	84
<b>Σχήμα 6.3:</b> Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για $CN_{III}=90.20$ . ....	84
<b>Σχήμα 6.4:</b> Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας. ....	86
<b>Σχήμα 6.5:</b> Μέγιστες ταχύτητες ροής εντός πεδίου πλημμύρας. ....	86
<b>Σχήμα 6.6:</b> Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (LS-Mitasova and Mitas (2001), R-MFI).....	88
<b>Σχήμα 6.7:</b> Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (LS- Moore and Burch (1986) R-MFI).....	89
<b>Σχήμα 6.8:</b> Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (ESDAC). ....	89
<b>Σχήμα 6.9:</b> Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση τη μέθοδο Gavrilovic. ....	90
<b>Σχήμα 6.10:</b> Χωρική αναπαράσταση στερεοαπορροής, σύμφωνα με τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά.....	91

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά υπολεκάνης απορροής.....	8
Πίνακας 2.2: Γεωλογικοί σχηματισμοί περιοχής μελέτης.....	9
Πίνακας 2.3: Πλήθος Επιφανειακών Υδατικών Συστημάτων στη ΛΑΠ ΕΛ0228.....	13
Πίνακας 2.4: Βασικά χαρακτηριστικά του ποτάμιου ΥΣ του Πηνειού ποταμού.....	13
Πίνακας 2.5: Μεταβατικά Ύδατα στη ΛΑΠ ΕΛ0228.....	14
Πίνακας 2.6: Παράκτια Υδατικά Συστήματα της ΛΑΠ ΕΛ0228.....	14
Πίνακας 2.7: Πληθυσμός Π.Ε. Ηλείας τα έτη 2011 και 2021 (πηγή: Ελληνική Στατιστική Εταιρεία).....	16
Πίνακας 2.8: Κατηγοριοποίηση συνεπειών Καταιγίδας.....	21
Πίνακας 2.9: Ιστορικό πλημμυρών στην Ηλεία τα τελευταία 20 χρόνια.....	21
Πίνακας 2.10: Ιστορικό Κατολισθήσεων και μεταφοράς φερτών και λάσπης.....	24
Πίνακας 4.1: Σταθμοί επιρροής στη λεκάνη απορροής της εξεταζόμενης περιοχής (πηγή: floods.greka).....	34
Πίνακας 4.2: Βάρη των σταθμών πέριξ της λεκάνης απορροής, με βάση τη μέθοδο Thiessen.....	36
Πίνακας 4.3 Τιμές παραμέτρου CN για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές, για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας Τύπου II (Κουτσογιάννης, Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, 2011).....	39
Πίνακας 4.4: Τιμές CN για όλες τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας.....	41
Πίνακας 4.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων ΜΥ.....	47
Πίνακας 4.6: Αντιστοίχιση τιμών συντελεστή n, με τους κωδικούς χρήσεων γης (Ραφαϊοαννου, et al., 2018).....	49
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μετεωρολογικών σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής.....	57
Πίνακας 5.2: Συντελεστής βροχόπτωσης R, με βάση τον MFI.....	61
Πίνακας 5.3: Τιμές συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K.....	64
Πίνακας 5.4: Ποσοστά αργίλου, άμμου, ιλύος και οργανικών στα πετρώματα της περιοχής μελέτης.....	64
Πίνακας 5.5: Αντιστοίχιση Χρήσεων Γης με τιμές του συντελεστή C.....	69
Πίνακας 5.6: Τιμές συντελεστή P με βάση τις καλλιεργητικές πρακτικές στη λεκάνη απορροής.....	70
Πίνακας 5.7: Δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών στη λεκάνη απορροής.....	72
Πίνακας 5.8: Τιμές συντελεστή X, με βάση το είδος της φυτοκάλυψης.....	74
Πίνακας 5.9 <sup>α,β</sup> : Τιμές συντελεστή X, ανάλογα με την κατάσταση της λεκάνης και την ύπαρξη ή όχι υδρονομικών έργων.....	74
Πίνακας 5.10: Τιμές συντελεστή Y, με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς (Κωτούλας, 2001).....	75
Πίνακας 5.11: Τιμές συντελεστή φ, με βάση την υφιστάμενη διάβρωση της λεκάνης απορροής (Κωτούλας, 2001).....	75
Πίνακας 5.12: Κατηγοριοποίηση της διάβρωσης με βάση την παράμετρο Z.....	75
Πίνακας 5.13: Αντιστοίχιση κωδικών CORINE με τιμές του συντελεστή X.....	75
Πίνακας 5.14: Κατηγοριοποίηση γεωλογικών σχηματισμών, με βάση τη διαβρωσιμότητά τους (Κουτσογιάννης & Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, 1987).....	82
Πίνακας 6.1: Παροχή και χρόνος αιχμής πλημμυρογραφήματος, ανάλογα με την κάθε μέθοδο.....	83
Πίνακας 6.2: Εδαφική Διάβρωση με διαφορετικούς συντελεστές R.....	87

<b>Πίνακας 6.3:</b> Εδαφική Διάβρωση με διαφορετικούς συντελεστές LS. ....	87
<b>Πίνακας 6.4:</b> Συντελεστής SDR, με βάση σχέσεις από τη βιβλιογραφία και στερεοαπορροή, βάσει του μοντέλου RUSLE. ....	90
<b>Πίνακας 6.5:</b> Σύγκριση άμεσης και χωρικής μεθόδου υπολογισμού της στερεοαπορροής, με βάση τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά. ....	91
<b>Πίνακας 6.6:</b> Στερεοαπορροή, με βάση και τις τρεις μεθόδους εκτίμησης. ....	92
<b>Πίνακας 6.7:</b> Ποσοστιαία διαφορά στερεοαπορροής ανά μοντέλο εκτίμησης. ....	92

## ABSTRACT

This Thesis aims to approach hydrologically and hydraulically the catchment of Pinios river in Ilia, Peloponnese, Greece. Apart from runoff, the current study investigates the land degradation by soil erosion and the average annual sediment yield in this particular catchment. At first, geomorphic and hydrologic information was derived from the raster-based Digital Elevation Model at a spatial resolution of 30 m x 30 m, such as the stream network and sub-basin boundaries. Using the IDF Curves, the Thiessen Polygons methodology and the Alternative Block Method, the final hyetograph for a 12-hour rainfall was represented and used as an input for HEC-HMS, which then produced the final flow hydrographs. There are three flow hydrographs produced, according to SCS Unit Hydrograph Method, Snyder Unit Hydrograph Method and Time-Area Method. Furthermore, HEC-RAS software was used to succeed 2D flow simulation in the downstream area of Pinios basin and flood risk assessment. At the end of this study, the average annual soil erosion rate is forecasted using the RUSLE Model and the Erosion Potential Method, while the sediment yield is estimated based on the Sediment Delivery Ratio and the Retention Coefficient. Finally, sediment yield is also forecasted according to Koutsoyiannis and Tarla equation and is compared to the previous sediment yield results.

# EXTENDED SUMMARY

## INTRODUCTION

In Mediterranean territories, floods and sediment transport are common phenomena, since many rainfall events present high intensity and short duration. Studies in urban and semi-urban areas or high erodible areas are necessary, especially post-fire, in order to avoid devastating effects on local communities. It is Science Community's obligation to forecast flood hazard and prevent it. The European Parliament established a Directive (2007/60/EC) on flood risk management, according to which each European Union Member State is obliged to conduct flood risk management plans, focused on the prevention and preparedness against flooding. So, flood hazard maps were created for every river basin in Greece, for different return period scenarios, using hydrological and hydraulic modeling. Furthermore, according to the same Directive, considering the soil loss by water erosion, main purpose of the studies should be the localization of terrains with high sediment transport and soil loss. Therefore, the soil loss values were grouped into five erosion hazard classes, ranging from very low (<5 tones/ha/year) to very high (>50 tones/ha/year).

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area

This thesis studies the Pinios river basin, which covers an area of 7397 km<sup>2</sup> and is located in Peloponnese. Pinios river has a total length of 94.27 km and is located in Iliia, West Peloponnese. This study's sub-basin occupies an area of 101 km<sup>2</sup>, with intense slopes in the northeast and moderate slopes in the west. The basin geomorphological characteristics of this sub-basin are present in Table 1.

**Table 1:** Summary of the sub-basin geomorphological characteristics.

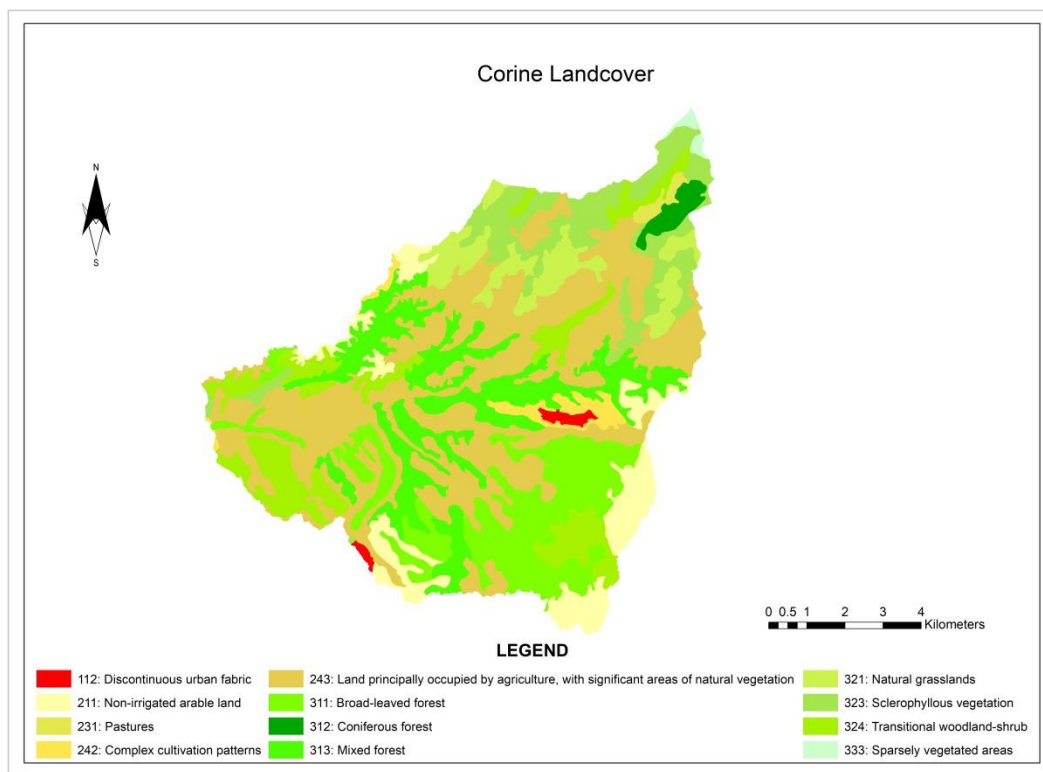
Area (km <sup>2</sup> )	101
Max Elevation (m)	1451
Min Elevation (m)	295
Mean Elevation (m)	674
Mean Slope(%)	27.4

Pinios stream network is a tree network with first, second and third-order streams, according to Strahler Stream Order (Figure 1). Pinios longest flowpath has a length of 20.98 km and flows west.



**Figure 1:** Pinios basin and stream network upstream basin's outlet and flood plain.

This basin consists of forest and woodlands mostly, but it also contains arable lands. The land cover types, according to Corine Land Cover classification, are presented in Figure 2.



**Figure 2:** Corine Land Cover classification (source: Copernicus 2018).

## Hydrological and Hydraulic Analysis

At first, the Intensity Duration Frequency (IDF) Curves were for rain gauges around this study's basin, using each station's parameters, for a 12 hours rainfall and for a 100 years return period. The equation that was used to estimate the IDF Curves is:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa - \psi')}{(1 + \frac{d}{\theta})^\eta} \quad (1)$$

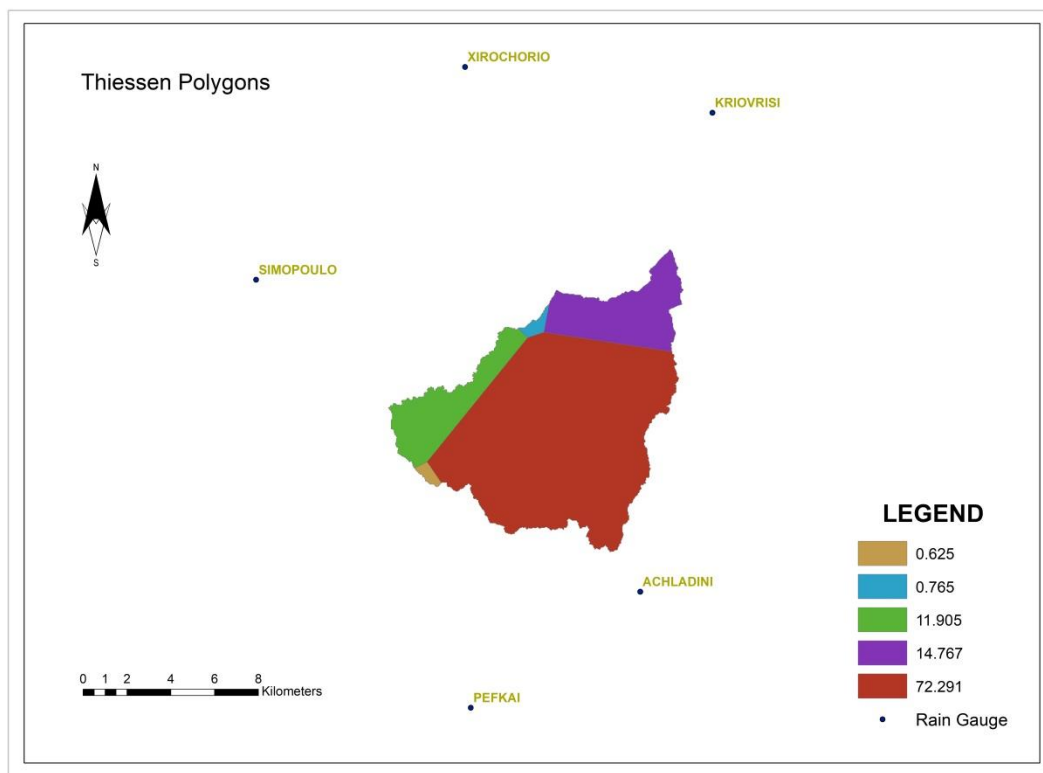
Όπου:

$d$ : the rainfall duration (hr)

$T$ : the return period (years)

$\lambda, \kappa, \psi, \theta, \eta$ : parameters for each rain station.

The estimated intensity from the previous equation corresponds to each rain gauge separately. Using the Thiessen Polygons methodology, mean point rainfall in each gauge is converted to mean areal precipitation and so spatial interpolation happens (Figure 3).



**Figure 3:** Thiessen Polygons of the rain gauges around Pinios' basin.

Furthermore, using the Alternative Block Method for each rain gauge, the final hyetograph was conducted and used as an input for the HEC-HMS software, so that the final flood hydrograph was produced.



Next in line is the calculation of the Curve Number. The Curve Number Method expresses runoff volume as a function of rainfall volume, hydrological storage and initial abstraction. It also depends on land surface characteristics and hydro-soil conditions. According to Soil Conservation Service, soils are classified in 4 groups:

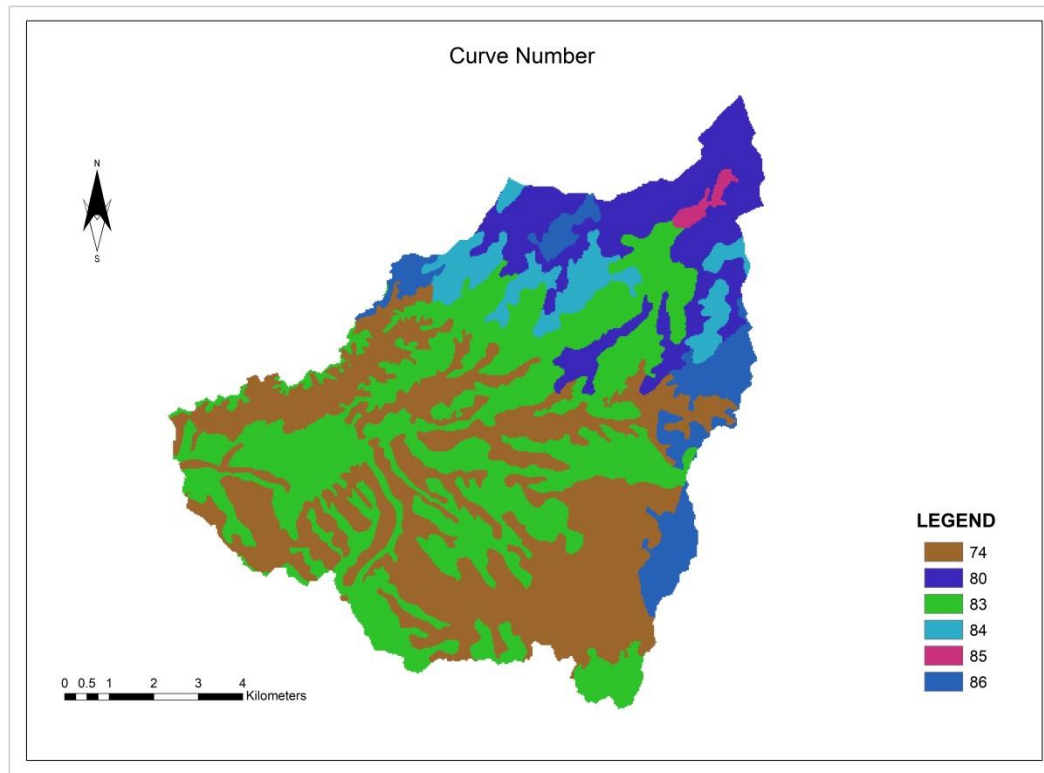
1. Group A: Deep, well drained sands and gravels
2. Group B: Moderately deep, well-drained with moderately fine to coarse textures
3. Group C: Clay loams, shallow sandy loam, soils with moderately fine to fine textures
4. Group D: Clay soils that swell significantly when wet, heavy plastic and soils with a permanent high water table

In this study case, soil consists of flysch and alluvial deposits, which are classified in Group D and Group C. Curve Number for normal soil conditions is in page 72. Curve Number for dry ( $CN_I$ ) and wet ( $CN_{III}$ ) conditions can be calculated by  $CN_{II}$  in normal conditions by the equations:

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (2)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (3)$$

Curve Number values for the hydrological basin of Pinios are presented in Figure 4.



**Figure 4:** Curve Number values for normal soil conditions.

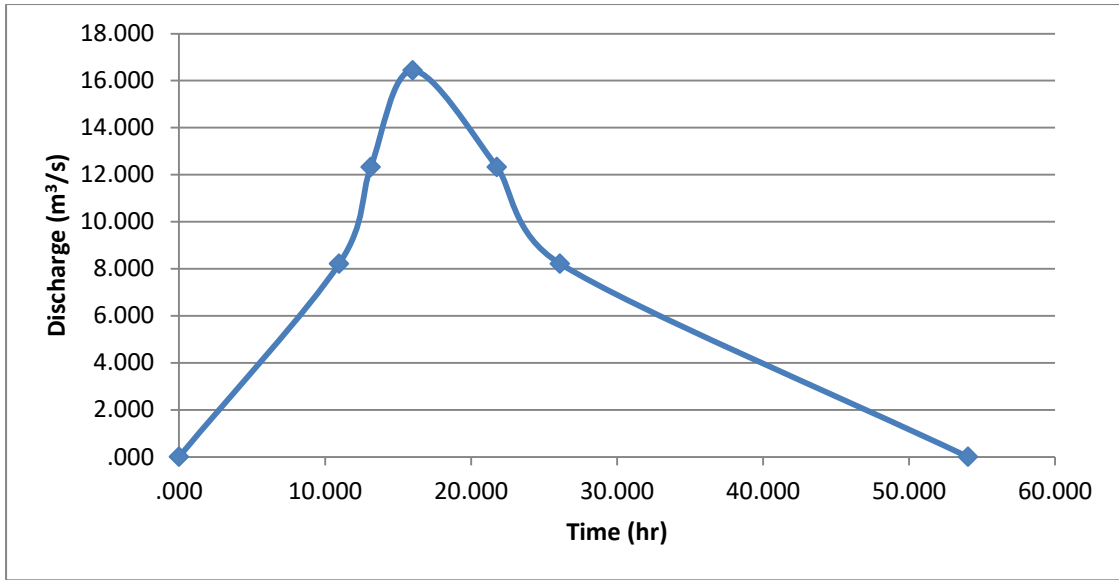
The Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method was used to define the precipitation losses. The final runoff is calculated by the equation:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (4)$$

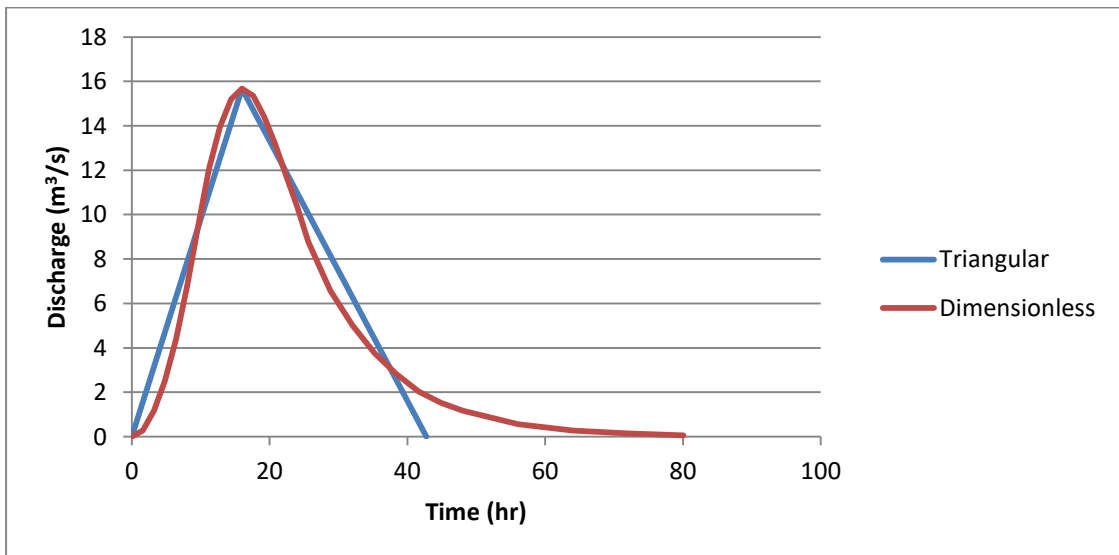
Where  $h_e$  the depth of runoff (mm),  $h$  the depth of rainfall (mm) and  $S$  the maximum potential retention (mm), calculated as followed:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (5)$$

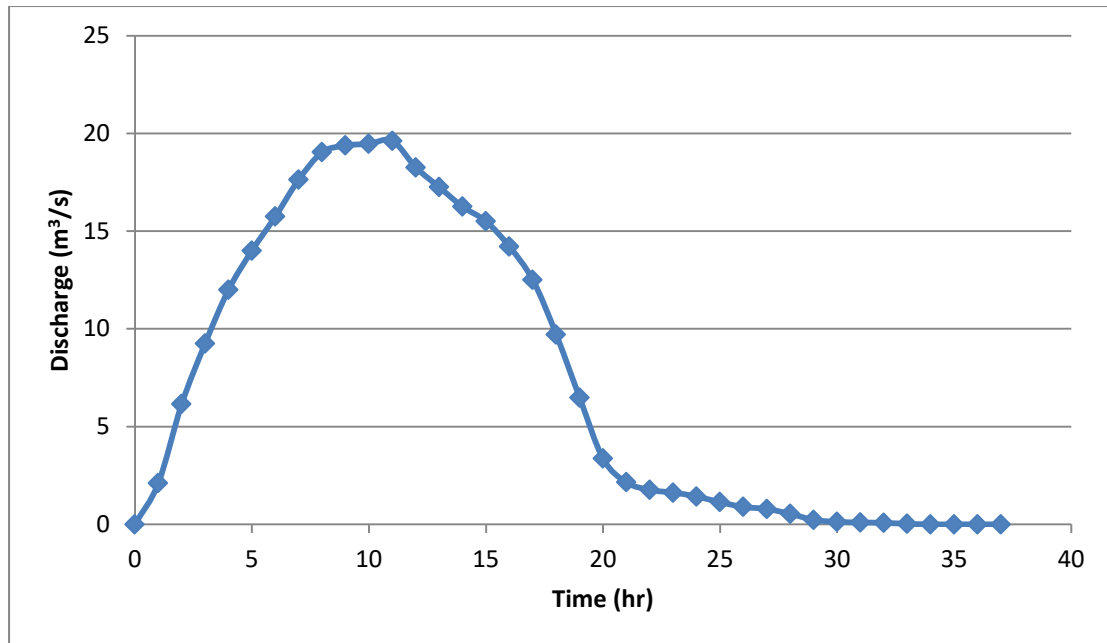
Furthermore, in this study case there are used three methods to calculate runoff resulting from catchment net rainfall: Synthetic Unit Hydrograph of Snyder, SCS Dimensionless Unit Hydrograph and Time Area Diagram. The Unit Hydrographs of all three methods are presented in Figures 5, 6 and 7.



**Figure 5:** Synthetic Unit Hydrograph of Snyder.



**Figure 6:** SCS Unit Hydrographs.



**Figure 7:** Unit Hydrograph using Time Area Diagram.

Apart from these, in order to define the flood plain downstream the basin’s outlet point, the HEC-RAS software is used, with the watershed limits, the Land Cover map and the Manning’s *n* coefficient used as inputs. In this study case, Manning’s *n* depends on CORINE Land Cover classification values, which are shown in Table 2.

**Table 2:** Manning’s *n* values, based on CORINE codes (Papaioannou, et al., 2018).

CORINE CODE	Description	Manning's n
111	Continuous urban fabric	0.013
112	Discontinuous urban fabric	0.013
121	Industrial or commercial units	0.013
122	Road and rail networks and associated land	0.013
123	Port areas	0.013
124	Airports	0.013
131	Mineral extraction sites	0.013
132	Dump sites	0.013
133	Construction sites	0.013
141	Green urban areas	0.025
142	Sport and leisure facilities	0.025
211	Non-irrigated arable land	0.3
212	Permanently irrigated land	0.3
213	Rice fields	0.3
221	Vineyards	0.08
222	Fruit trees and berry plantations	0.08
223	Olive groves	0.08
231	Pastures	0.35
241	Annual crops associated with permanent crops	0.04
242	Complex cultivation patterns	0.04

243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	0.05
244	Agro-forestry areas	0.06
311	Broad-leaved forest	0.1
312	Coniferous forest	0.1
313	Mixed forest	0.1
321	Natural grasslands	0.04
322	Moors and heathland	0.05
323	Sclerophyllous vegetation	0.05
324	Transitional woodland-shrub	0.06
331	Beaches, dunes, sands	0.025
332	Bare rocks	0.035
333	Sparsely vegetated areas	0.027
334	Burnt areas	0.025
335	Glaciers and perpetual snow	0.01
411	Inland marshes	0.04
412	Peat bogs	0.04
421	Salt marshes	0.04
422	Salines	0.04
423	Intertidal flats	0.04
511	Water coarses	0.05
512	Water bodies	0.05
521	Coastal lagoons	0.07
522	Estuaries	0.07
523	Sea and ocean	0.07

## Soil Erosion and Sediment Yield

In this study, three empirical models were applied to forecast the soil erosion and the sediment yield in Pinios basin. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model is an updates version of the USLE Model and estimates the mean annual soil loss from sheet and rill erosion according to the next equation (Renard et. al, 1997):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (6)$$

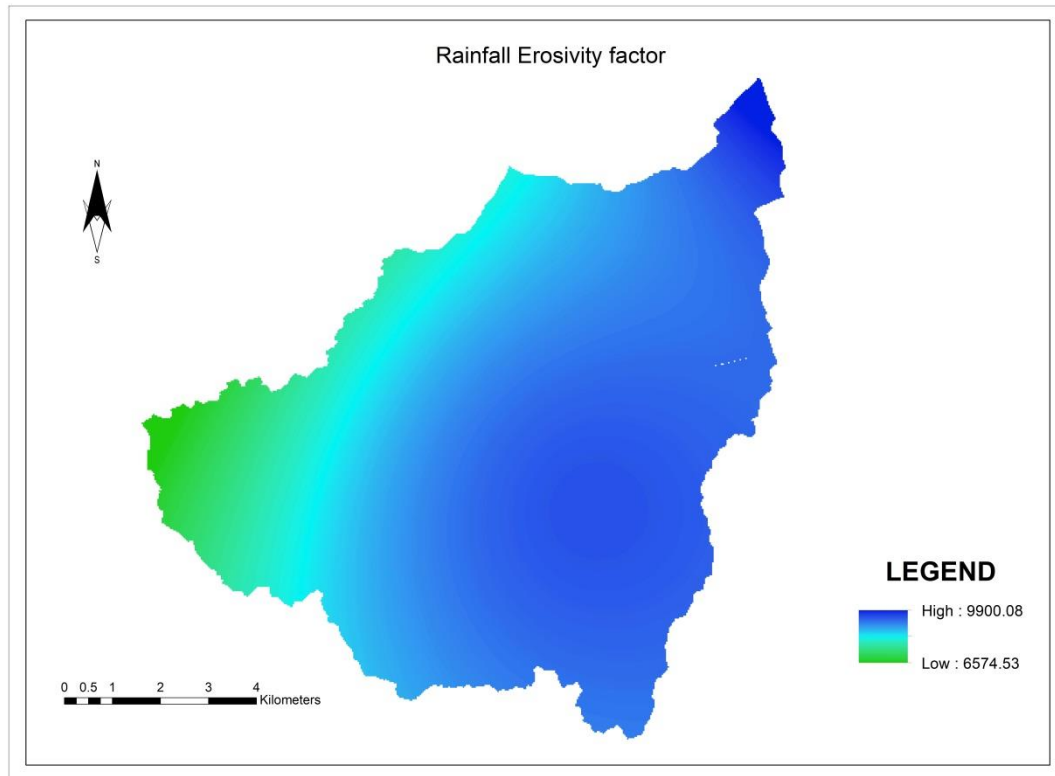
- *R*: the Rainfall Erosivity factor (MJ\*mm/ha/h/year)
- *K*: the Soil Erodibility factor (t\*h/MJ/mm)
- *L*: the Slope Length factor (dimensionless)
- *S*: the Slope Steepness factor (dimensionless)
- *C*: the Cover Management factor (dimensionless)
- *P*: the Support Practice factor (dimensionless)

The Rainfall Erosivity Factor can be forecasted calculating the Modified Fournier Index (MFI), according to which final rainfall depends on both mean annual and mean monthly precipitation data. According to Renard K.G. & Freimund J.R (1994):

$$R = 0.07397 * MFI^{1.847}, MFI \leq 55mm$$

$$R = 95.77 - 6.081 * MFI + 0.477 * MFI^2, MFI > 55mm \quad (7)$$

The mean annual precipitation rainfall was calculated by selecting past data from the rain gauges around the hydrological basin and creating an equation between rainfall and basin elevation with high correlation between them. The results are presented in Figure 8.



**Figure 8:** Rainfall Erosivity factor R, using the Modified Fournier Index.

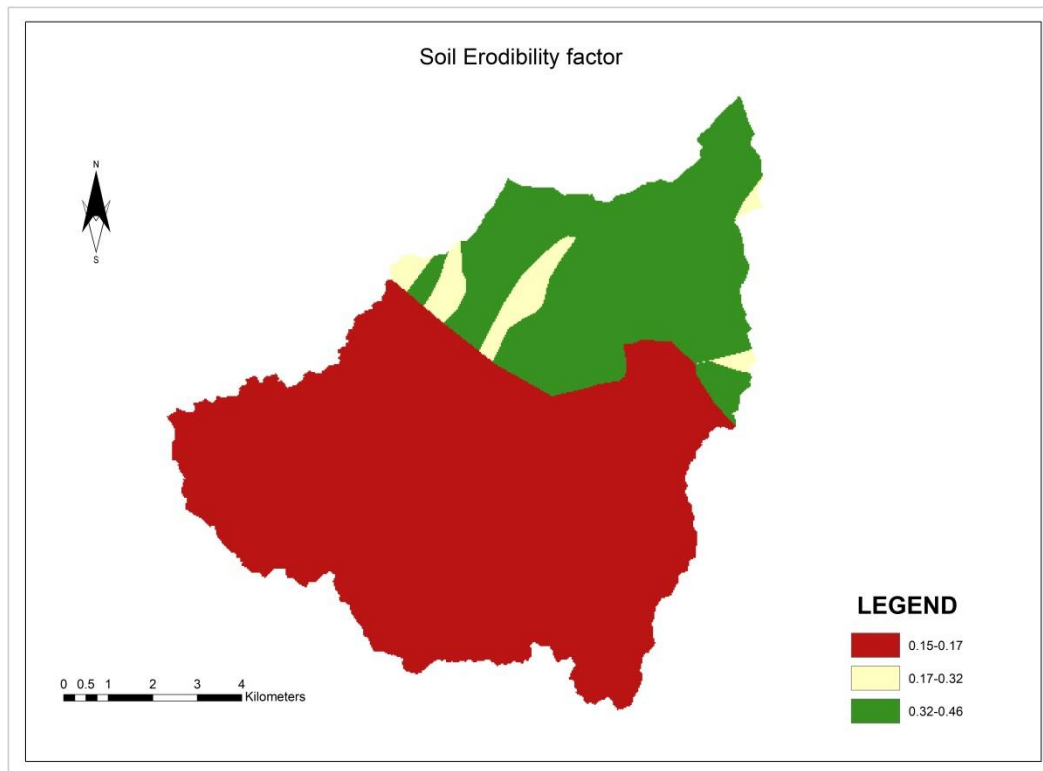
The Soil Erodibility factor is forecasted using Wischmeier and Smith (1971) nomograph, according to which soil structure and characteristics are those who affect the soil protection against erosion. Soil erodibility depends on many soil properties such as soil texture, permeability, organic matter and chemical composition. Low values of K indicate soil prone to erosion, while high values indicate to soil susceptible to erosion. The K values for this study case are shown in the Figure 9.

The Slope Length and Slope Steepness factor LS (Figure 10) describes the effect of topography a soil erosion processes. Soil loss is more susceptible to slope steepness changes than to slope length changes (McCool D.K. et. al, 1987). There are many equations that estimate the LS factor. Mitasova and Mitas (2001) concluded to the

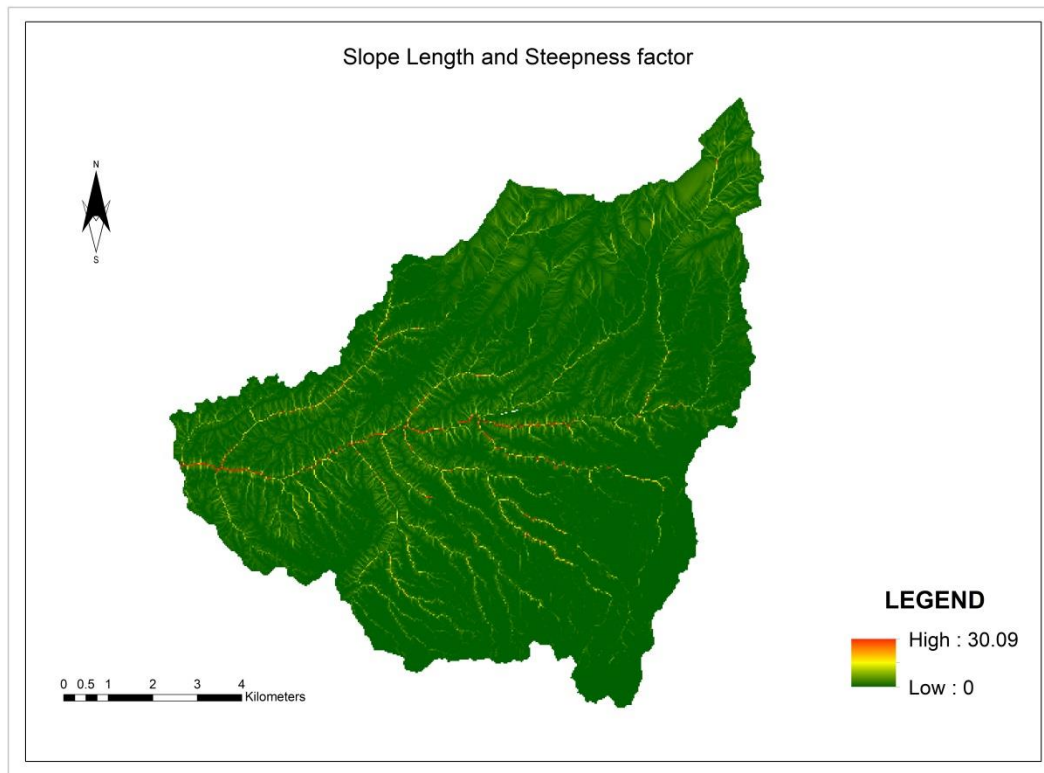
next equation, according to which the upstream catchment area defines the LS factor:

$$LS = (m + 1) * \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m * \left(\frac{\sin b}{0.09}\right)^n \quad (8)$$

$A_s$ : the upstream catchment area ( $\text{km}^2$ ),  $m, n$ : coefficients depended on the erosion type with values ranging from 0.4 and 0.6, and 1 and 1.3.



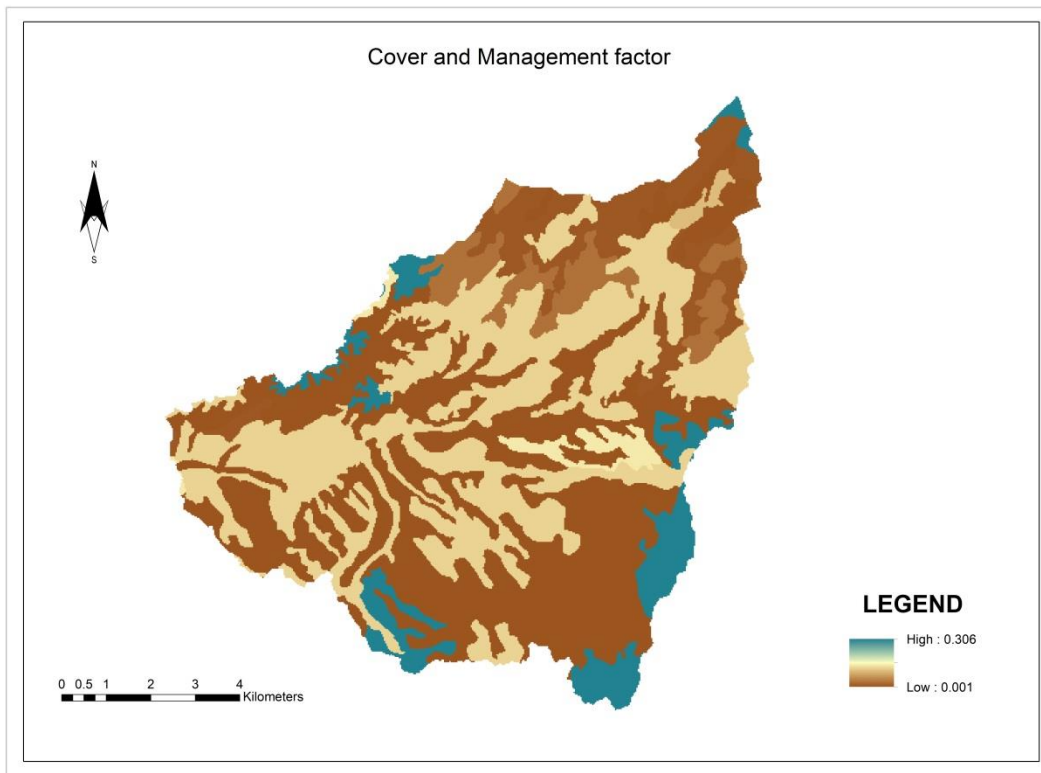
**Figure 9:** Soil Erodibility factor K, using the Wischmeier and Smith's nomograph.



**Figure 10:** Slope Length and Steepness factor  $LS$ , using the Mitasova and Mitas (2001) equation.

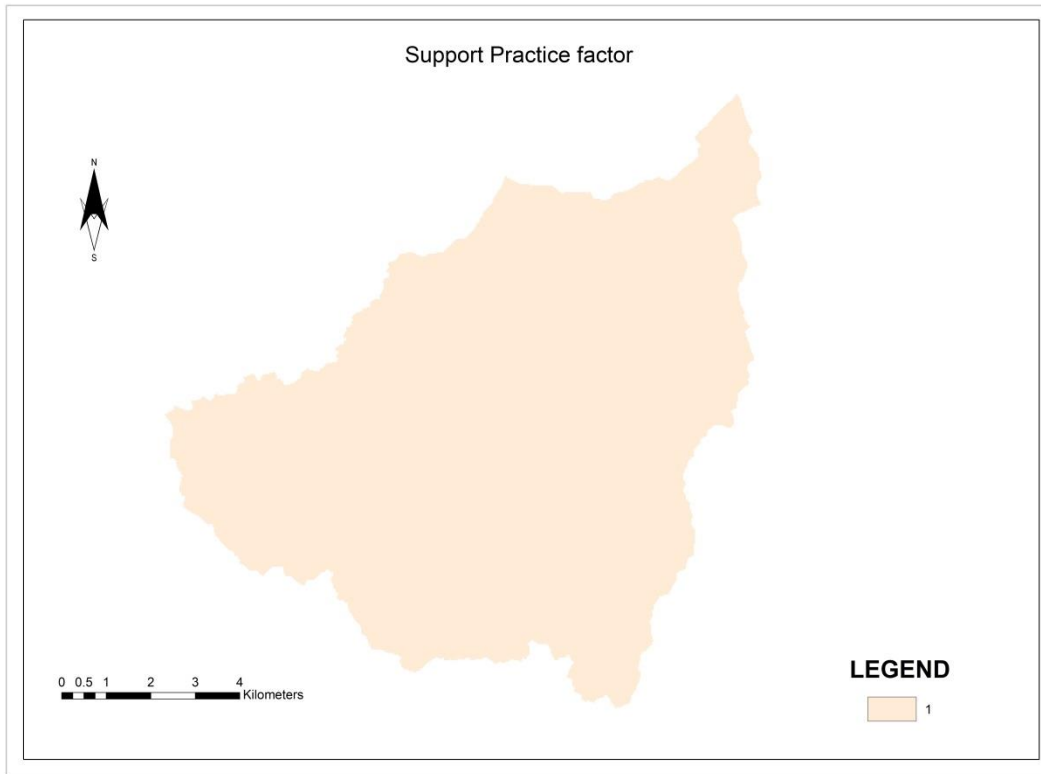
The Cover and Management factor  $C$  connects the vegetation and the infrastructure with the soil loss rate. The values range from 0 (highly-protected ground) to 1 (bare ground). In this study case, the  $C$  factor values depend on the Corine Land cover Classification and are presented in Figure 11.





**Figure 11:** Cover Management factor C.

Finally, the Support Practice factor defines the impact of management practices against soil loss. Its values range from 0 (very effective practices) to 1 (no practices). In this case study, since 44.14% of the basin are agricultural lands and taking into account the great fires in Ilia in 2007, it's been chosen the P factor to be equal to 1, as it is presented in Figure 12 (Depountis et. al., 2018).



**Figure 12:** Support Practice factor  $P$ .

The second empirical model used, is the Gavrilovic Model or Erosion Potential Method (EPM) (Gavrilović, Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji (Serbian), 1972):

$$W = T * P * \pi * \sqrt{Z^3} * A \quad (9)$$

$W$ : the mean annual erosion in the basin ( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ )<sup>1</sup>

$T$ : the temperature coefficient

$P$ : the mean annual precipitation ( $\text{mm}$ )<sup>2</sup>

$\pi$ : the mathematical constant equals to 3.14

$Z$ : the erosion coefficient

$A$ : the catchment area ( $\text{km}^2$ )

Temperature coefficient depends on the mean annual temperature  $T_0$  in the study area:

$$T = \sqrt{\left(\frac{T_0}{10} + 0.1\right)} \quad (10)$$

<sup>1</sup> Soil erosion mass is calculated multiplying the soil erosion volume with an average density of 2.67 tones/ $\text{m}^3$ .

<sup>2</sup> Mean precipitation is calculated likewise RUSLE Model.

Collecting temperature data for the selected area from gauges around the catchment, the equation between  $T_0$  and elevation  $z$  is:

$$T_0 = -0.0047 * z + 18.398 \quad (11)$$

The erosion coefficient  $Z$  is given by the equation (Staut, 2004):

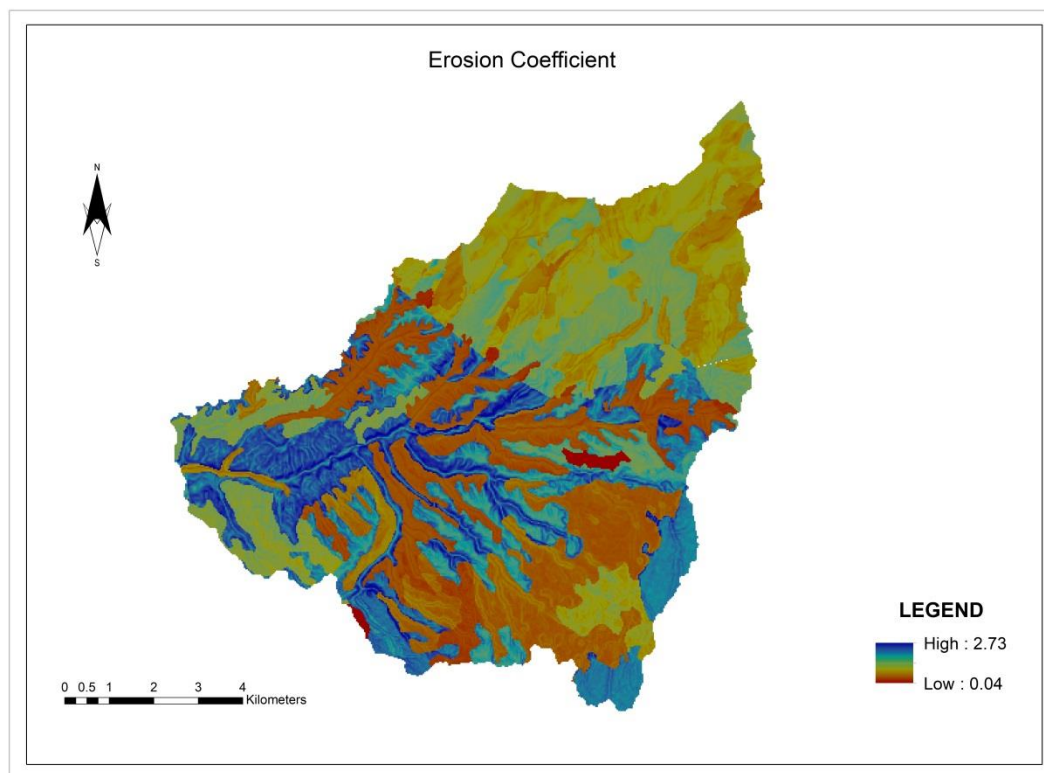
$$Z = X * Y * (\varphi + \sqrt{J}) \quad (12)$$

Where  $X$  the soil protection coefficient,  $Y$  the soil erodibility coefficient,  $\varphi$  the erosion and stream network development coefficient and  $J$  the average basin slope (%).

Often, since there is lack of adequate data,  $\varphi$  is calculated by:

$$\varphi = 0.7 * X + 0.3 * Y \quad (13)$$

Coefficients  $X$  and  $Y$  values can be forecasted by bibliography. Erosion coefficient  $Z$  is presented in Figure 13.



**Figure 13:** Erosion Coefficient  $Z$ .

RUSLE method's soil erosion can be converted to sediment yield via Sediment Delivery Ratio (SDR):

$$SDR = \frac{S_Y}{A_S} \quad (14)$$

Where  $S_Y$  the sediment yield (tones/ha/year) and  $A_S$  the gross erosion of the studied area (tones/ha/year).

According to Renfro (1972):

$$\log SDR = 1.7935 - 0.14191 * \log A \quad (15)$$

Where  $A$  the catchment's area (km<sup>2</sup>).

Respectively to RUSLE's SDR, Retention Coefficient  $R$  is used in the EPM Model according to the next equation (Zemljic ,1971):

$$R_{Zemljic} = \frac{\sqrt{OD} * (L + L_i)}{A * (L + 10)} \quad (16)$$

where  $O$  the catchment's perimeter (km),  $D$  the difference between the mean basin elevation and the outlet elevation (km),  $L$  the main river's length (km),  $L_i$  the secondary tributaries' length (km) and  $A$  the catchment's area (km<sup>2</sup>).

Finally, sediment yield is also forecasted using the Koutsoyiannis - Tarla equation (1987), an equation created by field data from 7 stations in Northwestern Greece. According to Koutsoyiannis and Tarla, sediment discharge is only affected by the hydrological and geological components of the catchment. Specifically, they classified geological formation in three groups, based on the soil's erodibility, as it is presented in Table 3.

**Table 3:** Geological formation's classification based on soil's erodibility.

Category	Geological Formation	k1
High erodibility	Alluvial deposits, Flysch	1
Medium erodibility	Marls, Sandstones, Schists	0.5
Low erodibility	Limestones, Dolomites, Metamorphic, Igneous	0.1

The sediment yield's equation is:

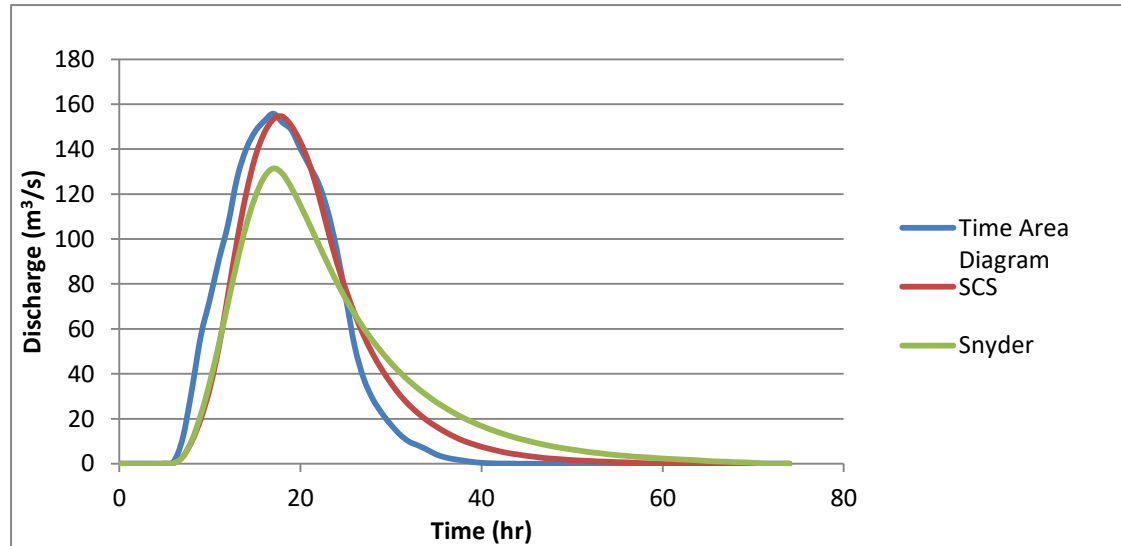
$$G = 15 * \gamma * e^{3*P} \quad (17)$$

$$\gamma = \kappa_1 * p_1 + \kappa_2 * p_2 + \kappa_3 * p_3 \quad (18)$$

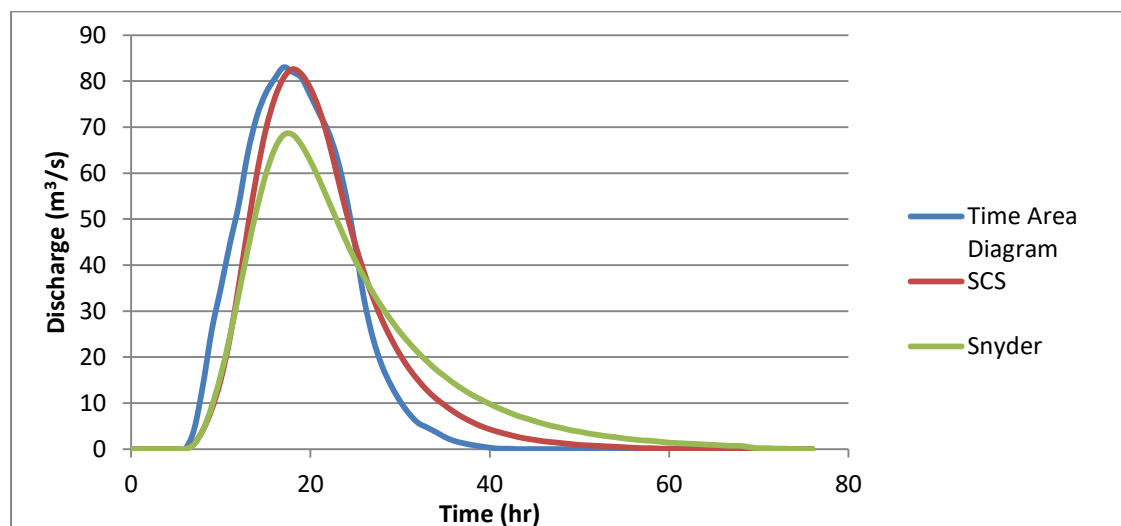
where  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  the erodibility factors,  $p_1, p_2, p_3$  the corresponding soil type occurrence proportions (%),  $G$  the mean annual suspended sediment yield (tonnes/km<sup>2</sup>),  $\gamma$  the geological coefficient and  $P$  the mean annual precipitation (m).

## RESULTS AND DISCUSSION

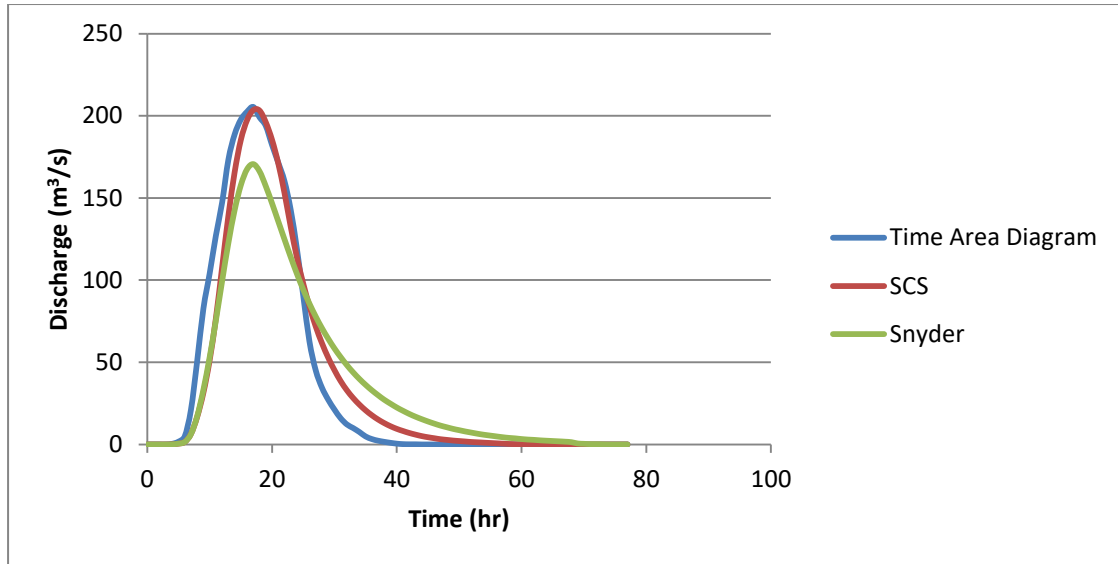
The flood hydrographs for all three methods analyzed before, are presented in Figures 14, 15 and 16 for normal, dry and wet soil conditions.



**Figure 14:** Flood hydrographs at the outlet point for normal soil conditions and  $CN_{II}=80$ .



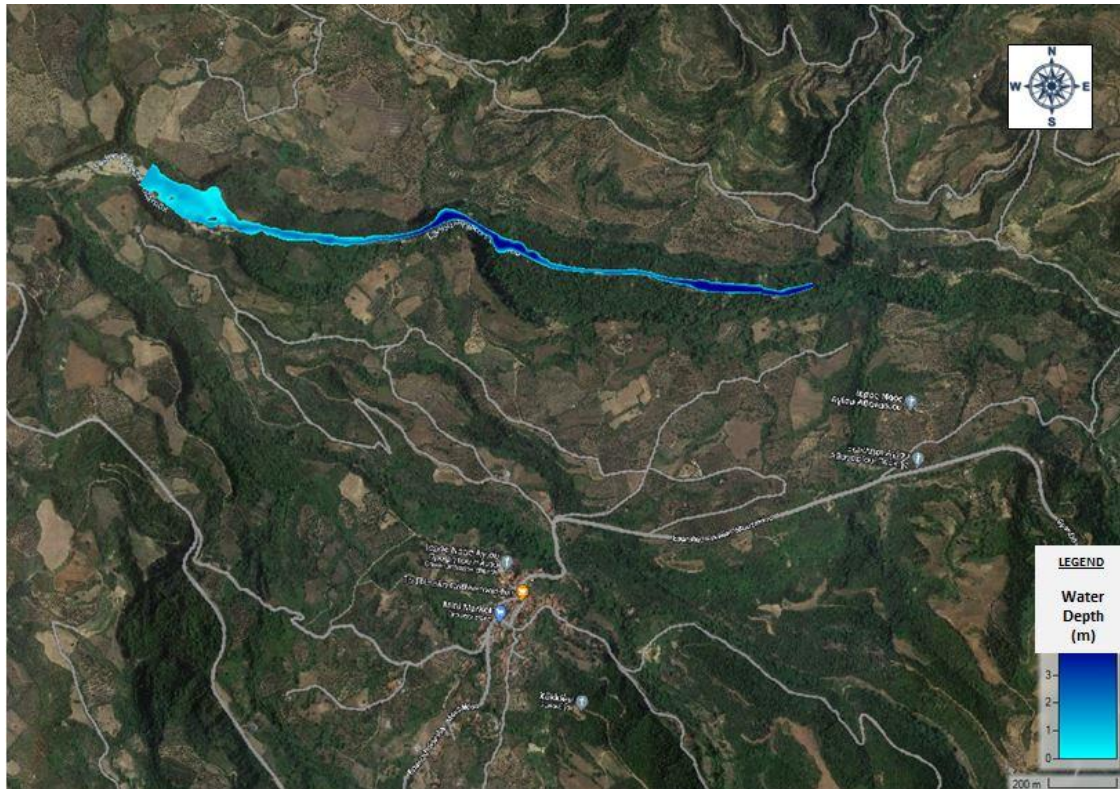
**Figure 15:** Flood hydrographs at the outlet point for dry soil conditions and  $CN_{II}=62.70$ .



**Figure 16:** Flood hydrographs at the outlet point for wet soil conditions and  $CN_{III}=90.20$ .

From the above Figures, it is easily concluded that discharge peak appears 16 hours after the beginning of the rainfall. For dry soil conditions, discharge peak's value is around  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , for normal soil conditions  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  and for wet soil conditions it is around  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . As it was expected, maximum runoff appears in wet soil conditions, since the soil is saturated with water and most of the rainfall volume becomes runoff volume. On the contrary, minimum runoff appears in dry soil conditions, since in the beginning of the rainfall episode most of the rainfall volume is absorbed from the soil.

For the hydraulic simulation, HEC-RAS software was used in order to check the flood hazard in the flood plain. Maximum velocity is  $6 \text{ m/s}$ , while water depth reaches  $5 \text{ m}$  across the river, as it is presented in Figures 17 and 18.



**Figure 17:** Maximum water depths across the river.



**Figure 18:** Maximum flow velocities across the river.

Finally, investigating soil erosion and sediment yield, results for all methods are presented in Tables 4 and 5.

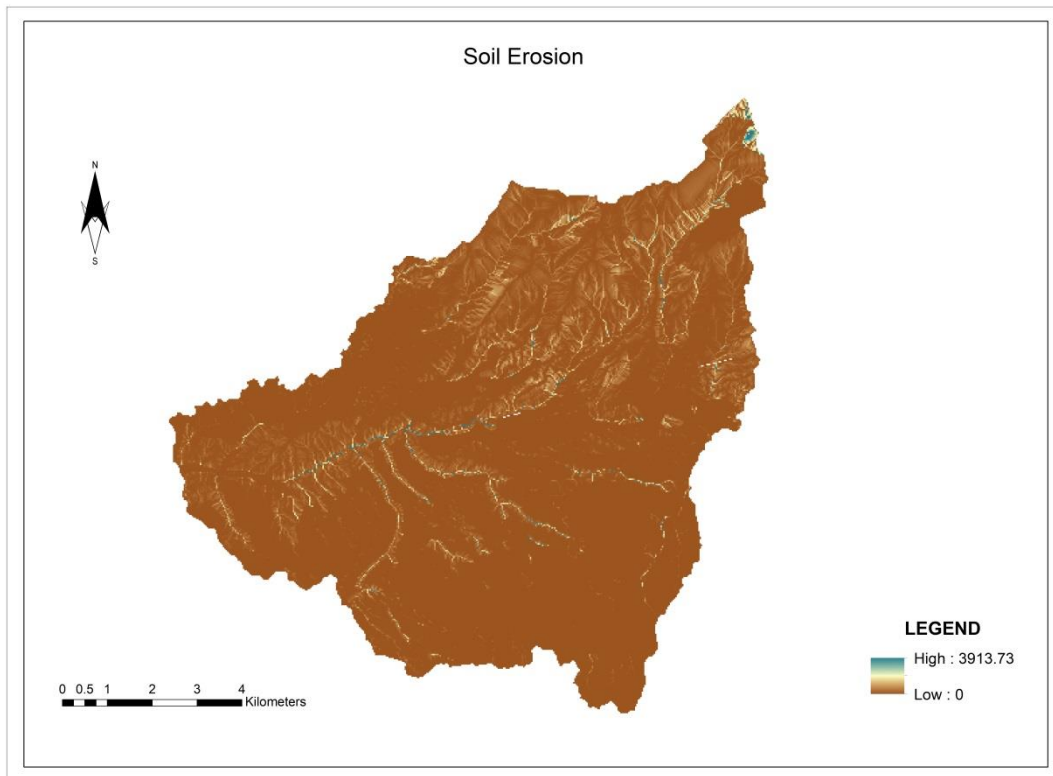
**Table 4:** Soil erosion results.

Method	Soil Erosion (t/km <sup>2</sup> /year)
RUSLE	2998
EMP	14551.15

**Table 5:** Sediment yield results

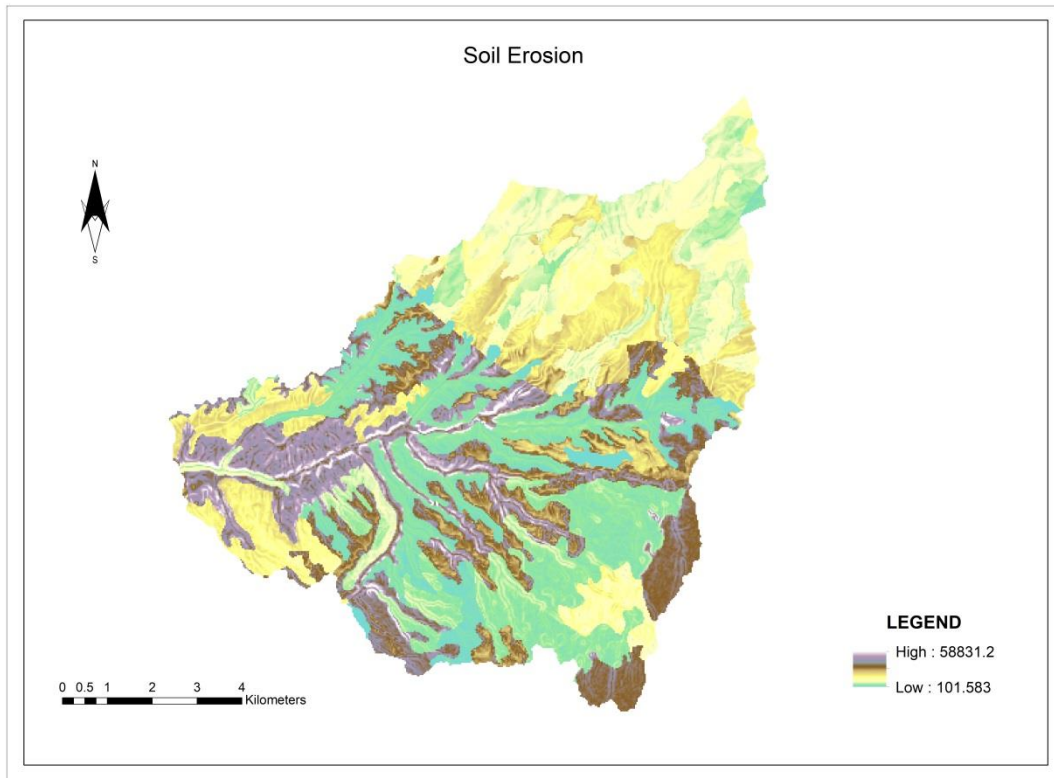
Method	Sediment yield (t/year)
RUSLE	97180.1
EPM	215241.1
Koutsoyianni-Tarla	92707.8

RUSLE Method was created based on field data from agricultural basins and it underestimates the final sediment yield, since it was not created for mountainous catchments. Soil Erosion Maps for both RUSLE and EPM are presented in Figures 19 and 20.



**Figure 19:** Soil erosion using RUSLE model.





**Figure 20:** Soil erosion using EPM.

From the above results, it is concluded that catchment's soil loss rate depends both on its geology and its land cover. Impermeable geological formations, such as flysch in this study case, do not allow water to be absorbed, and the runoff volume is bigger than in other formations. In addition, soil's moisture and vegetation are really important to soil erosion, since it can affect soil's erodibility and rainfall's erosivity. Vegetation intercepts rain, and it reduces its energy and prevents splash erosion.

# List of Figures

<b>Figure 1:</b> Pinios basin and stream network upstream basin's outlet and flood plain.....	xiv
<b>Figure 2:</b> Corine Land Cover classification (source: Copernicus 2018). .....	xiv
<b>Figure 3:</b> Thiessen Polygons of the rain gauges around Pinios' basin.....	xv
<b>Figure 4:</b> Curve Number values for normal soil conditions.....	xvii
<b>Figure 5:</b> Synthetic Unit Hydrograph of Snyder. ....	xviii
<b>Figure 6:</b> SCS Unit Hydrographs. ....	xviii
<b>Figure 7:</b> Unit Hydrograph using Time Area Diagram. ....	xix
<b>Figure 8:</b> Rainfall Erosivity factor R, using the Modified Fournier Index.....	xxi
<b>Figure 9:</b> Soil Erodibility factor K, using the Wischmeier and Smith's nomograph.....	xxii
<b>Figure 10:</b> Slope Length and Steepness factor LS, using the Mitasova and Mitas (2001) equation. ....	xxiii
<b>Figure 11:</b> Cover Management factor C. ....	xxiv
<b>Figure 12:</b> Support Practice factor P. ....	xxv
<b>Figure 13:</b> Erosion Coefficient Z. ....	xxvi
<b>Figure 14:</b> Flood hydrographs at the outlet point for normal soil conditions and $CN_{II}=80$ ...xxviii	xxviii
<b>Figure 15:</b> Flood hydrographs at the outlet point for dry soil conditions and $CN_I=62.70$ . ...xxviii	xxviii
<b>Figure 16:</b> Flood hydrographs at the outlet point for wet soil conditions and $CN_{III}=90.20$ . ... xxix	xxix
<b>Figure 17:</b> Maximum water depths across the river. ....	xxx
<b>Figure 18:</b> Maximum flow velocities across the river. ....	xxx
<b>Figure 19:</b> Soil erosion using RUSLE model. ....	xxxii
<b>Figure 20:</b> Soil erosion using EPM. ....	xxxii

## List of Tables

<b>Table 1:</b> Summary of the sub-basin geomorphological characteristics. ....	xiii
<b>Table 2:</b> Manning’s n values, based on CORINE codes (Papaioannou, et al., 2018). ....	xix
<b>Table 3:</b> Geological formation’s classification based on soil’s erodibility. ....	xxvii
<b>Table 4:</b> Soil erosion results. ....	xxxi
<b>Table 5:</b> Sediment yield results. ....	xxxi

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο των πλημμυρών, αλλά και της μεταφοράς φερτών μετά από μία έντονη βροχόπτωση είναι σύνηθες, ειδικά στις χώρες της Μεσογείου όπου τα επεισόδια βροχής έχουν κατά βάση μικρή διάρκεια και μεγάλη ένταση. Οι μελέτες σε αστικές και ημιαστικές περιοχές, με πετρώματα υψηλής διαβρωσιμότητας, ειδικά μετά από πυρκαγιές, είναι απαραίτητες για την πρόληψη δυσάρεστων γεγονότων. Η επιστήμη, με βάση τα προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί, και που κάποια εξ αυτών χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία, είναι ικανή και οφείλει να εκτιμήσει τον κίνδυνο και να τον προλάβει.

## 1.1 Νομικό Πλαίσιο-Οδηγία 2007/60

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, στις 23 Οκτώβρη 2007, εξέδωσε τη συγκεκριμένη οδηγία αναφορικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνων πλημμύρας. Συγκεκριμένα, έλαβαν υπόψη ορισμένες εκτιμήσεις που έγιναν πάνω στο θέμα της δημόσιας προστασίας έναντι των πλημμυρών:

1. Υπάρχει πιθανότητα ορισμένες πλημμύρες να οδηγήσουν σε θανάτους και μετακινήσεις πληθυσμών, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο την οικονομική δραστηριότητα της εκάστοτε περιοχής.
2. Η κατασκευή μεμονωμένων κατοικιών ή και οικισμών σε πλημμυρικές περιοχές, η μείωση της ικανότητας των εδαφών να απορροφούν μέρος της απορροής, αλλά και η κλιματική αλλαγή, συντελούν στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων.
3. Για να περιοριστούν οι αρνητικές συνέπειες των προαναφερθέντων φαινομένων, ενδείκνυται οι μελέτες και τα μέτρα προστασίας των πολιτών και του περιβάλλοντος να γίνονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, και έτσι να αναπτύσσονται Σχέδια Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής ποταμού.
4. Η αποτελεσματική πρόληψη και ο περιορισμός των πλημμυρών απαιτούν συνεργασία με τρίτες χώρες. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, συμπεριλαμβανομένων και των φαινομένων πλημμύρας, υπάρχει ενίσχυση και υποστήριξη από άλλα κράτη στις επεμβάσεις βοήθειας της πολιτικής προστασίας.
5. Το Ταμείο Αλληλεγγύης της Ευρωπαϊκής Ένωσης προχωράει σε παροχή χρηματοοικονομικής αρωγής σε περιπτώσεις μεγάλης καταστροφής.
6. Η Κοινότητα και η εκάστοτε κυβέρνηση οφείλουν να εξετάζουν τις επιπτώσεις των πολιτικών τους στους κινδύνους και στη διαχείριση κινδύνων πλημμύρας.
7. Στην Κοινότητα μπορεί να εμφανίζονται διαφορετικοί τύποι πλημμύρας (αστραπιαία, σε αστικά κέντρα, από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές), οπότε τα Σχέδια Διαχείρισής τους θα πρέπει να καθορίζονται με βάση τις εκάστοτε τοπικές και περιφερειακές παραστάσεις.

8. Ορισμένες πλημμύρες (εκτός κατοικημένων περιοχών) μπορούν να θεωρηθούν μικρής σημασίας.
9. Είναι απαραίτητο να προβλεφθεί καθιέρωση Χαρτών Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας, οι οποίοι θα εμπεριέχουν πληροφορίες για δυνητικές αρνητικές συνέπειες με βάση διαφορετικά σενάρια πλημμύρας, αλλά και για πιθανές πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης.
10. Θα πρέπει να καθιερωθούν Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας, που να λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν και να παρέχουν λύσεις για τις ανάγκες αυτών των περιοχών, τα οποία να επανεξετάζονται και να επικαιροποιούνται τακτικά. Η Κοινότητα θα πρέπει να μη λαμβάνει μέτρα πρόληψης ή αντιμετώπισης που να αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο πλημμύρας σε άλλες γειτονικές κοινότητες.
11. Η ανάπτυξη Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμού, στο πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, και Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας, στο πλαίσιο της παρούσας οδηγίας, αποτελούν στοιχεία της ολοκληρωμένης διαχείρισης της λεκάνης απορροής ποταμών. Οπότε θα πρέπει να αξιοποιούνται και τα δύο.

Η Οδηγία 2007/60 ορίζει σαν «πλημμύρα» την προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό, και αντίστοιχα ως «κίνδυνο πλημμύρας» το συνδυασμό της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με τη συγκεκριμένη πλημμύρα.

Επιπρόσθετα, συστήνει σε κάθε Κοινότητα την προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας στις περιοχές εμβέλειάς της. Στην αξιολόγηση πρέπει να συμπεριλαμβάνονται: 1) χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού με τα όρια των λεκανών, διαθέσιμα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και χρήσεις γης, 2) ιστορικό πλημμυρών με σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις και περιγραφή εκείνων των πλημμυρών που θα μπορούσαν να προβλεφθούν οι συγκεκριμένες επιπτώσεις, 3) αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών μελλοντικών πλημμυρών στη δημόσια υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα.

Η Οδηγία 2007/60 συστήνει επίσης, την κατάρτιση Χαρτών Επικινδυνότητας πλημμυρών σε επίπεδο λεκάνης απορροής, οι οποίοι καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν σύμφωνα με τα παρακάτω σενάρια:

1. Πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων.
2. Πλημμύρες μέσης πιθανότητας (Περίοδος επαναφοράς πάνω από 100 χρόνια).
3. Πλημμύρες υψηλής πιθανότητας.

Για καθένα από τα παραπάνω σενάρια πρέπει να διατίθενται πληροφορίες σχετικά με την έκταση της πλημμύρας, το βάθος του νερού και την ταχύτητα ροής των υδάτων.

Όσον αφορά τα Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας, αυτά οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη το κόστος, τα οφέλη, την έκταση της πλημμύρας και τις οδούς-περιοχές αποστράγγισης των πλημμυρών, τη χωροταξία, τις χρήσεις γης. Προωθείται, επίσης, να περιλαμβάνουν βιώσιμες πρακτικές χρήσεων γης, βελτίωση της συγκράτησης των υδάτων, καθώς και την ελεγχόμενη κατάκλιση ορισμένων περιοχών σε περίπτωση πλημμύρας.

Τέλος, οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας, οι Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας, αλλά και τα Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας οφείλουν να επικαιροποιούνται ανά εξαετία.

## **1.2 Αξιολόγηση τρωτότητας σε διάβρωση εδαφών**

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/EK, αναφορικά με τη γεωλογική τρωτότητα των εδαφών, βασικός στόχος είναι ο εντοπισμός των περιοχών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων, αλλά και ο εντοπισμός των περιοχών με αυξημένη απώλεια εδάφους.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την Ειδική Γραμματεία Υδάτων, η μέση ετήσια απώλεια εδαφών συστήνεται να εκτιμάται με βάση το μοντέλο RUSLE, με δεδομένα που παρέχει δωρεάν το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πληροφοριών Εδάφους (ESDAC) και οι τελικοί χάρτες εδαφικής απώλειας να έχουν μέγεθος ψηφιακών κελιών 500 m x 500 m. Βασικοί λόγοι για την επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου ως το πλέον κατάλληλο είναι οι εξής:

1. Η ποσότητα των φερτών που μπορεί να αναμένεται μετά από επεισόδια βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής εξαρτάται από τη μέση εισερχόμενη στερεοπαροχή σε αυτήν.
2. Η μέση εισερχόμενη στερεοπαροχή μπορεί να θεωρηθεί σε μακροχρόνια βάση πως ισούται με τη μέση ετήσια διάβρωση συνολικά της ανάντη λεκάνης απορροής.

Τέλος, για την αξιολόγηση των εδαφών, με βάση τη μέση ετήσια εδαφική τους απώλεια, η διαβάθμιση γίνεται σε πέντε κλάσεις ως εξής:

1. Πολύ χαμηλή < 5 t/ha/έτος
2. Χαμηλή 5-10 t/ha/έτος
3. Μέση 10-20 t/ha/έτος
4. Υψηλή 20-50 t/ha/έτος
5. Πολύ Υψηλή >50 t/ha/έτος

### 1.3 Αντικείμενο Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην υδρολογική ανάλυση και υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού Ηλείας, και στη διερεύνηση της στερεομεταφοράς σε όλη την έκταση της λεκάνης. Κατά την υδρολογική ανάλυση, υπολογίζονται τα τελικά πλημμυρογράφημα εξόδου με βάση τις μεθόδους μετασηματισμού βροχής σε απορροή: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder, Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS και Μοναδιαίο Υδρογράφημα μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών. Κατά την υδραυλική προσομοίωση, μέσω του λογισμικού HEC-RAS, υπολογίζονται τα μέγιστα βάθη και οι μέγιστες ταχύτητες ροής στο πεδίο κατάκλισης κατάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης μελέτης. Κατά τη διερεύνηση της στερεομεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκολία στην εκτίμηση των παραμέτρων και την αβεβαιότητα που συνοδεύει τον τελικό υπολογισμό της, εκτιμάται η εδαφική διάβρωση ανά μονάδα επιφάνειας της λεκάνης με βάση το μοντέλο RUSLE και τη μέθοδο Gavrilovic. Τέλος, εκτιμάται χωρικά, μέσω του περιβάλλοντος ArcGIS, η συνολική στερεοαπορροή στην έξοδο της λεκάνης με βάση τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά, και με βάση τα μοντέλα RUSLE και Gavrilovic, εκτιμώντας τους συντελεστές στερεοαπορροής και κατακράτησης αντίστοιχα από σχέσεις της βιβλιογραφίας.

### 1.4 Διάρθρωση Εργασίας

Στο πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η Οδηγία 2007/60, βάσει της οποίας κατασκευάζονται οι Χάρτες Πλημμυρικής Επικινδυνότητας και τα Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας ανά Υδατικό Διαμέρισμα, ενώ δίνονται και βασικοί επεξηγηματικοί ορισμοί για τις έννοιες της «πλημμύρας» και του «κινδύνου πλημμύρας». Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μέθοδος εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης που συστήνεται από το ΥΠΕΚΑ, για την εξαγωγή Χαρτών τρωτότητας σε εδαφική διάβρωση. Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και η διάρθρωσή της.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής της Ηλείας (γεωλογικά, γεωγραφικά, κλιματικά) για την καλύτερη και πληρέστερη κατανόηση των συνθηκών υπό των οποίων εξετάζεται η περιοχή, αλλά και βασικά ανθρωπογενή χαρακτηριστικά (πληθυσμός, οικονομία, Χρήσεις Γης) για την ολοκληρωμένη άποψη γύρω από το θέμα των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν πλημμυρικά επεισόδια, αλλά και επεισόδια κατολισθήσεων ή στερεομεταφοράς στην τοπική κοινωνία της Ηλείας. Τέλος, παρουσιάζεται το ιστορικό πλημμυρών και κατολισθήσεων σε όλο το Νομό Ηλείας, για την τελευταία εικοσαετία, ώστε να υπάρχει πλήρης άποψη γύρω από το θέμα της αναγκαιότητας κατασκευής αλλά και ενίσχυσης των ήδη υφιστάμενων αντιπλημμυρικών και αντικατολισθητικών έργων.

Στο τρίτο Κεφάλαιο αναλύονται τα λογισμικά και τα προγράμματα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, μέσω των οποίων υπολογίστηκαν και εκτιμήθηκαν τα τελικά αποτελέσματα.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής της τελικής λεκάνης απορροής, του υδρογραφικού δικτύου και άλλων παραγόντων σε περιβάλλον ArcGIS για την εισαγωγή του στη συνέχεια στο λογισμικό HEC-HMS. Ύστερα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την εξαγωγή των τελικών πλημμυρογραφήματων. Αρχικά αναλύεται η μέθοδος επιφανειακής ολοκλήρωσης της σημειακής βροχόπτωσης που προέκυψε από τις όμβριες καμπύλες και η εξαγωγή του τελικού υετογραφήματος, μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά στην φυσική έννοια του αριθμού καμπύλης απορροής CN και στη συνεισφορά του στην εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων. Κατόπιν, παρουσιάζεται η μεθοδολογία αλλά και η φυσική σημασία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος για τις μεθόδους Snyder και SCS, αλλά και του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών. Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που εφαρμόστηκε στο περιβάλλον HEC-HMS για την εξαγωγή των τριών πλημμυρογραφήματων.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής των τελικών Χαρτών Επικινδυνότητας κατάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης απορροής και ο υπολογισμός των μέγιστων βαθών και ταχυτήτων ροής, με βάση το συντελεστή τραχύτητας Manning.

Στο έκτο Κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής στη λεκάνη απορροής. Αρχικά, γίνεται αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου RUSLE και των συντελεστών που το απαρτίζουν. Προτείνεται μία πληθώρα σχέσεων για την εκτίμησή τους, η τελική επιλογή των οποίων άπτεται στις επικρατούσες συνθήκες της λεκάνης και στην εμπειρία του μελετητή, λόγω της αβεβαιότητας που διακατέχει τις ήδη δύσκολα εκτιμήσιμες παραμέτρους. Με παρόμοια λογική αναλύεται και η μέθοδος Gavrilovic, η οποία εκτιμά την εδαφική διάβρωση ανά  $\text{km}^2$  αλλά και την τελική στερεοαπορροή στη λεκάνη, με βάση το συντελεστή κατακράτησης R. Τέλος, παρουσιάζεται η σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά που εκτιμά την τελική στερεοαπορροή στη λεκάνη, με κύριους παράγοντες τη βροχόπτωση και το καθεστώς των γεωλογικών σχηματισμών.

Στο έβδομο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής και της υδραυλικής ανάλυσης, αλλά και οι τελικές εκτιμήσεις της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής συγκριτικά για κάθε μέθοδο και μοντέλο.

Τέλος, στο όγδοο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση τόσο των ειδικών συμπερασμάτων, αναφορικά με τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής που επιλέχθηκε για εξέταση, όσο και των γενικών συμπερασμάτων που εξάγονται με βάση μία ολόπλευρη οπτική, γύρω από τα φυσιογραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν τις εκάστοτε λεκάνες. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή της Ηλείας, καθώς πρόκειται για μία ισχυρά πληγόμενη περιοχή,



όχι μόνο λόγω των ισχυρών βροχοπτώσεων και της γεωλογίας του εδάφους, αλλά λόγω των πυρκαγιών το 2007, τα απότοκα των οποίων διαφαίνονται ακόμη και τώρα, 15 χρόνια μετά.

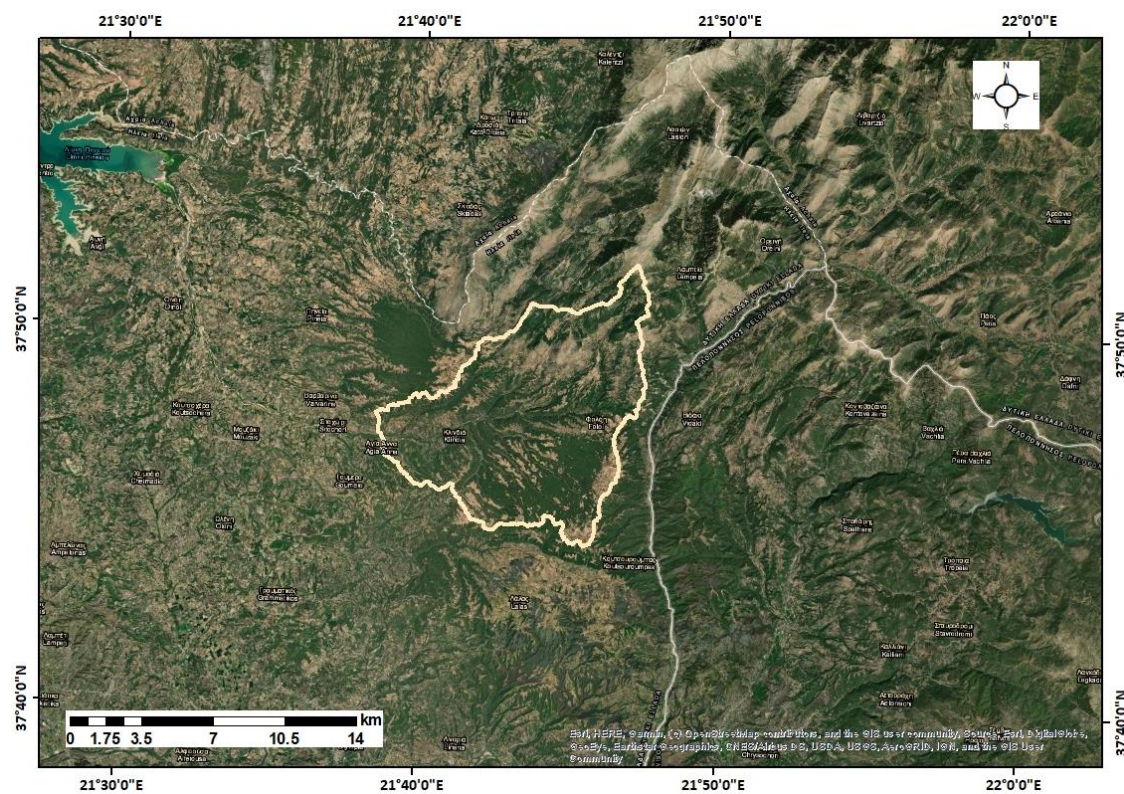
## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά

#### 2.1.1 Γεωγραφικά και μορφολογικά στοιχεία

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Βόρειας Πελοποννήσου (EL02) με συνολική έκταση 7397 km<sup>2</sup>. Το συγκεκριμένο Υδατικό Διαμέρισμα, αποτελείται από τρεις Λεκάνες Απορροής Ποταμών, αυτές των Ρεμάτων Παραλίας Βόρειας Πελοποννήσου (EL27), της Κεφαλονιάς-Ιθάκης-Ζακύνθου (EL45) και αυτή του Πείρου-Βέργα-Πηνείου. Ο Πηνειός είναι ο μεγαλύτερος ποταμός του Υδατικού Διαμερίσματος με συνολικό μήκος περίπου 94.27 km. Πηγάζει στην οροσειρά του Ερύμανθου στη Βόρεια Πελοπόννησο σε υψόμετρο περίπου 1128 m και απορρέει στον ταμιευτήρα του φράγματος του Πηνείου στο Κέντρο Ηλείας. Κατάντη του φράγματος, η ροή του ποταμού είναι προς τα δυτικά και εν τέλει εκρέει στο Ιόνιο Πέλαγος.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας βρίσκεται στο Νότιο-Ανατολικό τμήμα του ΥΔ Βόρειας Πελοποννήσου, έχει συνολική έκταση 101 km<sup>2</sup> και πρόκειται για υπολεκάνη απορροής του ποταμού Πηνείου (Ηλειακού). Βρίσκεται στα σύνορα των νομών Ηλείας και Αχαΐας, στο ηπειρωτικό μέρος και των δύο νομών, με αποτέλεσμα το ανάγλυφό της να χαρακτηρίζεται ως ημιορεινό και ορεινό, με μεγάλες κλίσεις στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα και κατά μήκος του υδροκρίτη (Σχήμα 2.1). Τα βασικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής δίνονται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.1: Όριο υπολεκάνης απορροής στο Google Hybrid.

**Πίνακας 2.1:** Χαρακτηριστικά υπολεκάνης απορροής.

Έκταση (km <sup>2</sup> )	101
Μέγιστο Υψόμετρο (m)	1451
Ελάχιστο Υψόμετρο (m)	295
Μέσο Υψόμετρο (m)	674
Μέση Κλίση (%)	27.4

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής (Σχήμα 2.2) έχει δενδριτική μορφή και αποτελείται από χείμαρρους 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξεως κατά Strahler. Το μήκος του κυρίως υδατορεύματος είναι 20.98 km με ροή προς τα δυτικά.



**Σχήμα 2.2:** Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, ανάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης και του πεδίου κατάκλισης.

### 2.1.2 Γεωλογία και Υδρογεωλογία

Γεωλογικά, το Υδατικό Διαμέρισμα Πελοποννήσου αποτελείται κυρίως από αλπικούς σχηματισμούς των γεωτεκτονικών ζωνών Τρίπολης, Πίνδου και Πελαγονικής στα ορεινά και στα ανατολικά, ενώ στα δυτικά και στα νότια αποτελείται κυρίως από σύγχρονες τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις που έχουν γεμίσει τα τεκτονικά κενά.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι εξής:

1. Ζώνη Γαβρόβου–Τρίπολης. Περιλαμβάνει κατά βάση παχιά στρώματα ασβεστολίθων, ενώ μεταξύ των ποταμών Πηνειού και Πείρου εμφανίζονται ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και ιλυόλιθοι του φλύσχη.

2. Ιόνιος Ζώνη. Περιλαμβάνει μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με πυριτόλιθους και στρώματα φλύσχη.
3. Ζώνη Πίνδου. Περιλαμβάνει λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, κερατόλιθους και στρώματα φλύσχη.
4. Πελαγονική ζώνη. Περιλαμβάνει κυρίως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους.
5. Μεταλικοί σχηματισμοί του νεογενούς και τεταρτογενούς. Αποτελούνται από εναλλαγές ανδρομερών υλικών (κροκάλες, κροκαλοπαγή, άμμοι).

Στην περιοχή μελέτης, συναντάται σε ένα ποσοστό η Ζώνη Πίνδου, το κύριο γεωλογικό υλικό, όμως, είναι οι λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις. Πρόκειται για Πλειστοκαινικές αποθέσεις που απαρτίζονται από άργιλο, πηλό, άμμο, κροκαλοπαγή και κοκκινοχώματα. Συναντώνται, ακόμη, και Αλλουβιακές προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιων αποθέσεων, καθώς επίσης και σε ένα μικρό ποσοστό ηφαιστειακοί τόφφοι και θαλάσσιες αποθέσεις.

Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται τα πετρώματα που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης και το αντίστοιχο ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνουν στη λεκάνη απορροής.

**Πίνακας 2.2:** Γεωλογικοί σχηματισμοί περιοχής μελέτης.

Πέτρωμα	Ποσοστό έκτασης (%)
Φλύσχη / «πρώτος» Φλύσχη	27
Ηφαιστειακοί Τόφφοι	3.4
Σύγχρονες προσχώσεις	23.93
Θαλάσσιες αποθέσεις	0.2
Χερσαίες και λιμναίες αποθέσεις	45.47

Όσον αφορά την Υδρογεωλογία της περιοχής, σύμφωνα με τον Υδρολιθολογικό Χάρτη της Ελλάδας (ΥΠΕΝ), η υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών ορίζεται ως εξής:

1. Φλύσχη και «πρώτος» Φλύσχη: Αδιαπέρατος σχηματισμός. Τοπικά, όπου επικρατούν οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή εμφανίζει μικρή έως μέτρια υδροπερατότητα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη περιορισμένων υδροφόρων οριζόντων.
2. Τόφφοι: Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι γενικώς αδιαπέρατα με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα.
3. Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις: Διαφέρουν ανάλογα με την ιζηματολογική σύσταση του υλικού. Στην περιοχή μελέτης πρόκειται για αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας.

### 2.1.3 Κλιματικά στοιχεία

Το κλίμα της Ηλείας είναι θαλάσσιο μεσογειακό στις παράκτιες περιοχές, ενώ χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό στο εσωτερικό και ορεινό τμήμα του Νομού. Τους

φθινοπωρινούς και τους χειμερινούς μήνες τα ύψη βροχής αγγίζουν τα 177 mm, με το Δεκέμβρη να είναι ο πιο βροχερός μήνας με μέσο όρο ημερών Υετού τις 13 ημέρες. Η θερμοκρασία της Ηλείας σπάνια κατεβαίνει υπό το μηδέν, και ορισμένες φορές, ειδικά, στις πεδινές περιοχές υπερβαίνει τους 40 °C. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία αγγίζει το 68%, με υγρότερο μήνα το Δεκέμβριο. Όσον αφορά τον άνεμο, η έντασή του κυμαίνεται από 3.5 έως 5.5 Km/h, και η κατεύθυνσή του είναι κυρίως βορειοδυτική.

Με βάση το μετεωρολογικό σταθμό της Ε.Μ.Υ. «Πύργος (Pyrgos)» (Lon: 21.42, Lat: 37.67, H: 13 m), που ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Δυτικής Ελλάδας, συλλέχθηκαν κλιματικά δεδομένα για τη χρονική περίοδο 1975-2010, που κωδικοποιούν τα βασικά κλιματικά χαρακτηριστικά του Ν. Ηλείας.

Στα Σχήματα 2.3 και 2.4 φαίνονται γραφικά το μέσο μηνιαίο ύψος Υετού και οι μέσες ημέρες Υετού με βάση τα δεδομένα της Ε.Μ.Υ. Παρατηρείται ότι ο πιο βροχερός μήνας είναι ο Δεκέμβριος με μέσο ύψος βροχής 164 mm και μέσες ημέρες βροχής 13. Να σημειωθεί ότι τα ύψη βροχής που παρατηρούνται είναι υπερδιπλάσια από τις υπόλοιπες περιοχές της ανατολικής Πελοποννήσου. Αξίζει να σημειωθεί πως είναι αρκετά συχνά τα γεγονότα έντονων βροχοπτώσεων με χαλάζι, και ειδικά στα ορεινά του Νομού, στο κέντρο της Πελοποννήσου, παρατηρούνται φαινόμενα χιονόπτωσης μεγάλης διάρκειας.

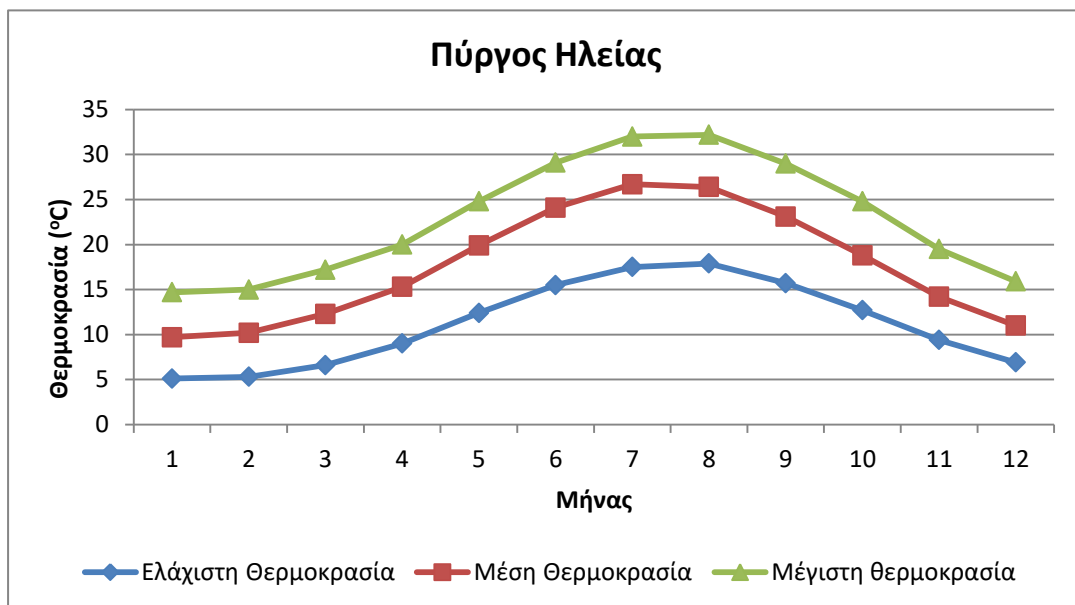


**Σχήμα 2.3** Μέση μηνιαία βροχόπτωση με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.



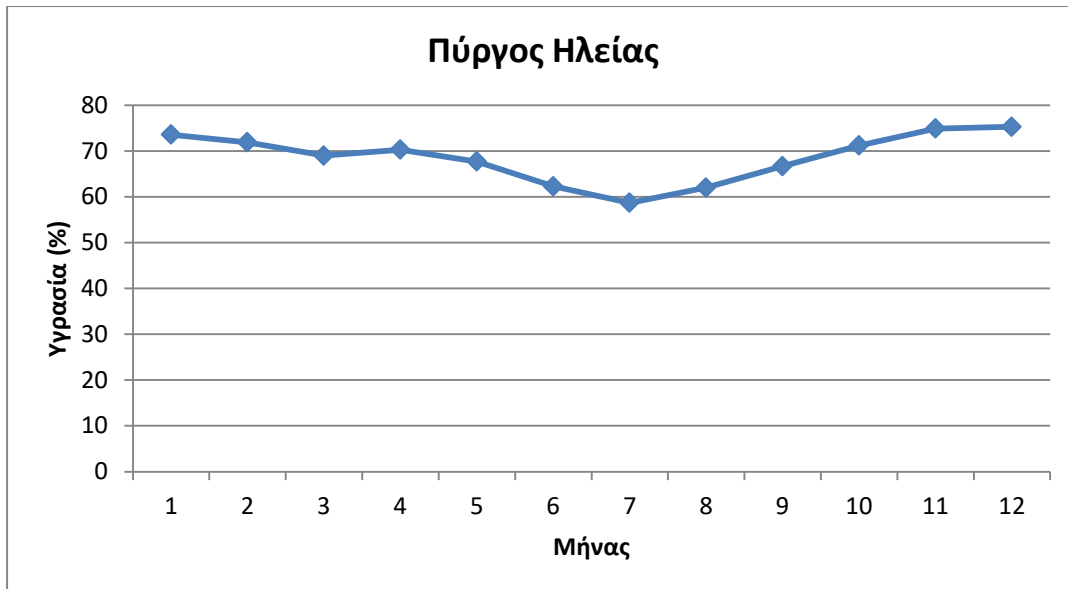
**Σχήμα 2.4:** Ημέρες Υετού με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.

Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζονται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία που καταγράφηκαν στο συγκεκριμένο σταθμό. Επιβεβαιώνεται ότι οι θερμοκρασίες δεν πέφτουν υπό του μηδενός, και ότι ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλης με μέση μηνιαία θερμοκρασία 26.7 °C.



**Σχήμα 2.5:** Μηνιαίες θερμοκρασίες με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία, η οποία κυμαίνεται σταθερά γύρω από το 68%, με τους θερινούς μήνες να κυμαίνεται από 58.7% έως 62%, και τους χειμερινούς να αγγίζει το 75.3%.



**Σχήμα 2.6:** Μέση μηνιαία σχετική υγρασία με βάση το σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.

Κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους, οι άνεμοι πνέουν Βορειοδυτικοί με τη μέγιστη ταχύτητα να καταγράφεται το Φλεβάρη ίση με 5.2 Kt. Η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή της Ηλείας φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.7:** Μέση μηνιαία ένταση του ανέμου στο σταθμό «Πύργος» για την περίοδο 1975-2010.

#### 2.1.4 Συστήματα Επιφανειακών Υδάτων

Κατά την Οδηγία 2000/60/ΕΚ, τα Επιφανειακά Ύδατα διακρίνονται σε 4 κατηγορίες, 1. Ποταμοί, 2. Λίμνες, 3. Μεταβατικά Ύδατα, 4. Παράκτια ύδατα. Αυτά με τη σειρά τους, ανάλογα με το βαθμό επέμβασης σε αυτά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Φυσικά Υδατικά Συστήματα (ΦΥΣ).
2. Τεχνικά Υδατικά Συστήματα (ΤΥΣ): «Ένα σύστημα επιφανειακών υδάτων που δημιουργείται με δραστηριότητα του ανθρώπου» (Οδηγία 2000/60/ΕΚ, Άρθρο 2, παρ. 8).
3. Ιδιαίτερος Τροποποιημένα Υδατικά Συστήματα (ΙΤΥΣ): «Ένα σύστημα επιφανειακών υδάτων, του οποίου ο χαρακτήρας έχει μεταβληθεί ουσιαστικά λόγω φυσικών αλλοιώσεων από τις δραστηριότητες του ανθρώπου και το οποίο ορίζεται από το κράτος μέλος.» (Οδηγία 2000/60/ΕΚ, Άρθρο 2, παρ. 9).

Το Υδατικό Διαμέρισμα Βόρειας Πελοποννήσου περιλαμβάνει τις εξής Λεκάνες Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ):

1. ΛΑΠ Ρεμάτων Παραλίας Βορ. Πελοποννήσου (ΕΛ0227).
2. ΛΑΠ Πείρου- Βέργα- Πηνειού (ΕΛ0228).
3. ΛΑΠ Κεφαλονιάς- Ιθάκης- Ζακύνθου (ΕΛ0245).

Η λεκάνη απορροής, την οποία εξετάζει η παρούσα εργασία, περιλαμβάνεται στη Λεκάνη Απορροής Πείρου- Βέργα- Πηνειού (ΛΑΠ ΕΛ0228). Με βάση τα παραπάνω και σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Βόρειας Πελοποννήσου (ΕΛ02), γίνεται κατ' αρχάς, κατηγοριοποίηση των Υδατικών Συστημάτων στη ΛΑΠ ΕΛ0228, ανάλογα με το είδος τους (Πίνακας 2.3).

**Πίνακας 2.3:** Πλήθος Επιφανειακών Υδατικών Συστημάτων στη ΛΑΠ ΕΛ0228.

Είδος ΥΣ	ΛΑΠ ΕΛ0228
Ποτάμια	29
Λιμναία	0
Μεταβατικά	3
Παράκτια	4
<b>Σύνολο</b>	<b>36</b>

Όσον αφορά τον Πηνειό ποταμό, στον Πίνακα 2.4 παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά του ίδιου του ποταμού και των παραποτάμων του, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Βόρειας Πελοποννήσου (ΕΛ02).

**Πίνακας 2.4:** Βασικά χαρακτηριστικά του ποτάμιου ΥΣ του Πηνειού ποταμού.

Όνομα ΥΣ	Κλάδος	Κατηγορία	Μήκος (km)	Άμεση Λεκάνη απορροής (km <sup>2</sup> )	Ανάντη Λεκάνη Απορροής (km <sup>2</sup> )	Μέση ετήσια Απορροή (hm <sup>3</sup> )
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 1	ΦΥΣ	27.8	168.6	742.9	448.9
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 2	ΦΥΣ	4	10.2	732.7	365.9
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 3	ΙΤΥΣ	3.5	14.2	718.5	360.8
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 4	ΦΥΣ	2.5	3.3	324.2	61.3



ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 5	ΦΥΣ	3.8	8.6	315.7	159.7
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 6	ΦΥΣ	2.5	4.6	235.9	118.4
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 7	ΦΥΣ	7.6	21.7	214.2	116.2
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 8	ΦΥΣ	22.5	89.1	29.1	58.2
ΠΗΝΕΙΟΣ	Π. 9	ΦΥΣ	6.9	29.1	0	14.3

Τα μεταβατικά Υδατικά Συστήματα, με βάση τη γεωλογία και την έκτασή τους διακρίνονται σε:

1. Λιμνοθάλασσες
2. Εκβολές Ποταμών ή Δέλτα

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα μεταβατικά συστήματα στη ΛΑΠ ΕΛ0228, μαζί με τα γεωμορφολογικά τους χαρακτηριστικά. Να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα τόσο οι λιμνοθάλασσες, όσο και τα Δέλτα, αποτελούν προστατευόμενα μέρη και χαρακτηρίζονται από ευρύαλα αλατότητα, μικρό εύρος παλίρροιας (<1 m) και πολύ μικρό βάθος (<30 m).

**Πίνακας 2.5:** Μεταβατικά Υδατα στη ΛΑΠ ΕΛ0228.

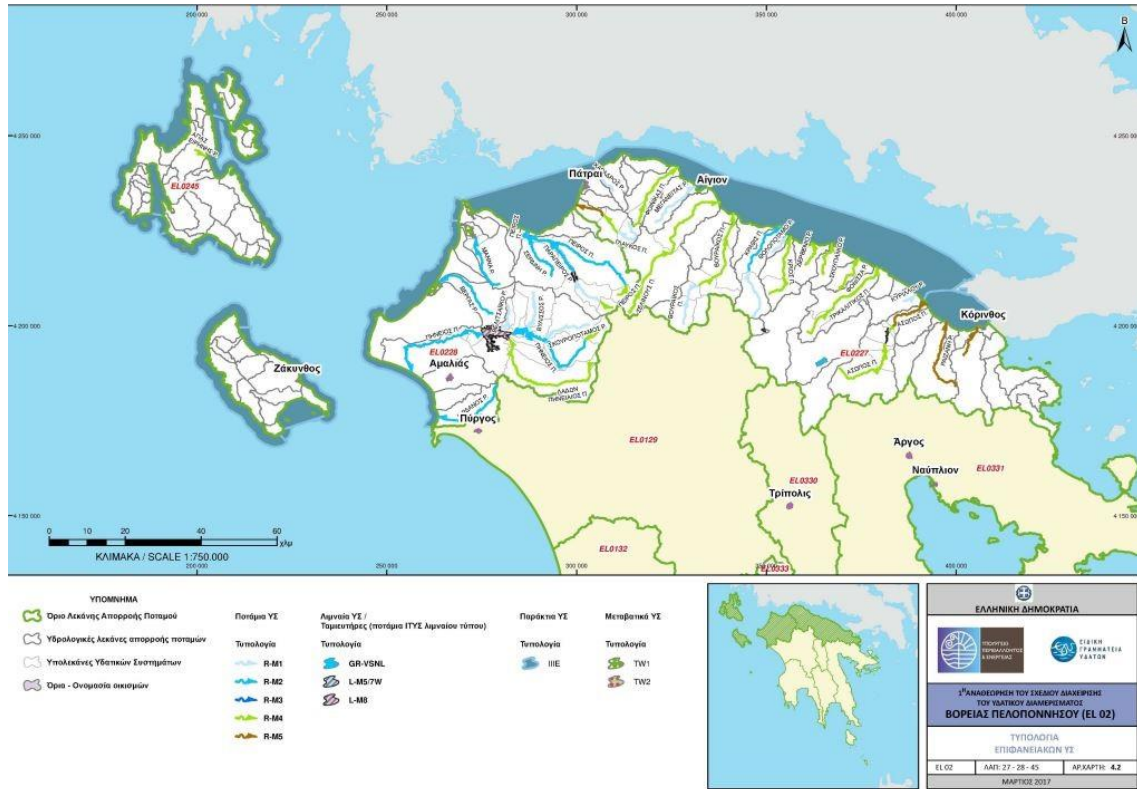
Όνομα ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Περίμετρος (km)
ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΠΑΠΑ ΑΡΑΞΟΣ	ΦΥΣ	4	15.2
ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΚΟΤΥΧΙΟΥ	ΦΥΣ	7	16.6
ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΠΡΟΚΟΠΟΣ	ΦΥΣ	5.6	17.7

Τα παράκτια Υδατικά Συστήματα του ΥΔ Βόρειας Πελοποννήσου (ΕΛ02) ανήκουν όλα στον τύπο ΙΙΙΕ. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα παράκτια υδατικά συστήματα που ανήκουν στη ΛΑΠ ΕΛ0228, μαζί με την έκταση και το μήκος της ακτογραμμής τους.

**Πίνακας 2.6:** Παράκτια Υδατικά Συστήματα της ΛΑΠ ΕΛ0228.

ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Μήκος Ακτογραμμής (km)	Τύπος
ΠΑΤΡΑΪΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	ΦΥΣ	317.7	59.5	ΙΙΙΕ
ΑΚΡ. ΑΡΑΞΟΥ	ΦΥΣ	11.7	8.3	ΙΙΙΕ
ΚΟΛΠΟΣ ΚΥΛΛΗΝΗΣ	ΦΥΣ	108.4	43.6	ΙΙΙΕ
ΑΚΤΕΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΤΟ ΔΙΑΥΛΟ ΖΑΚΥΝΘΟΥ	ΦΥΣ	86.2	56.2	ΙΙΙΕ

Τέλος, στο Σχήμα 2.8, δίνεται μία συνολική εικόνα των Υδατικών Συστημάτων στο ΥΣ Βόρειας Πελοποννήσου.



Σχήμα 2.8: Υδατικά Συστήματα EL02 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων).

## 2.2 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά

### 2.2.1 Διοίκηση

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Ηλείας, που με τη σειρά της υπάγεται διοικητικά στην Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας. Η Περιφερειακή Ενότητα Ηλείας, μετά την εφαρμογή του Καλλικράτη, απαρτίζεται από τους δήμους Ανδραβίδας-Κυλλήνης, Ανδρίτσαινας-Κρεσθενών, Αρχαίας Ολυμπίας, Ζαχάρως, Ήλιδας, Πηνειού και Πύργου. Η περιοχή μελέτης υπάγεται διοικητικά στο Δήμο Αρχαίας Ολυμπίας (Σχήμα 2.9) και αποτελείται από τους οικισμούς Φολόη, Αντρώνι, Κούμανης, Χανιά- Σπαρτούλια, Αγ. Γεώργιος, Κλινδιά και Πεύκη. Ολόκληρος ο δήμος καταλαμβάνει έκταση 544.9 km<sup>2</sup> και βρίσκεται στο ανατολικό μέρος της Περιφερειακής Ενότητας Ηλείας.



**Σχήμα 2.9:** Δήμος Αρχαίας Ολυμπίας (πηγή: wikipedia).

## 2.2.2 Πληθυσμός

Ο συνολικός πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Ηλείας, κατά την απογραφή του 2021 ανέρχεται στα 149350 άτομα, σε αντίθεση με την απογραφή του 2011, όπου κατεγράφησαν 159300 άτομα. Έχει αξία να διερευνηθεί περαιτέρω η συγκεκριμένη μείωση, σε επίπεδο Δήμων. Στον Πίνακα 2.7 φαίνεται η πληθυσμιακή μεταβολή από την τελευταία απογραφή.

**Πίνακας 2.7:** Πληθυσμός Π.Ε. Ηλείας τα έτη 2011 και 2021 (πηγή: Ελληνική Στατιστική Εταιρεία).

Δήμος	2011	2021	Αύξηση/ Μείωση (%)
Πύργου	47995	44482	-7.3
Ήλιδας	32219	29409	-8.7
Ανδραβίδας	21581	22615	+4.8
Ανδρίτσαινας	14109	11273	-20.1
Αρχαίας Ολυμπίας	13409	11307	-15.7
Ζαχάρως	8953	8606	-3.9
Πηνειού	21034	21658	+3

Από τα παραπάνω, διαπιστώνεται εύκολα η μείωση του πληθυσμού ειδικά στους Δήμους Ανδρίτσαινας-Κρεσταινών και Αρχαίας Ολυμπίας. Και οι δύο Δήμοι κάθε καλοκαίρι υποφέρουν από πυρκαγιές (είτε από αμέλεια, είτε από εμπρησμούς), οπότε εύκολα συμπεραίνεται ότι λόγω εκτεταμένων καταστροφών περιουσίας, οι κάτοικοι φεύγουν από τους έως τότε μόνιμους τόπους κατοικίας τους, αναζητώντας διαβίωση είτε σε μεγάλα αστικά κέντρα που προσφέρουν περισσότερες ευκαιρίες επαγγελματικής αποκατάστασης, είτε σε άλλες γειτονικές περιοχές. Ειδικά εάν η οικονομία ενός τόπου εξαρτάται κατά βάση από τις αγροτικές καλλιέργειες, όπως

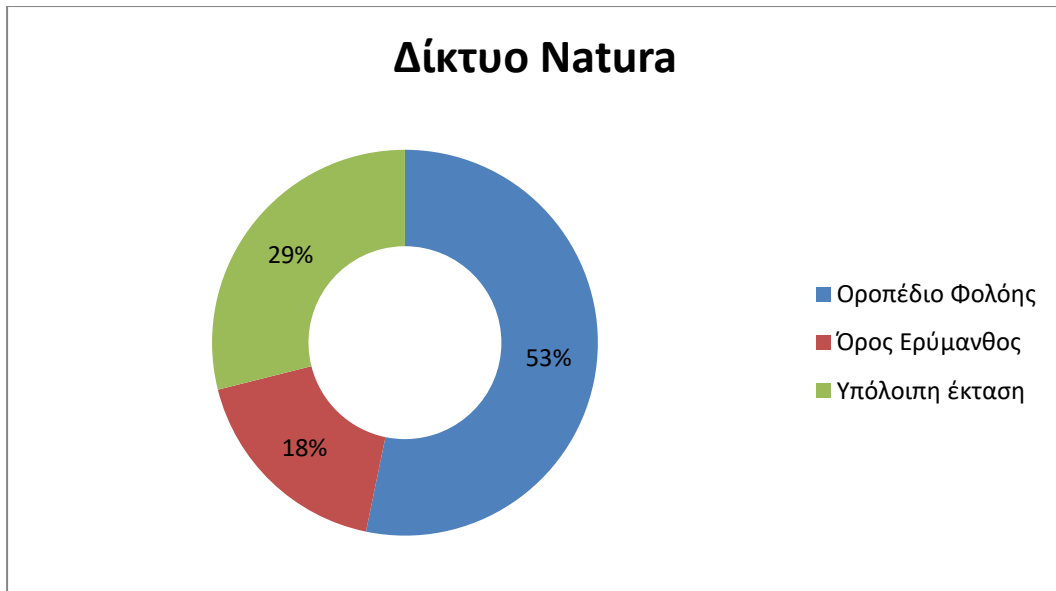
γίνεται σε πολλούς επαρχιακούς οικισμούς, είναι εύλογο το συμπέρασμα ότι, εάν δεν παρέχεται η κατάλληλη οικονομική ενίσχυση στους πληγέντες, η καταστροφή της γης που προκαλούν οι πυρκαγιές, οδηγεί στην ερήμωση των συγκεκριμένων οικισμών.

### **2.2.3 Οικονομία**

Η Ελλάδα σε μεγάλο βαθμό, στηρίζει την ανάπτυξη της οικονομίας της και στον πρωτογενή τομέα πέραν του τουρισμού. Ειδικά η Ηλεία μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ένας «αγροτικός» νομός. Στην πεδιάδα της Ηλείας υφίστανται αροτραίες καλλιέργειες (αραβόσιτος, βαμβάκι, μηδική), ελαιώνες, αμπελώνες, αλλά και καλλιέργειες κηπευτικών. Τα υδάτινα συστήματα που υπάρχουν στην περιοχή κάνουν εύφορο το έδαφος για τις καλλιέργειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε χρόνο παράγονται περίπου 2000 τόνοι σταφίδας, το μεγαλύτερο ποσοστό των οποίων εξάγονται στο εξωτερικό.

### **2.2.4 Περιοχές Natura**

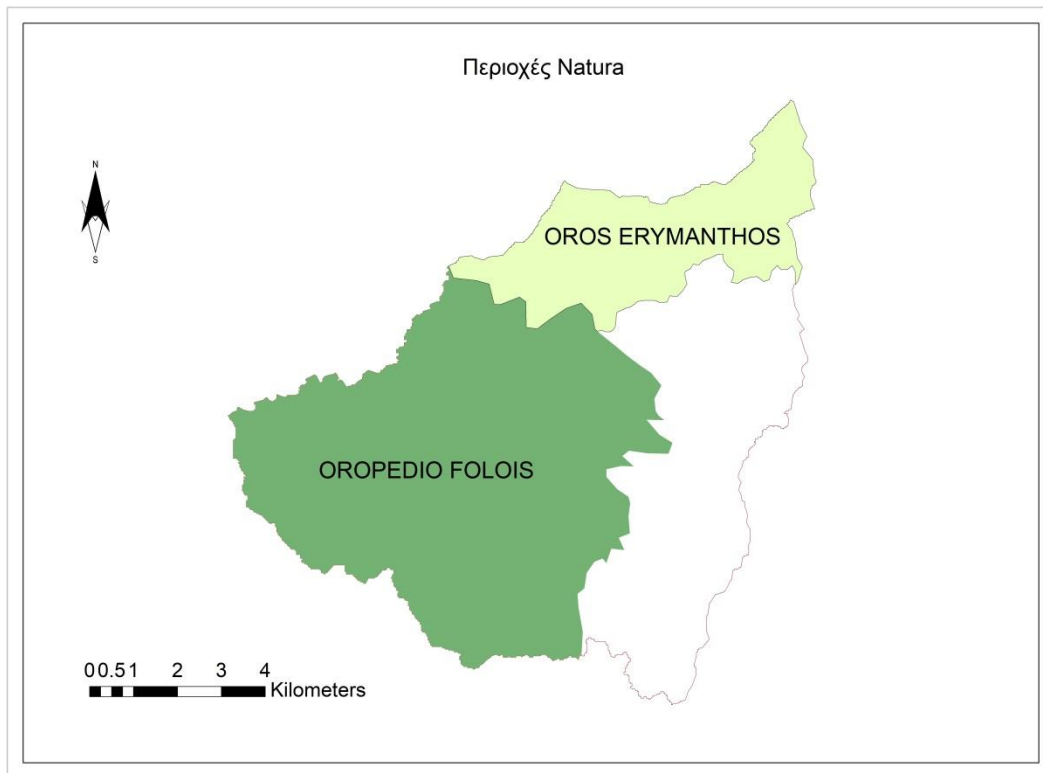
Το δίκτυο Natura 2000 πρόκειται για ένα σύνολο περιοχών που εμπεριέχουν σημαντικά είδη χλωρίδας και πανίδας, που είτε είναι προς εξαφάνιση, είτε είναι σπάνια και ενδημικά, και χρήζουν προστασίας. Περιλαμβάνει χερσαία, λιμνοποτάμια αλλά και θαλάσσια οικοσυστήματα. Συγκεκριμένα, στην περιοχή μελέτης, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής έχει χαρακτηριστεί ως Περιοχή Natura. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το ποσοστό της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης που ανήκει στις προστατευόμενες περιοχές. Πρόκειται στην πλειοψηφία τους για δασικές εκτάσεις, σε κάποιες εκ των οποίων απαγορεύεται το κυνήγι, καθώς ζουν και αναπαράγονται σπάνια είδη πτηνών, όπως ο φιδαιτός (*Circaetus gallicus*), ο χρυσαετός (*Aquila chrysaetos*), η αλκυόνη (*Alcedo atthis*), ο λευκονώτης (*Dendrocopos leucotos*) και ο μουστακοτσιροβάκος (*Sylvia rueppelli*). Συγκεκριμένα το οροπέδιο Φολόης (Σχήμα 2.11) ανήκει στην κατηγορία «Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ)», και το όρος Ερύμανθος ανήκει στην κατηγορία «Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ)» του δικτύου Natura (Σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.10:** Ποσοστό των εκτάσεων Natura επί της συνολικής έκτασης της λεκάνης.



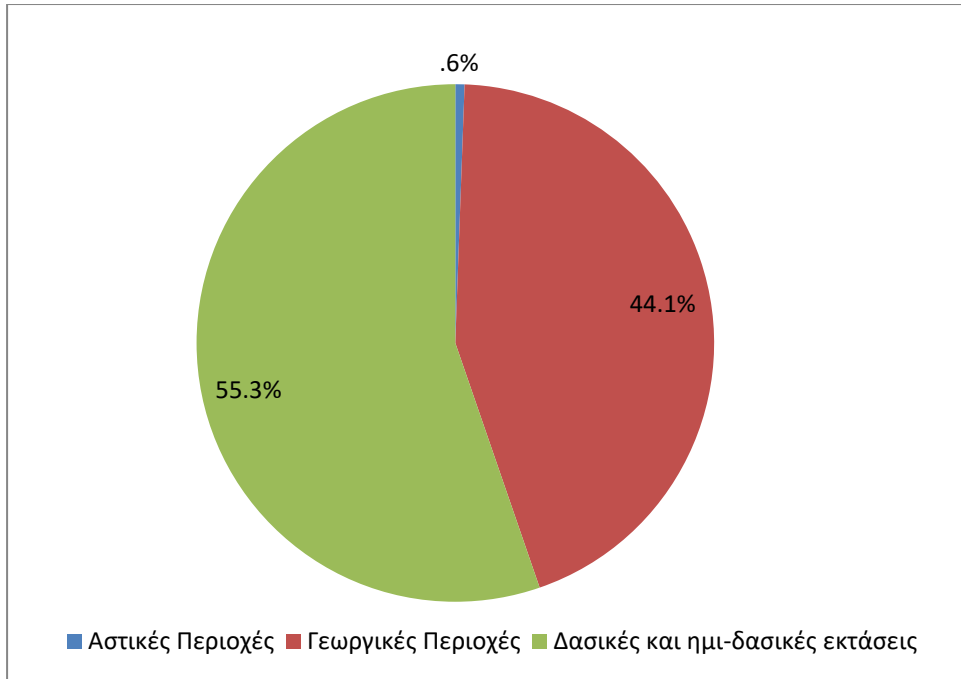
**Σχήμα 2.11:** Το Δρυόδασος της Φολόης (πηγη: wikipedia).



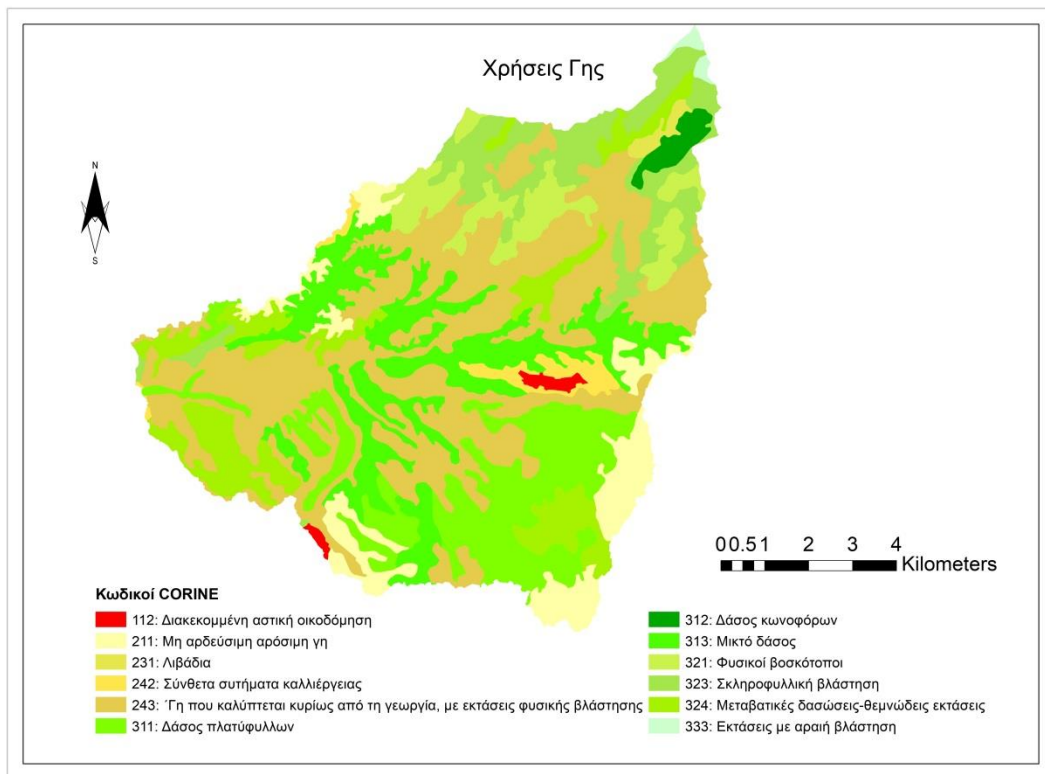
*Σχήμα 2.12: Άποψη περιοχών Natura στο πρόγραμμα ARCGIS.*

### **2.2.5 Χρήσεις Γης**

Όπως αναμενόταν από τα προαναφερθέντα, το μεγαλύτερο ποσοστό της εξεταζόμενης περιοχής αποτελείται από δασικές και ημι-δασικές εκτάσεις και γεωργικές περιοχές, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13 και στο Σχήμα 2.14. Πιο συγκεκριμένα, στο Οροπέδιο Φολόης συναντώνται καστανιές, οξιές, πλατάνια, πουρνάρια, αριές, κουμαριές, καρυδιές, οπωροφόρα δέντρα και στα πιο μεγάλα υψόμετρα σφάκα. Σύμφωνα με την Οδηγία των Οικοτόπων (92/43/ΕΟΚ) του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το Οροπέδιο της Φολόης έχει επιλεγεί σαν σημαντική περιοχή για τα πουλιά της Ελλάδος (ΣΠΠΕ) και ανήκει στους φυσικούς Οικοτόπους της άγριας Πανίδας και της αυτοφυούς Χλωρίδας.



**Σχήμα 2.13:** Ποσοστό χρήσεων γης επί της συνολικής έκτασης της περιοχής.



**Σχήμα 2.14:** Χρήσεις Γης (Ίδια επεξεργασία, πηγή: Copernicus 2018).

## 2.3 Ιστορικό πλημμυρών και κατολισθήσεων

Η Ηλεία πρόκειται για έναν εκ των νομών που κάθε χρόνο πλήττονται από βροχοπτώσεις μεγάλης εντάσεως, που σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους (ανεμοστρόβιλους) που πνέουν στην περιοχή, οδηγούν σε φαινόμενα πλημμύρας, κατολισθήσεων, μεταφοράς φερτών αλλά και λασποροών. Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα καιρικά φαινόμενα των τελευταίων 20 χρόνων και οι συνέπειες που είχαν στην τοπική κοινωνία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις των βροχοπτώσεων κατηγοριοποιούνται σε 4 κατηγορίες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8, για διευκόλυνση της ανάγνωσης και εξαγωγής συμπερασμάτων.

**Πίνακας 2.8:** Κατηγοριοποίηση συνεπειών Καταιγίδας.

Κατηγορία	Συνέπειες
A	Αστικές Πλημμύρες, Συστήματα Όμβριων και Αποχέτευσης
B	Υποδομές ΔΕΗ, Οδικό και Επαρχιακό Δίκτυο
C	Καλλιέργειες, Κτηνοτροφία, Κατοικίες
D	Ανθρώπινες απώλειες, τραυματισμοί, Αρχαιολογικοί χώροι

**Πίνακας 2.9:** Ιστορικό πλημμυρών στην Ηλεία τα τελευταία 20 χρόνια.

Έτος	Περιοχή	Σταθμός	Διάρκεια (ημέρες)	Καιρικά Φαινόμενα	Κατηγορία
5/11/2002	Ηλεία	-	3	Ισχυρές καταιγίδες/ Χαλάζι	C
1/02/2003	Ηλεία	-	1	Ισχυρές καταιγίδες	B,C
8/02/2003	Φρίξα Ηλείας	-	2	Ισχυρές καταιγίδες	B,C
17/02/2003	Ηλεία	-	7	Πολύ ισχυρές καταιγίδες	B,C
17/03/2003	Ηλεία	-	1	Ισχυρή με θυελλώδεις ανέμους	B,C
5/05/2004	Ηλεία	-	1	Ισχυρή με θυελλώδεις ανέμους	C
15/10/2004	Πύργος Ηλείας	Πύργος	12h	Βροχόπτωση 69 mm	A
26/01/2005	Ηλεία	-	1	Ισχυρές καταιγίδες/ Χαλάζι	B,C
1/10/2005	Πύργος Ηλείας	Πύργος	1	Βροχόπτωση 66 mm	A
23/11/2005	Ηλεία	Ανδραβίδα	2	Βροχόπτωση	C



6				101 mm	
22/10/2007	Ηλεία	-	1	Ισχυρή με θυελλώδεις ανέμους	A,B,C
1/07/2008	Αρχαία Ολυμπία	-	1	Ισχυρές καταιγίδες/ Χαλάζι	C,D
22/11/2008	Πύργος Ηλείας		1	Ισχυρές καταιγίδες	A
8/01/2009	Πηνεία Ηλείας	Βαρθολομιό	1	Βροχόπτωση 98 mm	A
13/02/2009	Ηλεία	-	1	Χαλάζι	A,B
3/11/2009	Ηλεία	Ανδρίτσαινα	1	Βροχόπτωση 103 mm και ανεμοστρόβιλοι	A,B,C
27/10/2010	Βαθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	2	Βροχόπτωση 88 mm	A,B
14/10/2011	Βαθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	4	Βροχόπτωση 104 mm (15/10)	A,B,C
6/01/2012	Βαθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	2	Βροχόπτωση 138 mm και ανεμοστρόβιλοι	B,C
5/02/2012	Πύργος Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 178 mm και ανεμοστρόβιλοι	A,B,C,D
14/09/2012	Ηλεία	Πηνεία Ηλείας	2	Βροχόπτωση 145.4 mm και ισχυροί άνεμοι	B,C
29/11/2012	Κατάκολο Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 28 mm και ανεμοστρόβιλοι	A,B,C
18/01/2013	Αρχαία Ολυμπία	Ανδρίτσαινα	1	Βροχόπτωση 78.8 mm	B,C
19/02/2013	Δ. Αρχαίας Ολυμπίας	Ωλένη	1	Βροχόπτωση 44.8 mm	B,C
10/10/2013	Πύργος Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 101.4 mm	A,B,C
16/10/2013	Πύργος Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 32 mm και ισχυροί άνεμοι	A
24/11/2013	Αμπελώνας Ηλείας	Ζαχάρω	2	Βροχόπτωση 57.6 mm(12h), ανεμοστρόβιλοι , κεραυνοί	B,C,D
24/11/2013	Αρχαία Ολυμπία	Ωλένη	2	Βροχόπτωση 30.8 mm και ανεμοστρόβιλοι	B,C

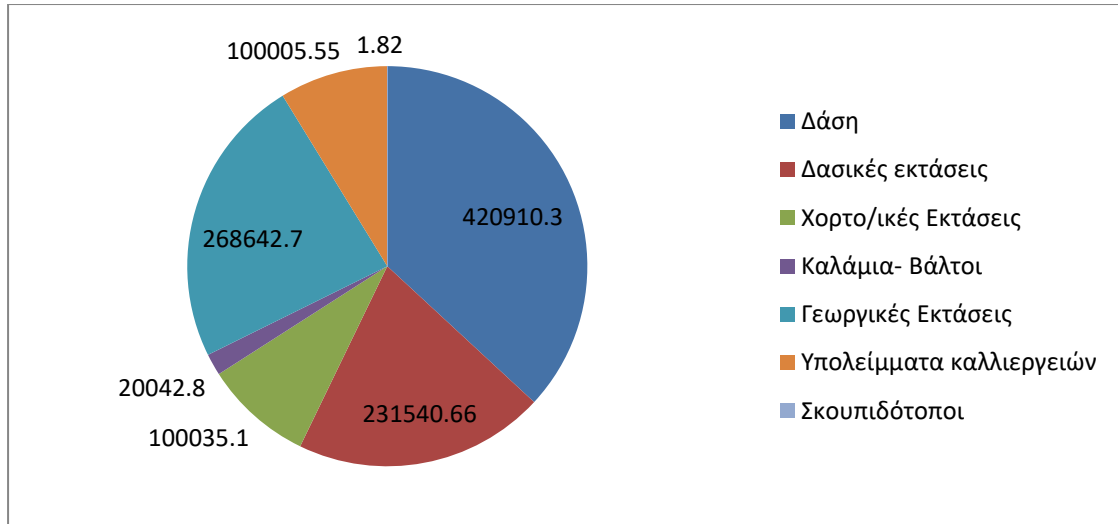
28/01/2014	Αρχαία Ολυμπία	Αρχαία Ολυμπία	1	Βροχόπτωση 38.8 mm	B,C
2/03/2014	Ε.Ο. Κρέσταινας-Ανδρίτσαινας	Πύργος	3	Βροχόπτωση 37.8 mm (2/3)	B,C
23/10/2014	Πύργος Ηλείας	Πύργος	1	Βροχόπτωση 50 mm, ανεμοστρόβιλοι, κεραυνοί	B
22/10/2015	Δ. Ανδραβίδας-Κυλλήνης	Λάμπεια Ηλείας	3	Βροχόπτωση 134 mm	A,B,C
6/09/2016	Πύργος Ηλείας	Πύργος	5	Βροχόπτωση 119 mm και ανεμοστρόβιλοι	A,B,C
7/10/2016	Δ. Πηνειάς	-	1	Ισχυρές βροχοπτώσεις και ανεμοστρόβιλοι	B
6/05/2018	Δ. Αρχαίας Ολυμπία	Ωλένη	2	Βροχόπτωση 104.8 mm	B,C
27/11/2018	Αλεποχώρι Ηλείας	Αμαλιάδα	2	Βροχόπτωση 59 mm	B,C
22/01/2019	Ηλεία	Ανδρίτσαινα	4	Βροχόπτωση 181 mm	B,C
24/09/2019	Μυρσίνη Ηλείας	Πύργος	1	Βροχόπτωση 108.2 mm, ανεμοστρόβιλοι, κεραυνοί	B,C,D
20/11/2019	Πύργος Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 125 mm, ανεμοστρόβιλοι	B
26/11/2021	Βαρθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	5	Βροχόπτωση 132.6 mm, ανεμοστρόβιλοι	A,B,C,D
11/12/2021	Ηλεία	Πηνειά Ηλείας	1	Βροχόπτωση 83 mm	B,C

Σε συνέχεια των παραπάνω, στον Πίνακα 2.10 παρατίθεται το ιστορικό κατολισθήσεων και μεταφοράς φερτών και λάσπης που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια των ως άνω πλημμυρών.

**Πίνακας 2.10:** Ιστορικό Κατολισθήσεων και μεταφοράς φερτών και λάσπης.

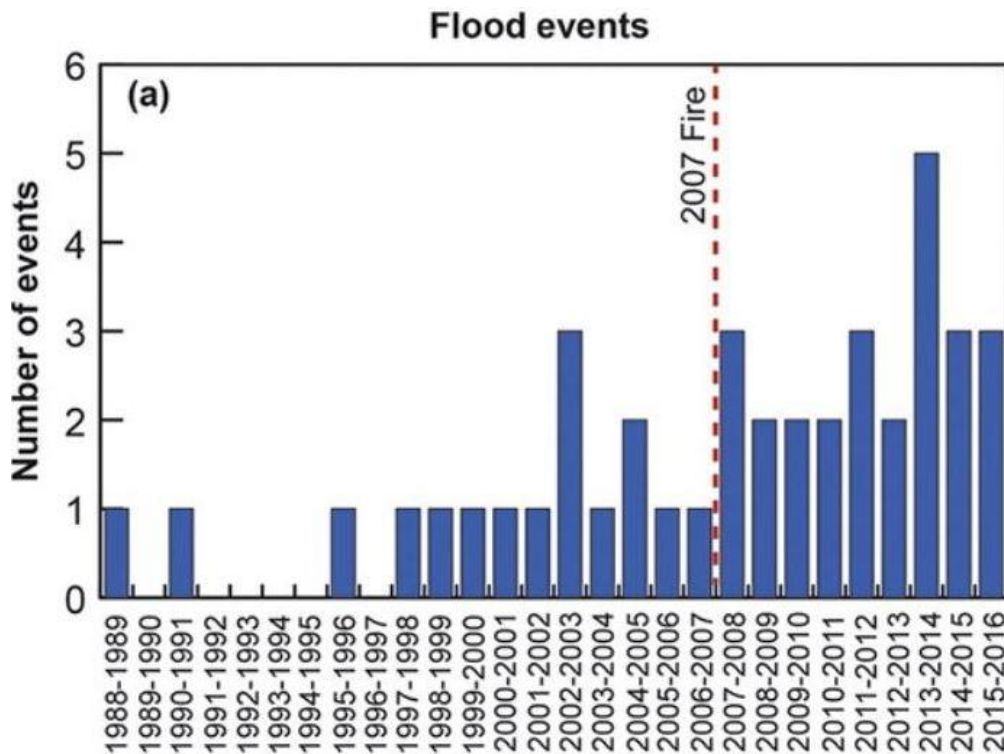
Έτος	Περιοχή	Σταθμός	Διάρκεια (ημέρες)	Καιρικά Φαινόμενα	Κατηγορία
22/10/2007	Ηλεία	-	1	Ισχυρή με θυελλώδεις ανέμους	A,B,C
8/1/2009	Πηνεία Ηλείας	Βαρθολομιό	1	Βροχόπτωση 98 mm	A
27/10/2010	Βαθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	2	Βροχόπτωση 88 mm	A,B
6/1/2012	Βαθολομιό Ηλείας	Βαρθολομιό	2	Βροχόπτωση 138 mm και ανεμοστρόβιλοι	B,C
5/2/2012	Πύργος Ηλείας	Πύργος	2	Βροχόπτωση 178 mm και ανεμοστρόβιλοι	A,B,C,D
18/1/2013	Αρχαία Ολυμπία	Ανδρίτσαινα	1	Βροχόπτωση 78.8 mm	B,C
19/2/2013	Δ. Αρχαίας Ολυμπίας	Ωλένη	1	Βροχόπτωση 44.8 mm	B,C
28/1/2014	Αρχαία Ολυμπία	Αρχαία Ολυμπία	1	Βροχόπτωση 38.8 mm	B,C
2/3/2014	Ε.Ο. Κρέσταινας-Ανδρίτσαινας	Πύργος	3	Βροχόπτωση 37.8 mm (2/3)	B,C
22/10/2015	Δ. Ανδραβίδας-Κυλλήνης	Λάμπεια Ηλείας	3	Βροχόπτωση 134 mm	A,B,C
6/5/2018	Δ. Αρχαίας Ολυμπίας	Ωλένη	2	Βροχόπτωση 104.8 mm	B,C
27/11/2018	Αλεποχώρι Ηλείας	Αμαλιάδα	2	Βροχόπτωση 59 mm	B,C
22/1/2019	Ηλεία	Ανδρίτσαινα	4	Βροχόπτωση 181 mm	B,C
11/12/2021	Ηλεία	Πηνεία Ηλείας	1	Βροχόπτωση 83 mm	B,C

Από τους παραπάνω Πίνακες, παρατηρείται ότι αυξήθηκε η συχνότητα των περιστατικών κατολισθήσεων και μεταφοράς φερτών, μετά το 2007, γεγονός που αιτιολογείται με βάση τις μεγάλες πυρκαγιές που ξέσπασαν στην Ηλεία το καλοκαίρι του 2007. Τον Αύγουστο του 2007, οι φονικές πυρκαγιές στην Ηλεία κατέστρεψαν συνολικά σε όλο το Νόμο 1141178.93 στρέμματα. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται το είδος των εκτάσεων που κήκαν, σύμφωνα με το αρχείο της Πυροσβεστικής.

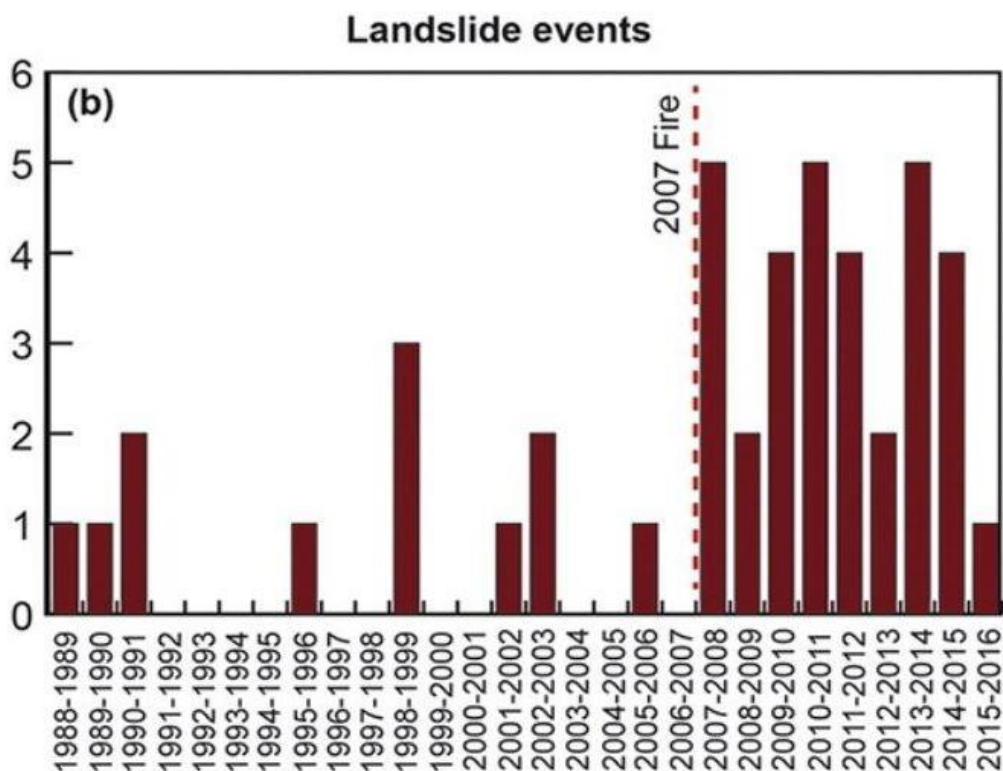


**Σχήμα 2.15:** Εκτάσεις σε στρέμματα που καταστράφηκαν στην Ηλεία το 2007 (πηγή: fireservice).

Συγκεκριμένα, οι πυρκαγιές επηρεάζουν τα υδρογεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους και ειδικά στην περιοχή της Ηλείας, οδήγησαν στην αύξηση της συχνότητας των περιστατικών πλημμύρας (Σχήμα 2.16) και κατολισθήσεων (Σχήμα 2.17) στην περίοδο μετά τις φωτιές, συγκριτικά με πριν τις φωτιές (Diakakis M. N., 2017).



**Σχήμα 2.16:** Αριθμός περιστατικών πλημμύρας πριν και μετά τις πυρκαγιές του 2007 (Diakakis, Nikolopoulos, Vassilakis, & Korakaki E., 2017).



**Σχήμα 2.17:** Αριθμός περιστατικών κατολίσθησης πριν και μετά τις πυρκαγιές του 2007 (Diakakis, Nikolopoulos, Vassilakis, & Korakaki E., 2017).

Παρατηρείται, λοιπόν, πως η Ηλεία είναι μία περιοχή που σε ετήσια βάση πλήττεται από ακραία καιρικά φαινόμενα. Η περιοχή που επιλέχθηκε για μελέτη στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η λεκάνη απορροής ανάντη του οικισμού Αγία Άννα. Πρόκειται για μία περιοχή που πλήχθηκε από τις πυρκαγιές το 2007, με αποτέλεσμα την καταστροφή μεγάλων εκτάσεων περιοχών Natura. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 2.9 και 2.10, οι σταθμοί πέριξ της περιοχής της Αγίας Άννας, έχουν καταγράψει μεγάλα ύψη βροχής και περιστατικά κατολισθήσεων, με σημαντικές συνέπειες στην τοπική κοινωνία. Θεωρήθηκε, συνεπώς, απαραίτητη η μελέτη της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής, τόσο για την εξέταση του πλημμυρικού κινδύνου, όσο και για τη διερεύνηση της τάξης μεγέθους της εδαφικής διάβρωσης, με απώτερο στόχο την πρόληψη απέναντι σε δυσάρεστα γεγονότα.

## 3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

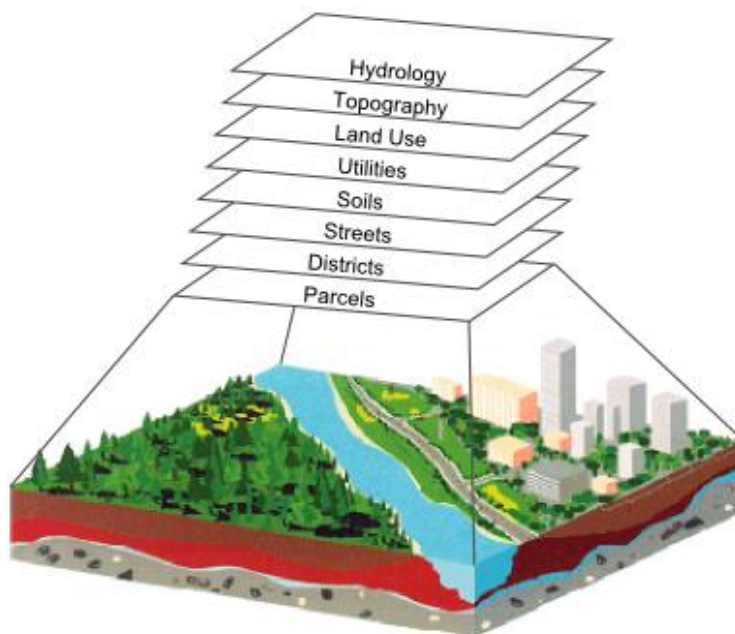
### 3.1 ArcGIS 10.5.1

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), γνωστά και ως Geographical Information Systems (G.I.S.), αποτελούν υπολογιστικά συστήματα, προϊόν της εταιρείας ESRI, τα οποία χρησιμοποιώντας γεωγραφικά δεδομένα, εκτελούν μία σειρά από λειτουργίες διαχείρισης και ανάλυσης δεδομένων. Βασική λειτουργία τους είναι η χωρική ανάλυση, δηλαδή η χαρτογράφηση και η επεξεργασία χωρικών δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών και την επακόλουθη λήψη αποφάσεων (Κάβουρας Μ., 2016).

Ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας, εκτός από τις υπολογιστικές τεχνικές και το λογισμικό, αποτελείται και από τα εξής:

1. Το σύστημα του Υπολογιστή (hardware)
2. Τα χωρικά δεδομένα (data)
3. Τη διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων (data management system).
4. Τους εκάστοτε χρήστες (users)

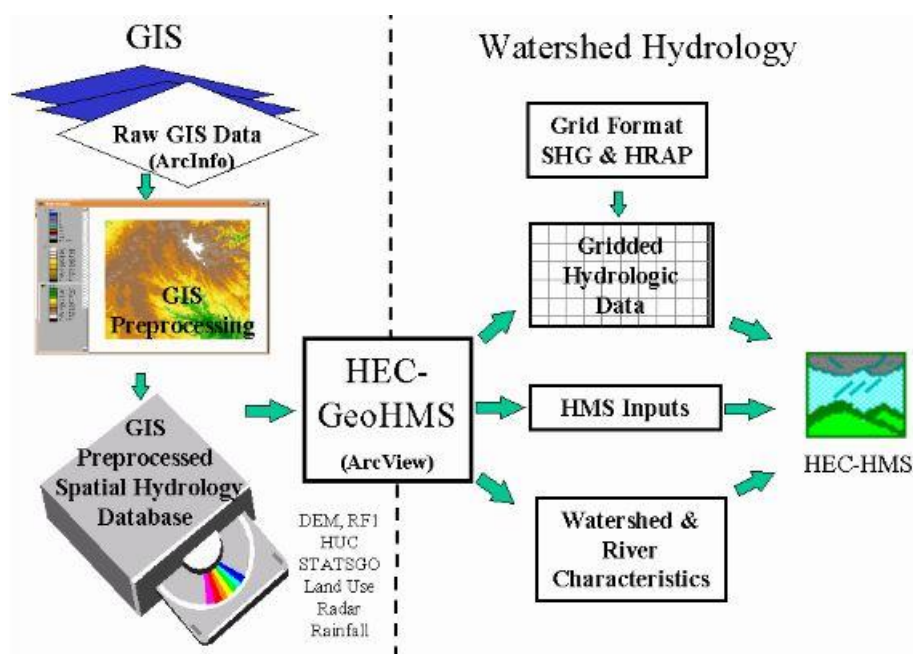
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, στον τομέα της Υδρολογίας, το περιβάλλον ArcGIS συντελεί στη σύνθεση και στην επεξεργασία των χωρικών πληροφοριών που εισάγονται (π.χ. γεωλογία, υψόμετρο) και εξάγει σημαντικές πληροφορίες και χάρτες που δυνητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιβαλλοντικές μελέτες και για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας ασφάλειας. Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί αρκετές εργαλειοθήκες (ArcHydro), ως επεκτάσεις του ArcMap με συγκεκριμένα βήματα και υπολογιστικές τεχνικές.



**Σχήμα 3.1:** Σύνθεση χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων G.I.S. (πηγή: ESRI, ArcMap 10.8.).

### 3.2 HEC-GeoHMS 10.5

Μία ακόμη επέκταση του ArcGIS είναι το λογισμικό Hydrologic Engineering Center's Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS). Πρόκειται για δημιουργία της Αμερικάνικης ομάδας μηχανικών United States Army Corps of Engineers (USACE), με σκοπό την οπτικοποίηση των χωρικών δεδομένων, τη χωρική ανάλυση και την εξαγωγή υδρολογικών δεδομένων (π.χ. λεκάνες απορροής, υδατορεύματα) για περαιτέρω ανάλυση στο πρόγραμμα HEC-HMS. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διεργασίες του HEC-GeoHMS, σαν συνέχεια του ArcGIS.

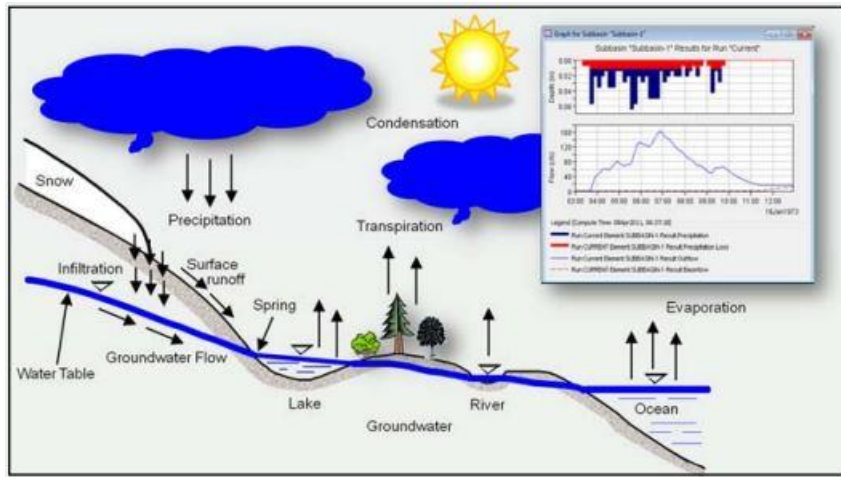


Σχήμα 3.2: Σύνοψη προετοιμασίας δεδομένων για το HEC-HMS (πηγή: anakteknik.co.id).

### 3.3 HEC-HMS 4.9

Το Hydrologic Modeling System (HEC- HMS) πρόκειται για ένα υδρολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από την Αμερικάνικη ομάδα μηχανικών United States Army Corps of Engineers (USACE), για την ανάλυση διαφόρων υδρολογικών διεργασιών. Το λογισμικό περιλαμβάνει κλασσικές διαδικασίες υδρολογικής ανάλυσης όπως τα μοναδιαία υδρογράφηματα (Μ.Υ.), αλλά και πιο εξεζητημένες μεθόδους για θέματα όπως η εξατμισοδιαπνοή και η διήθηση (Σχήμα 3.3).

Στην παρούσα εργασία, διεξάγεται υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής και υπολογίζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής, με βάση το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder, το Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS και το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών, όπως θα αναπτυχθούν αναλυτικά στα επόμενα Κεφάλαια.



**Σχήμα 3.3:** Πλημμυρογράφημα εξόδου μέσω του λογισμικού HEC-HMS (πηγή: HEC FactSheet HEC-HMS).

### 3.4 HEC-RAS 6.2

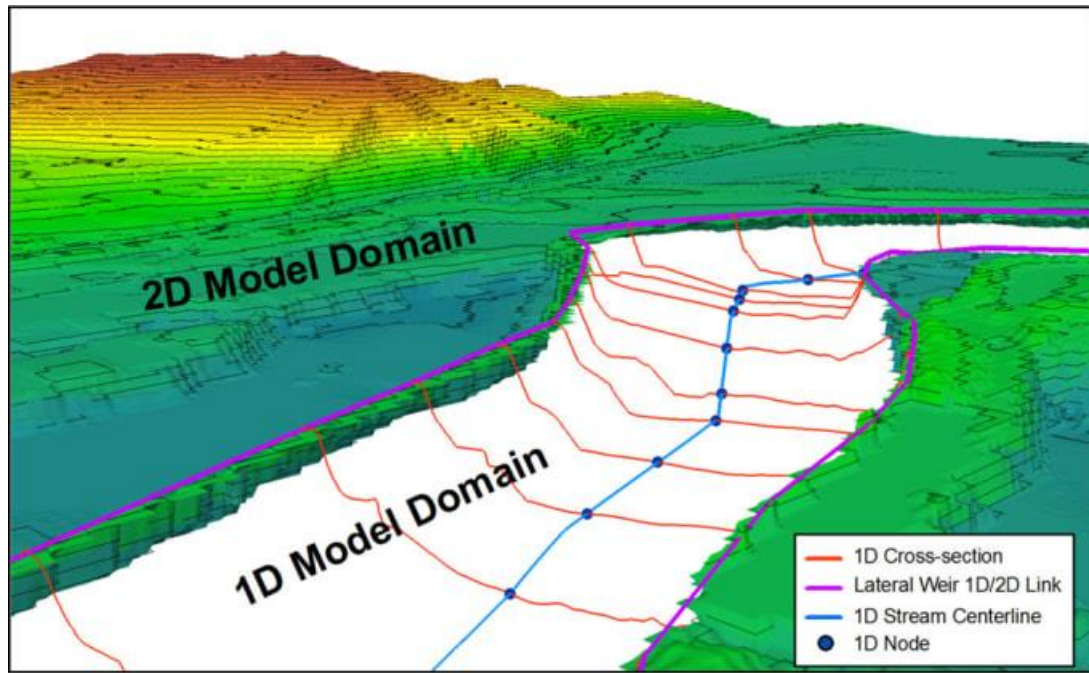
Υπάρχουν αρκετά υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της διόδου των πλημμυρών, το πιο συνηθισμένο εκ των οποίων είναι το HEC-RAS. Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS (River Analysis System) δημιουργήθηκε, επίσης, από την Αμερικάνικη ομάδα μηχανικών United States Army Corps of Engineers (USACE), με σκοπό την υδραυλική προσομοίωση ποταμών. Μπορεί να εκτελέσει μονοδιάστατη (1D), διδιάστατη (2D), αλλά και συνδυαστικά μονοδιάστατη και διδιάστατη (1D/2D) υδραυλική ανάλυση ποταμών.

Η μονοδιάστατη ανάλυση προτείνεται σε περιπτώσεις ανοιχτών αγωγών προκαθορισμένης διατομής, ορεινούς όγκους και ανάγλυφα μεγάλων κλίσεων, με εξ ορισμού μικρότερη πιθανότητα πλημμυρικού κινδύνου και, τέλος, σε περιοχές με ήδη κατασκευασμένα τεχνικά έργα. Βασικός στόχος της είναι η προσομοίωση της ροής εντός του υδάτινου σώματος και η εύρεση του βάθους ροής και της ταχύτητας με διεύθυνση κάθετη στη διατομή. Η ταχύτητα αυτή θεωρείται ότι έχει ομοιόμορφη κατανομή στα τμήματα της διατομής που έχουν τον ίδιο συντελεστή τραχύτητας. Τέλος με βάση το DEM, το μοντέλο παράγει τον πλημμυρικό χάρτη, στον οποίο όλα τα κελιά με υψόμετρο χαμηλότερο από αυτό της ελεύθερης επιφάνειας πλημμυρίζουν.

Η διδιάστατη ανάλυση προτείνεται σε περιπτώσεις ήπιου ανάγλυφου, όπου υπάρχει διαθέσιμο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και το βασικό ζητούμενο είναι η ταχύτητα ροής στο πεδίο κατάκλισης της πλημμύρας. Συγκεκριμένα, σε κάθε σημείο του πεδίου, το μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει το βάθος ροής και την ταχύτητα και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

Τέλος, η 1D/2D ανάλυση εφαρμόζεται σε περιοχές που χρήζουν προσομοίωσης και αναζήτησης των παραμέτρων και των δύο προηγούμενων μεθόδων. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται γραφικά η 1D/2D ανάλυση σε περιβάλλον HEC-RAS.





Σχήμα 3.4: Μοντέλο HEC RAS (πηγή: [understandrisk.org](http://understandrisk.org)).

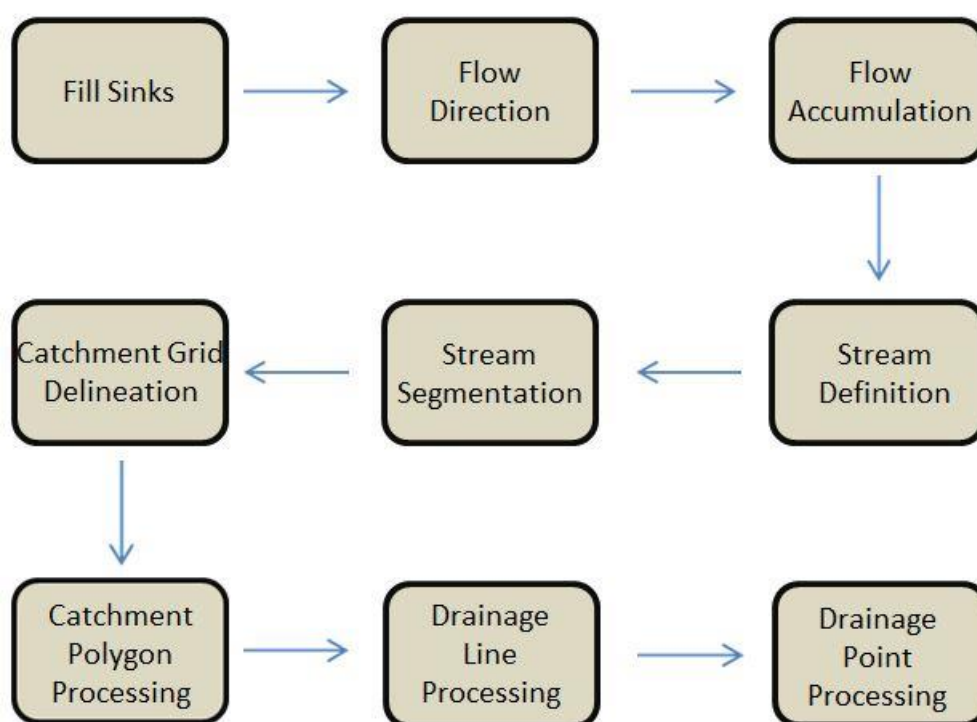
## 4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ-ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 4.1 Γεωμορφολογική ανάλυση

Η διαδικασία της γεωμορφολογικής ανάλυσης λαμβάνει χώρα αρχικά στο ArcGIS μέσω της εργαλειοθήκης Arc Hydro και στη συνέχεια στην επέκταση του ArcMap, το HEC-GeoHMS.

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) λαμβάνεται από το Κτηματολόγιο Α.Ε. με διάσταση ψηφίδας 5 m x 5 m και στη συνέχεια υφίσταται μία σειρά από διεργασίες (Σχήμα 4.1), προκειμένου να δημιουργηθεί το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής της εξεταζόμενης περιοχής.

Στην παρούσα εργασία, η λεκάνη απορροής έκτασης 101 km<sup>2</sup> (Σχήμα 4.2) αποτελεί στην ουσία, υπολεκάνη της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού, συνολικής έκτασης 912 km<sup>2</sup>. Ως σημείου εξόδου της λεκάνης ορίζεται ο οικισμός Αγία Άννα, οπότε η μελέτη γίνεται στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού ανάντη της Αγίας Άννας Ηλείας.

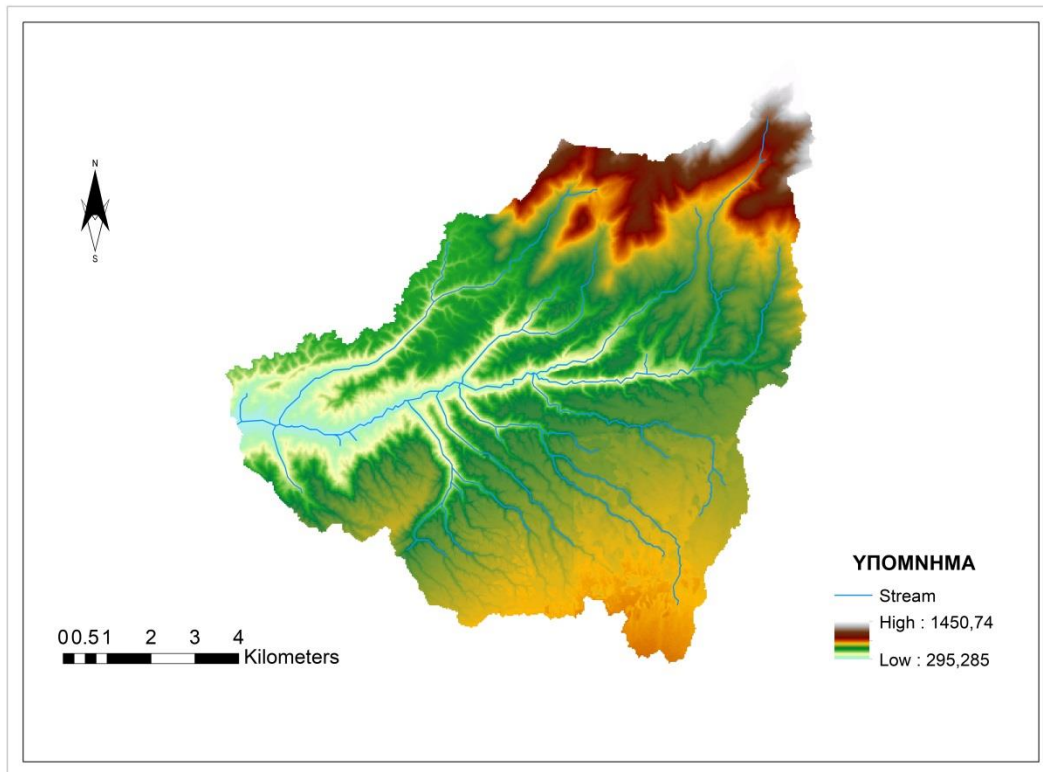


**Σχήμα 4.1:** Μεθοδολογία γεωμορφολογικής ανάλυσης.

Στη συνέχεια μέσω του HEC-GeoHMS, εξάγονται εκείνα τα υδρολογικά στοιχεία που χρειάζονται για την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης:

1. River Length: Καταγραφή μήκους κυρίως υδατορεύματος (km)
2. River Slope: Υπολογισμός κλίσης λεκάνης (%)
3. Longest Flowpath: Καταγραφή μέγιστης διαδρομής υδατορεύματος (km)
4. Basin Centroid: Εύρεση κέντρου βάρους λεκάνης

5. Centroidal Elevation: Εύρεση υψομέτρου του κέντρου βάρους λεκάνης (m)
6. Centroidal Longest Flowpath: Μέτρηση απόστασης κέντρου λεκάνης απορροής- σημείου εξόδου (km)



**Σχήμα 4.2:** DEM και υδρογραφικό δίκτυο της υπολεκάνης απορροής.

## 4.2 Υετογράφημα

Η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η έντασή της δεν μπορεί να είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκειά της, συνδέεται άμεσα με το υδρογράφημα της πλημμύρας. Για την ακρίβεια, είναι πιθανό βροχοπτώσεις ίδιου ύψους βροχής και ίσης διάρκειας, αλλά με διαφορετική χρονική κατανομή, να παράγουν διαφορετικά πλημμυρογραφήματα. (Γιαννόπουλος, 2002).

### 4.2.1 Όμβριες Καμπύλες

Οι όμβριες καμπύλες καταρτίστηκαν για κάθε Υδατικό Διαμέρισμα σε κάθε βροχομετρικό σταθμό, με σκοπό τον υπολογισμό της βροχόπτωσης σχεδιασμού στα διάφορα υδρολογικά σενάρια, ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας. Συγκεκριμένα, για υψηλή πιθανότητα εμφάνισης T=50 έτη, μέση πιθανότητα εμφάνισης T=100 έτη, ενώ χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης T=1000 έτη ( Ειδική Γραμματεία Υδάτων).

Σύμφωνα με (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, 2016), η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τις όμβριες καμπύλες είναι συναρτήσει της διάρκειας βροχόπτωσης  $d$  και της περιόδου επαναφοράς  $T$ :

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa - \psi')}{(1 + \frac{d}{\theta})^\eta} \quad (4.1)$$

Όπου:

$d$ : διάρκεια βροχόπτωσης<sup>3</sup> (hr)

$T$ : περίοδος επαναφοράς (έτη)

$\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\eta$ : παράμετροι που διαφοροποιούνται ανάλογα με το βροχομετρικό σταθμό.

Αναφορικά με τη διάρκεια της βροχόπτωσης, η επιλογή της επαφίεται στα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με (Κουκουβίνος, 2014), “Η διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού επιλέγεται ίση με το τριπλάσιο, τουλάχιστον, του χρόνου συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης”.

Για υδρολογικές λεκάνες με μεγάλα μήκη υδρογραφικού δικτύου και ανομοιομορφία ανάγλυφου, ο χρόνος συρροής της λεκάνης υπολογίζεται από εμπειρικές σχέσεις (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Η σχέση του Kirpich είναι:

$$t_c = 0.1947 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (4.2)$$

Όπου  $t_c$  είναι ο χρόνος συγκέντρωσης σε min,  $L$  το μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού πάνω στην λεκάνη σε m, και  $S$  είναι η κλίση που ισούται με το λόγο  $H/L$  όπου  $H$  η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πιο ψηλό σημείο της λεκάνης και την έξοδό της.

Η σχέση του Giandotti είναι:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (4.3)$$

Όπου  $A$  είναι η έκταση της λεκάνης απορροής σε  $\text{km}^2$ ,  $L$  είναι η απόσταση της κύριας μισγάγγειας μέχρι την έξοδο της λεκάνης σε km, και  $\Delta H$  η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης.

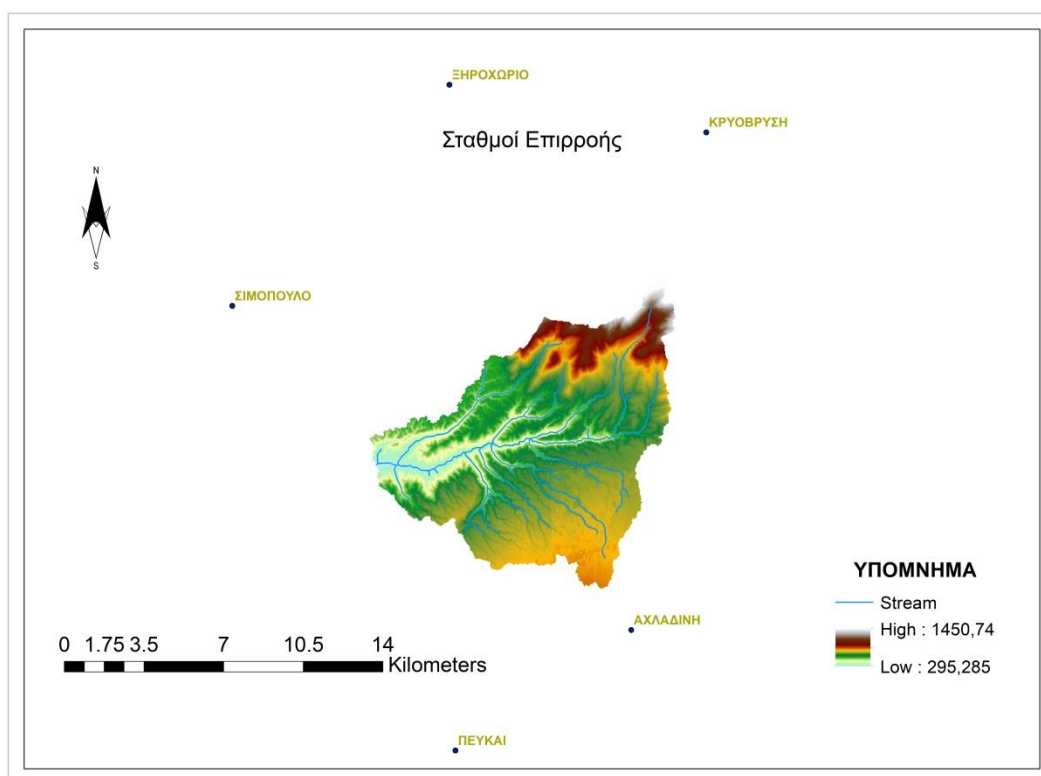
Στην παρούσα εργασία η διάρκεια της βροχόπτωσης επιλέχθηκε ίση με 12 ώρες. Στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι σταθμοί που βρίσκονται γύρω

<sup>3</sup> “Η διάρκεια βροχής  $d$  δεν αντιπροσωπεύει κάποια πραγματική διάρκεια ισχυρής καταιγίδας, αλλά είναι μία δεδομένη διάρκεια που καθορίζει τη χρονική κλίμακα παρατήρησης του φαινομένου.” (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, 2016)

από τη λεκάνη απορροής με τις συντεταγμένες και τις χαρακτηριστικές τιμές τους, βάση των οποίων καταρτίστηκαν οι όμβριες καμπύλες.

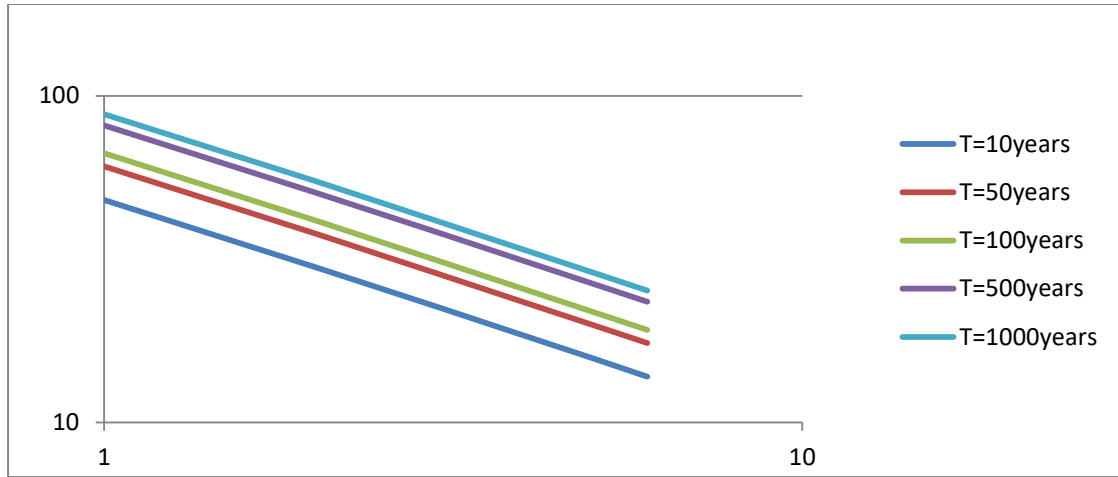
**Πίνακας 4.1:** Σταθμοί επιρροής στη λεκάνη απορροής της εξεταζόμενης περιοχής (πηγή: floods.ypεκα).

ΟΝΟΜΑ	X	Y	Z	kappa	lamda	psi	theta	hta
ΑΧΛΑΔΙΝΗ	303702.7	4177167	649.4	0.057	717	0.73	0.089	0.724
ΠΕΥΚΑΙ	295973.8	4171877	259.2	0.113	447	0.747	0.089	0.724
ΚΡΥΟΒΡΥΣΗ	306998	4199008	1011.9	0.057	652.5	0.668	0.089	0.724
ΞΗΡΟΧΩΡΙΟ	295710	4201095	290.9	0.113	363.3	0.623	0.089	0.724
ΣΙΜΟΠΟΥΛΟ	286171.9	4191391	201.4	0.113	367.3	0.711	0.089	0.724



**Σχήμα 4.3:** Χωρική αναπαράσταση των σταθμών επιρροής της εξεταζόμενης λεκάνης.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται λογαριθμικά οι όμβριες καμπύλες του κύριου σταθμού «Αχλαδινή» για διάφορες περιόδους επαναφοράς.



**Σχήμα 4.4:** Όμβριες καμπύλες για το σταθμό «Αχλαδινή» για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

#### 4.2.2 Επιφανειακή Αναγωγή σημειακών υψών βροχής

Η ένταση της βροχής που υπολογίζεται από τις ως άνω όμβριες καμπύλες αντιστοιχούν σε βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν στους βροχομετρικούς σταθμούς. Δεδομένου ότι η έκταση της υδρολογικής λεκάνης είναι αρκετά μεγάλη και η σημειακή βροχόπτωση των σταθμών δεν ανταποκρίνεται στο σύνολο της λεκάνης, είναι επιτακτική η ανάγκη αναγωγής της σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης.

Οι μέθοδοι επιφανειακής ολοκλήρωσης διακρίνονται σε 2 κατηγορίες (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, 2016). Αυτές της άμεσης ολοκλήρωσης (μέθοδος Thiessen, μέθοδος του μέσου όρου, μέθοδος Kriging, μέθοδος δύο αξόνων του Bethlahmy) και αυτές της προσαρμογής επιφάνειας (μέθοδος ισοϋέτιων, μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής, μέθοδος αντίστροφης απόστασης).

Η μέθοδος Thiessen χωρίζει γεωμετρικά την επιφάνεια  $A$  σε ζώνες επιρροής, όπου η κάθε μία αντιπροσωπεύει το συντελεστή βάρους του κάθε σταθμού για την τελική εκτίμηση της βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, οι ζώνες επιρροής σχηματίζονται φέρνοντας μεσοκάθετους στα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τους σταθμούς, σχηματίζοντας έτσι τα πολύγωνα Thiessen (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Ο συντελεστής βάρους του κάθε βροχομετρικού σταθμού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$w_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.4)$$

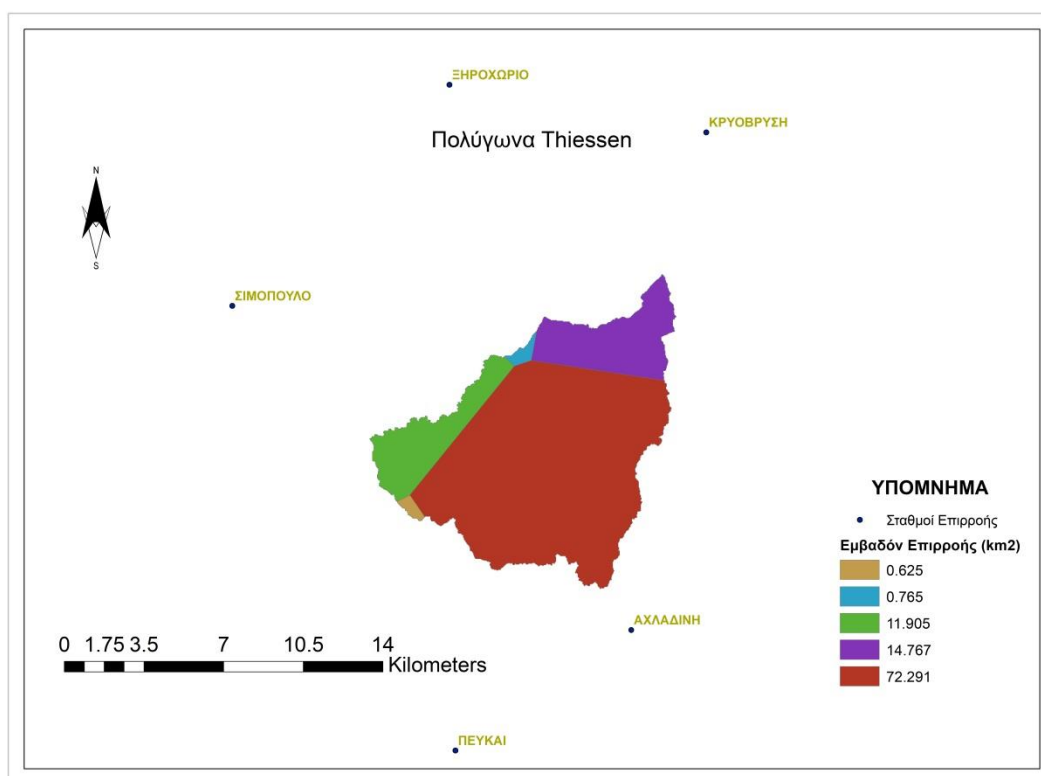
Όπου  $A_i$  το εμβαδόν της κάθε ζώνης επιρροής σε  $\text{km}^2$  και  $A$  το συνολικό εμβαδόν της λεκάνης σε  $\text{km}^2$ .

Στη λεκάνη απορροής της εξεταζόμενης περιοχής, παρατηρείται ότι ο σταθμός που επηρεάζει περισσότερο τη λεκάνη είναι η «Αχλαδινή». Στον Πίνακα 4.2

παρουσιάζονται τα βάρη του κάθε σταθμού, ενώ στο Σχήμα 4.5 φαίνεται γραφικά το αποτέλεσμα της μεθόδου Thiessen και το πόσο επηρεάζει ο κάθε σταθμός τη λεκάνη.

**Πίνακας 4.2:** Βάρη των σταθμών περίξ της λεκάνης απορροής, με βάση τη μέθοδο Thiessen.

Σταθμός	Έκταση(km <sup>2</sup> )	Βάρος Σταθμού w
ΑΧΛΑΔΙΝΗ	72.3	0.7208
ΠΕΥΚΑΙ	0.8	0.0076
ΚΡΥΟΒΡΥΣΗ	0.6	0.0062
ΞΗΡΟΧΩΡΙΟ	11.9	0.1187
ΣΙΜΟΠΟΥΛΟ	14.8	0.14724153



**Σχήμα 4.5:** Γραφική απεικόνιση της μεθόδου Thiessen στο ArcGIS.

Στη μέθοδο των ισοϋέτιων, “οι καμπύλες ορίζονται από το γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία το ύψος βροχής παίρνει μία δεδομένη τιμή.” (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012). Επιλέγοντας ισοδιάσταση ΔΡ χαράσσονται οι καμπύλες και μετράται το εμβαδόν των επιφανειών των διαδοχικών καμπυλών που αντιστοιχούν σε ύψη βροχής  $P_i$  και  $P_{i-1}$ .

Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση  $P_s$  της περιοχής θα είναι:

$$P_s = \sum_r \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \frac{A_i}{A} \quad (4.5)$$

Όπου  $A_i$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας μεταξύ των καμπυλών σε  $\text{km}^2$ , και  $A$  η συνολική έκταση της λεκάνης σε  $\text{km}^2$ .

Η μέθοδος των ισοϋέτιων είναι χρήσιμη, καθώς μπορεί να αντικατοπτρίζει τη μορφολογία της περιοχής, κάτι που δεν προσφέρει η μέθοδος Thiessen, αλλά την ίδια στιγμή η αποτελεσματικότητά της είναι περιορισμένη καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του μελετητή (Soojun, Jiho, & Hwandon, 2018).

Σε περίπτωση μη ύπαρξης διαθέσιμων όμβριων καμπυλών, η επιφανειακή ένταση της βροχόπτωσης υπολογίζεται με βάση το συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ή συντελεστή ομοιομόρφισης  $\phi$ , με βασικές ιδιότητες τις εξής:

1. Την στιγμή καταγραφής της μέγιστης έντασης σε ένα βροχομετρικό σταθμό, αποκλείεται να υπάρχει και άλλος σταθμός με την ίδια καταγεγραμμένη ένταση σε όλη την έκταση της υπό εξέταση λεκάνης.
2. Η αύξηση της έκτασης της επιφάνειας συνεπάγεται τη μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
3. Ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής αυξάνεται με την αύξηση της διάρκειας του επεισοδίου βροχόπτωσης.

Τόσο τις ΗΠΑ, όσο και στη Μεγάλη Βρετανία έλαβαν χώρα αρκετές εμπειρικές αναλύσεις σχετικά με τη μεταβολή του συντελεστή  $\phi$ , συναρτήσε της μεταβολής της έκτασης και της διάρκειας, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται σε πίνακες. Στα παραπάνω αποτελέσματα προσαρμόστηκε η ακόλουθη καμπύλη (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, 2016):

$$\phi = \max\left(1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01 \ln A}}{d^{0.35}}, 0.25\right) \quad (4.6)$$

Όπου  $\phi$  ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (αδιάστατος αριθμός),  $A$  η έκταση της λεκάνης σε  $\text{km}^2$  και  $d$  η διάρκεια της βροχής σε h.

### 4.2.3 Καταιγίδα Σχεδιασμού

Ο σημαντικότερος παράγοντας για την ορθή κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού μίας λεκάνης είναι η χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Από τις απλοποιημένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται, οι συνηθέστερες είναι αυτή της Δυσμενέστερης Διάταξης του υετογραφήματος (worst profile) και η Μέθοδος των Εναλλασσόμενων Μπλοκ (alternative block method) (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Με τις μεθόδους αυτές προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών, με βάση τις όμβριες καμπύλες της εξεταζόμενης λεκάνης, που αντιστοιχούν στην περίοδο επαναφοράς μελέτης. Συγκεκριμένα, τα ύψη διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύπτει

ένας ρεαλιστικός και, την ίδια στιγμή, αρκετά δυσμενής συνδυασμός.

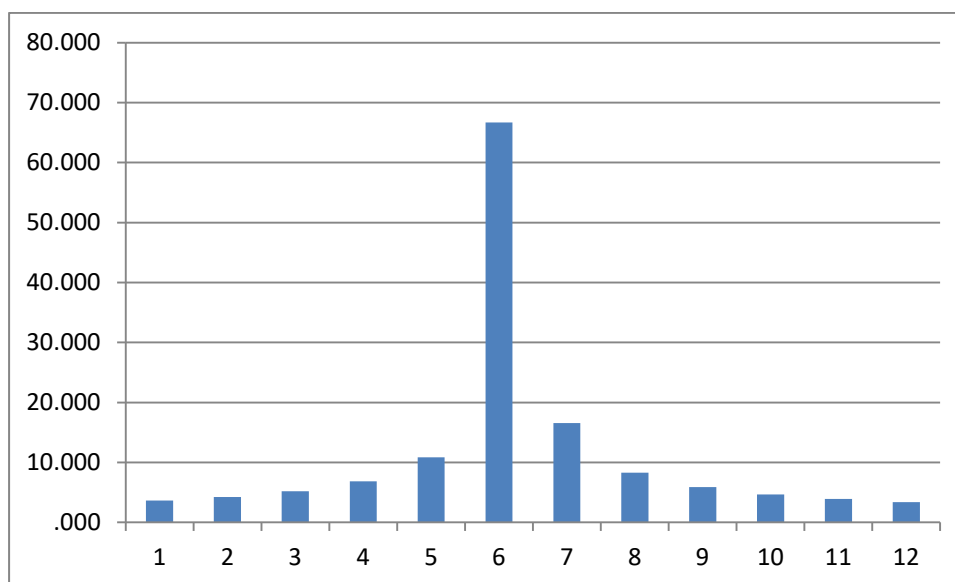
Βασική παραδοχή και στις δύο μεθόδους είναι ότι σε κάθε επιμέρους διάρκεια, το ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό ύψος



βροχής). Στη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, τα τμηματικά ύψη διατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας βροχόπτωσης, ενώ τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλάξ αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση το σενάριο για το οποίο μελετάται η εκάστοτε περιοχή και κατ' επέκταση με βάση τις περιόδους επαναφοράς, προτείνεται η επιλογή διαφορετικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, για περιόδους επαναφοράς της τάξης των 50 και 100 ετών συστήνεται η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ, ενώ για περιόδους επαναφοράς από 100 χρόνια και άνω, πιο ορθά αποτελέσματα δίνει η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης (Sutcliffe, 1978).

Αναφορικά με την εξεταζόμενη περιοχή, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το υετογράφημα σχεδιασμού με βάση το σταθμό «Αχλαδινή», μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ.



**Σχήμα 4.6:** Υετογράφημα σταθμού «Αχλαδινή» για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  years.

### 4.3 Αριθμός Καμπύλης Απορροής CN

Ο αριθμός καμπύλης απορροής (Curve Number, CN) πρόκειται για μία παράμετρο που συμπυκνώνει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής σε μία χαρακτηριστική τιμή (Savvidou et. al., 2018). Με βάση αυτό τον αριθμό, μπορούν να υπολογιστούν βασικά υδρολογικά μεγέθη, όπως στη μέθοδο SCS, με την οποία εκτιμώνται οι υδρολογικές απώλειες μετά από ένα επεισόδιο βροχής.

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 έως 100 και προσδιορίζεται με βάση τις συνθήκες του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής. Συγκεκριμένα, λεκάνες υψηλής διαπερατότητας, που καλύπτονται από δασώδη βλάστηση, με τιμή CN της τάξεως του 25, δύνανται να

κατακρατούν έως και 750 mm, ενώ λεκάνες χαμηλής διαπερατότητας, με τιμή CN της τάξεως του 90, μπορούν να κατακρατήσουν λιγότερο από 30 mm βροχής.

Με βάση τη διαπερατότητα του εδάφους στη λεκάνη απορροής, η SCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις ομάδες:

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

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

**Ομάδα Γ:** Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

**Ομάδα Δ:** Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται κατά την επαφή τους με το νερό, πλαστικές άργιλοι.

Κατόπιν, ορίζονται τρεις τύποι προηγούμενων συνθηκών υγρασίας:

**Τύπος Ι:** Ξηρές συνθήκες, που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

**Τύπος ΙΙ:** Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

**Τύπος ΙΙΙ:** Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Στον Πίνακα 4.3 δίνονται οι τυπικές τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής CN:

**Πίνακας 4.3** Τιμές παραμέτρου CN για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές, για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας Τύπου ΙΙ (Κουτσογιάννης, Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, 2011).

Περιγραφή χρήσης γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62 - 72	71 - 81	78 - 88	81 - 91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30 - 68	58 - 79	71 - 86	78 - 89
Δάση		25 - 45	55 - 66	70 - 77	77 - 83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
με κάλυψη από πράσινο > 75%		39	61	74	80
με κάλυψη από πράσινο < 75%		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ.)	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%)				
<= 0.5	65	77	85	90	92

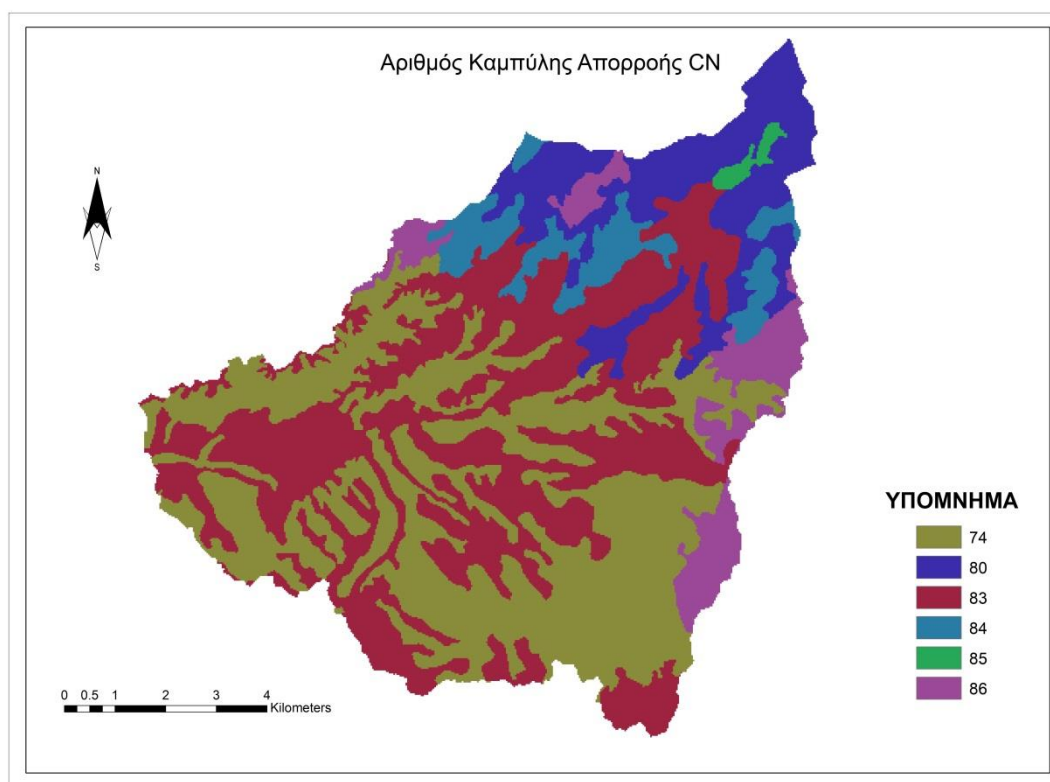
1	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2.4	25	54	70	80	85
4	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
με οδόστρωμα και αγωγούς όμβριων		98	98	98	98
χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
χωματόδρομοι		72	82	87	89

Οι τιμές της παραμέτρου CN για τις συνθήκες υγρασίας Τύπου II για κάθε υδρολογική ομάδα δίνονται από την SCS. Για τις άλλες συνθήκες εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις αναγωγής:

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (4.7)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (4.8)$$

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η διασπορά του CN στη λεκάνη απορροής της εξεταζόμενης περιοχής.



**Σχήμα 4.7:** Τιμές CN στη λεκάνη απορροής του Πηνειού για μέσες συνθήκες υγρασίας.

Έπειτα από αναγωγή του συντελεστή σε μία τιμή, μέσω πολλαπλασιασμού της κάθε τιμής με την αντίστοιχη έκταση που περιβάλλει, προκύπτει ο Πίνακας 4.4.

**Πίνακας 4.4:** Τιμές CN για όλες τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

CN I	CN II	CN III
62.70	80.00	90.20

## 4.4 Υδρολογικά Ελλείμματα

Οι ποσοτικές διαφορές ανάμεσα στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την επιφανειακή απορροή ορίζονται ως υδρολογικά ελλείμματα, και πρόκειται κατά βάση για ποσότητες που κατακρατούνται και διηθούνται από το έδαφος. Εάν ανάγουμε αυτές τις ποσότητες σε χρονική κλίμακα μεγαλύτερη αυτής της διάρκειας της πλημμύρας, ένα μέρος αυτών των ελλειμμάτων ορίζονται ως υδρολογικές απώλειες, που προκύπτουν από εξατμισοδιαπνοή.

Λαμβάνοντας υπόψη το υετογράφημα σχεδιασμού και το συνολικό όγκο των ελλειμμάτων, μπορεί να υπολογιστεί το τμήμα της συνολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, ή αλλιώς η ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall).

### 4.4.1 Η μέθοδος του δείκτη $\phi$

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, “Ο συνολικός όγκος απωλειών κατά τη διάρκεια της καταιγίδας, κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα του επεισοδίου. Συνεπώς ο όγκος κατακρήμνισης πάνω από τη γραμμή του δείκτη είναι ίσος με την απορροή” (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012). Εάν είναι γνωστό, δηλαδή, το πραγματικό υετογράφημα και ο δείκτης  $\phi$ , τότε μπορεί να προσδιοριστεί το ενεργό υετογράφημα.

Πρακτικά, όμως, ο συνολικός όγκος των απωλειών δεν κατανέμεται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια της καταιγίδας, αλλά λόγω της διηθητικότητας του εδάφους στην αρχή του επεισοδίου, ο ρυθμός κατακράτησης είναι μεγαλύτερος απ’ ότι στο τέλος αυτού. Συνεπώς, έχει φθίνουσα πορεία.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης  $\phi$  που προσδιορίζεται από μία μεμονωμένη καταιγίδα, δεν είναι αποτελεσματικός και για άλλες καταιγίδες, καθώς επηρεάζεται σημαντικά από τις παραμέτρους της εκάστοτε λεκάνης απορροής.

### 4.4.2 Η μέθοδος SCS-CN

Η μέθοδος SCS-CN, η οποία αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (1972) αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία, η οποία εμπειρικά, με βάση μελέτες σε λεκάνες μικρής έκτασης και καλλιεργήσιμης γης, προσδιορίζει την απορροή, με βάση τον αριθμό καμπύλης απορροής CN, όπως αυτός αναλύθηκε στο Κεφ. 4.3.

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής  $h_e$ :

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (4.9)$$

Όπου  $h_e$  = ενεργό ύψος βροχής

$h$  = συνολικό ύψος βροχής

Η παράμετρος  $S$  ονομάζεται «μέγιστη δυναμική κατακράτηση» (potential maximum retention) και προσδιορίζεται εμπειρικά από τον αριθμό  $CN$  μέσω της εξίσωσης:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4.10)$$

## 4.5 Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Με τον όρο Μοναδιαίο Υδρογράφημα- ΜΥ (Unit Hydrograph), νοείται το καθαρό πλημμυρογράφημα μίας λεκάνης που παράγεται από μία ενεργό βροχόπτωση ύψους 10 mm ομοιόμορφα κατανεμημένης σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και αντίστοιχα ομοιόμορφης έντασης  $i = 100/D$ , όπου  $D$  η διάρκεια βροχής του επεισοδίου (Sherman, 1932).

Μεγίστης σημασίας για το ΜΥ είναι ο προσδιορισμός του χρόνου υστέρησης  $t_L$ , με την προϋπόθεση της γραμμικότητας της λεκάνης. Ο χρόνος υστέρησης εκτιμάται ως η χρονική απόσταση του κέντρου βάρους του ΜΥ, από το κέντρο βάρους της βροχόπτωσης, όπως αυτή προσδιορίστηκε στο Κεφ. 4.2.3.

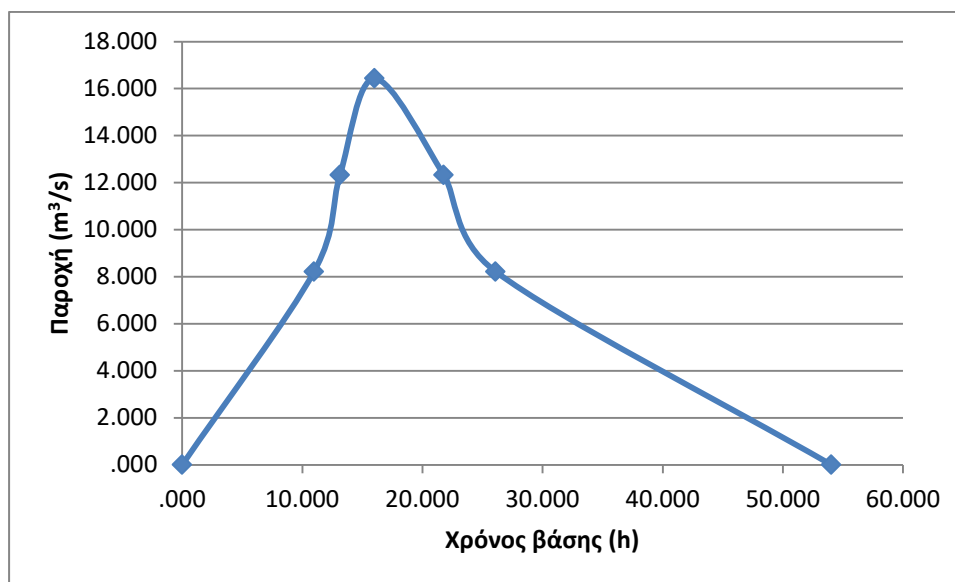
Σε περίπτωση μη ύπαρξης παρατηρήσεων βροχόπτωσης και απορροής για μία υδρολογική λεκάνη, το ΜΥ υπολογίζεται με τυπικές τιμές παραμέτρων. Αυτά τα ΜΥ ονομάζονται συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα και υπολογίζονται από εμπειρικές μεθόδους, συνδέοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (χρόνος βάσης, παροχή αιχμής, χρόνος υστέρησης) με γεωμορφολογικά μεγέθη της λεκάνης απορροής.

Οι παραπάνω περιπτώσεις αντιμετωπίζουν την υδρολογική λεκάνη ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του ΜΥ να εξαρτώνται από αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως η κλίση. Αντίθετα, το Στιγμιαίο ΜΥ, χωρίζει τη λεκάνη σε επιμέρους τμήματα με κριτήριο το χρόνο απόκρισης της πλημμυρικής απορροής και παραμέτρους τις ταχύτητες ροής στα διάφορα τμήματα της λεκάνης (ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ).

### 4.5.1 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder

Αποτελεί την πιο γνωστή μέθοδο κατασκευής συνθετικού ΜΥ, και προέκυψε από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στη Βόρεια Αμερική.

Βασικές παράμετροι της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι  $C_t$  και  $C_p$ . Η παράμετρος  $C_t$  σχετίζεται με τα μορφολογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και λαμβάνει τιμές από 1.80 έως 2.20. Το 1.80 αντιστοιχεί σε λεκάνες με σχετικά μεγάλη κλίση, ενώ το 2.20 σε σχεδόν επίπεδες λεκάνες. Η παράμετρος  $C_p$  εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και κυμαίνεται από 0.56 έως 0.69. Στην εξεταζόμενη λεκάνη, για διάρκεια βροχόπτωσης ίση με 12 h, το ΜΥ 1 ώρας φαίνεται στο Σχήμα 4.8:



**Σχήμα 4.8:** Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα 1 ώρας κατά Snyder.

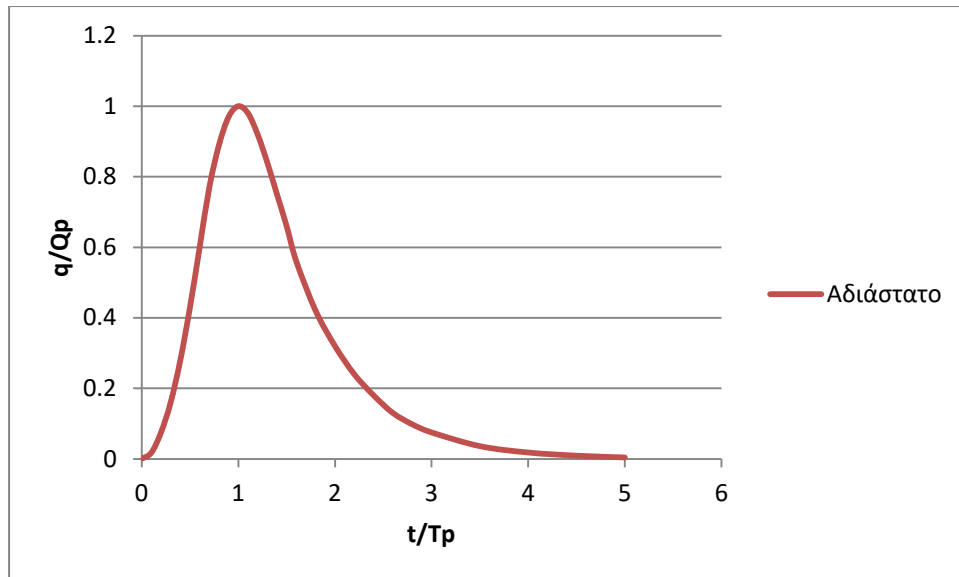
Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής στην έξοδο της λεκάνης ισούται με  $16.43 \text{ m}^3/\text{s}$  και εμφανίζεται 16 ώρες μετά την έναρξη του επεισοδίου.

#### 4.5.2. Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS

Το Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της Soil Conservation Service έχει κωνοειδές σχήμα και θεωρείται κατάλληλο για λεκάνες μικρής κλίμακας. Βασικές σχέσεις που διέπουν αυτή τη μέθοδο είναι οι εξής:

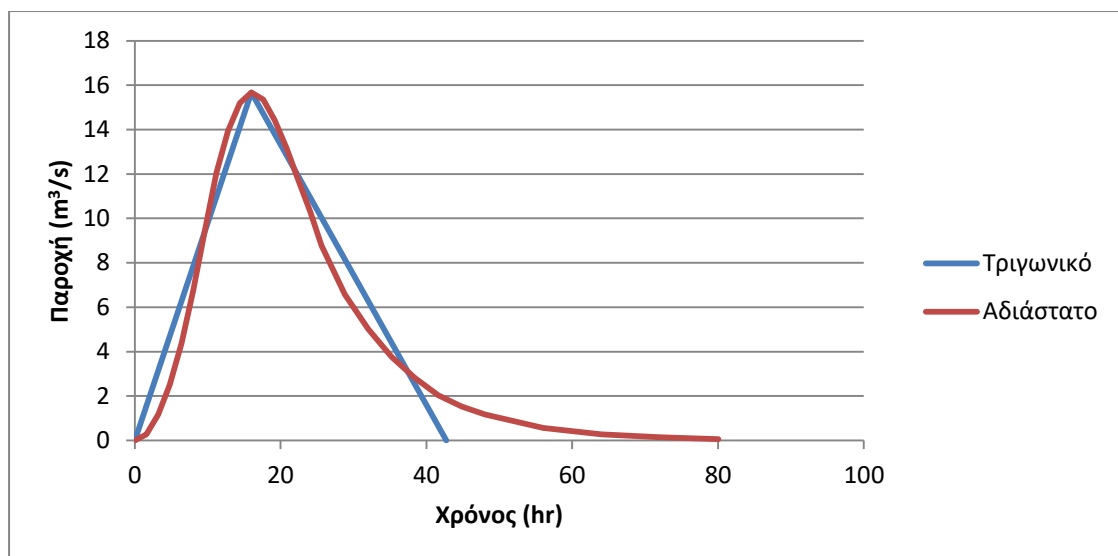
1.  $t_r = 1.37 * t_p$ ,  $t_r$  ο χρόνος αποχώρησης.
2.  $t_p = t_L + \frac{t_0}{2}$ ,  $t_p$  ο χρόνος αιχμής,  $t_0$  η διάρκεια της απορροϊκής βροχής και  $t_L$  ο χρόνος υστέρησης.
3.  $Q_p = \frac{0.75AP_e}{3600t_p}$ ,  $P_e$  σε mm,  $A$  η επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης σε στρέμματα και  $t_p$  ο χρόνος αιχμής σε ώρες.

Στο Σχήμα 4.9, παρουσιάζεται το Αδιάστατο ΜΥ κατά SCS της εξεταζόμενης λεκάνης



**Σχήμα 4.9:** Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το Τριγωνικό ΜΥ κατά SCS και το Αδιάστατο ΜΥ ανηγμένο στην παροχή αιχμής  $Q_p$  και στο χρόνο αιχμής  $T_p$ .



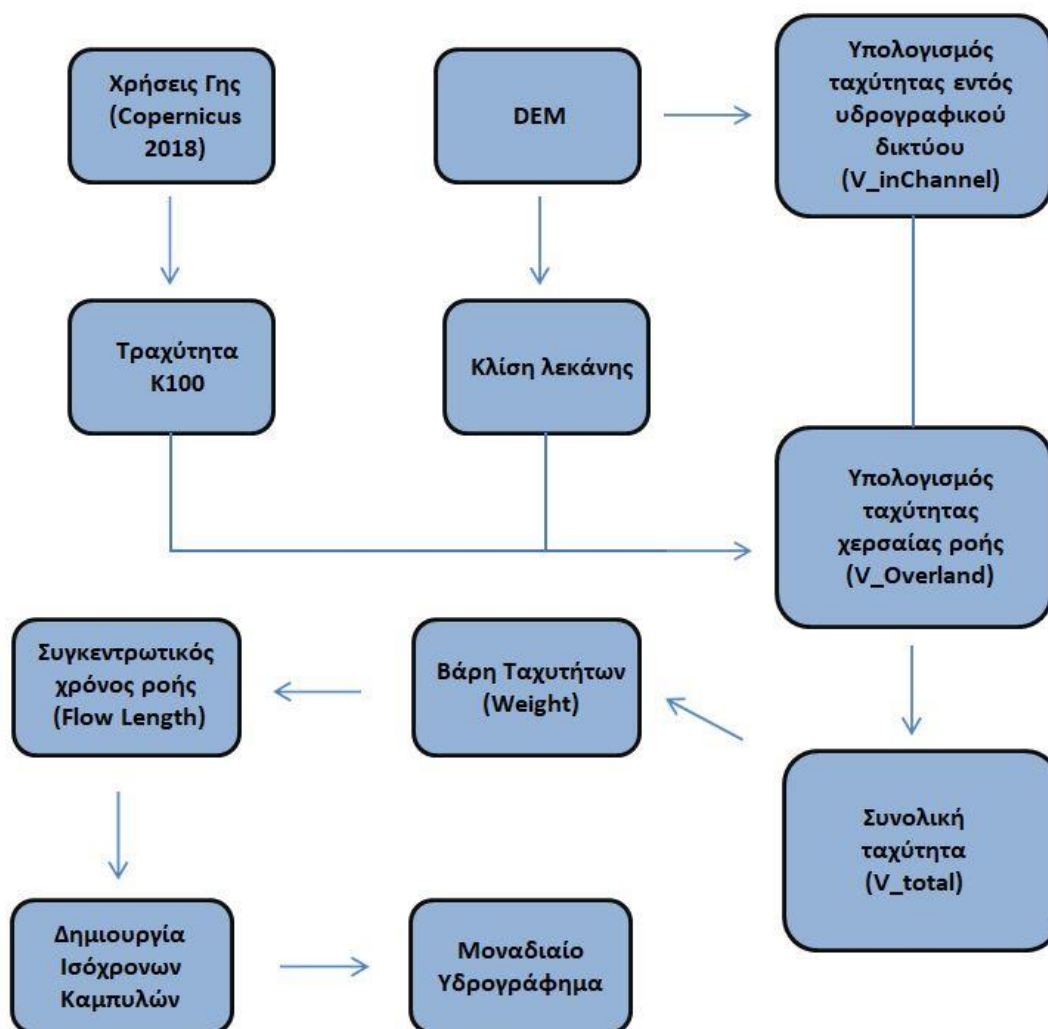
**Σχήμα 4.10:** Μοναδιαία Υδρογραφήματα 1 ώρας κατά SCS.

Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής  $Q_p = 15.67 \text{ m}^3/\text{s}$ , εμφανίζεται στο χρόνο αιχμής  $T_p = 16 \text{ hr}$ .

### 4.5.3 Μέθοδος των Ισόχρονων Καμπυλών

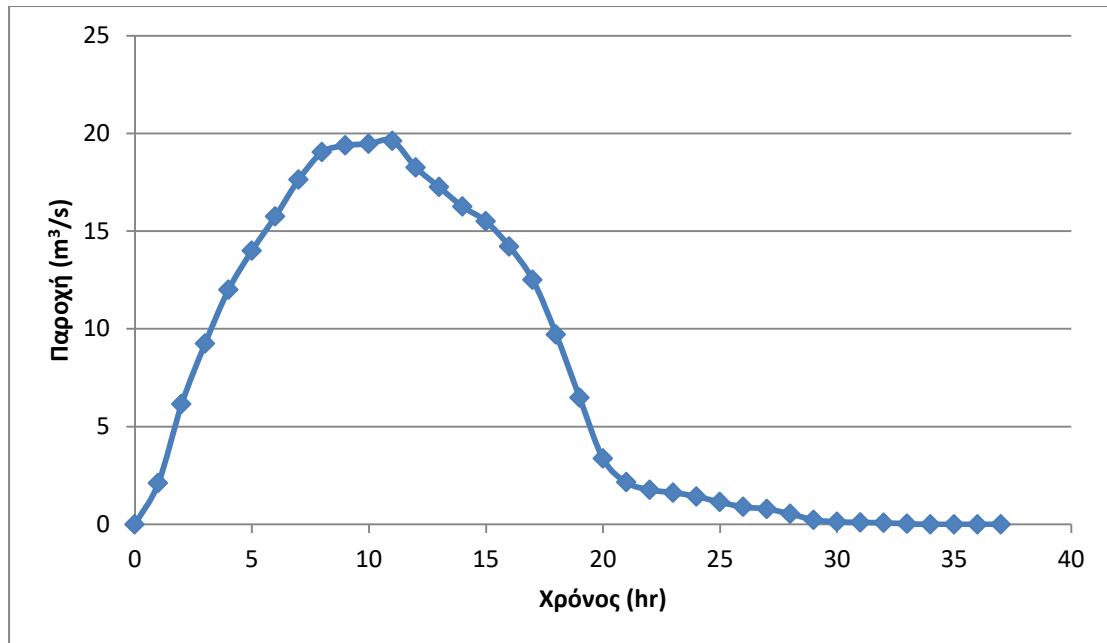
Η μέθοδος των Ισόχρονων Καμπυλών ή αλλιώς η μέθοδος «Χρόνου–Επιφάνειας» (time-area method), μετασχηματίζει την ενεργό βροχή σε υδρογράφημα, χωρίζοντας τη λεκάνη απορροής σε ζώνες, σε κάθε μία εκ των οποίων τα όμβρια ύδατα κάνουν τον ίδιο χρόνο να διασχίσουν τη λεκάνη μέχρι να φτάσουν στην έξοδο.

Μέσω των ΣΓΠ και του προγράμματος ArcGIS 10.5.1. υπολογίστηκε, μετά από μία σειρά βημάτων (Σχήμα 4.11), το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης απορροής της εξεταζόμενης περιοχής (Σχήμα 4.12). Συγκεκριμένα, στο ArcGIS, με βάση το DEM της περιοχής μελέτης υπολογίζεται ο χρόνος απορροής της κάθε ψηφίδας μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων, όπως το μήκος της διαδρομής του υδάτινου αποδέκτη που ακολουθεί το νερό, την ταχύτητα που έχει το νερό σε κάθε ψηφίδα από αυτές που θα συναντήσει μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Οι ταχύτητες χερσαίας ροής (εκτός υδρογραφικού δικτύου) υπολογίζονται ως συνάρτηση της κλίσης και της τραχύτητας (χρήσεις γης), ενώ οι ταχύτητες εντός του υδρογραφικού δικτύου συνδέονται με την κλίση του υδατορεύματος και την τάξη του (κατά Strahler). Η συνολική ταχύτητα προκύπτει ως το άθροισμα της ταχύτητας χερσαίας ροής και της ταχύτητας εντός υδρογραφικού δικτύου, και ο χάρτης των ταχυτήτων στη λεκάνη απορροής φαίνεται στο Σχήμα 4.13.



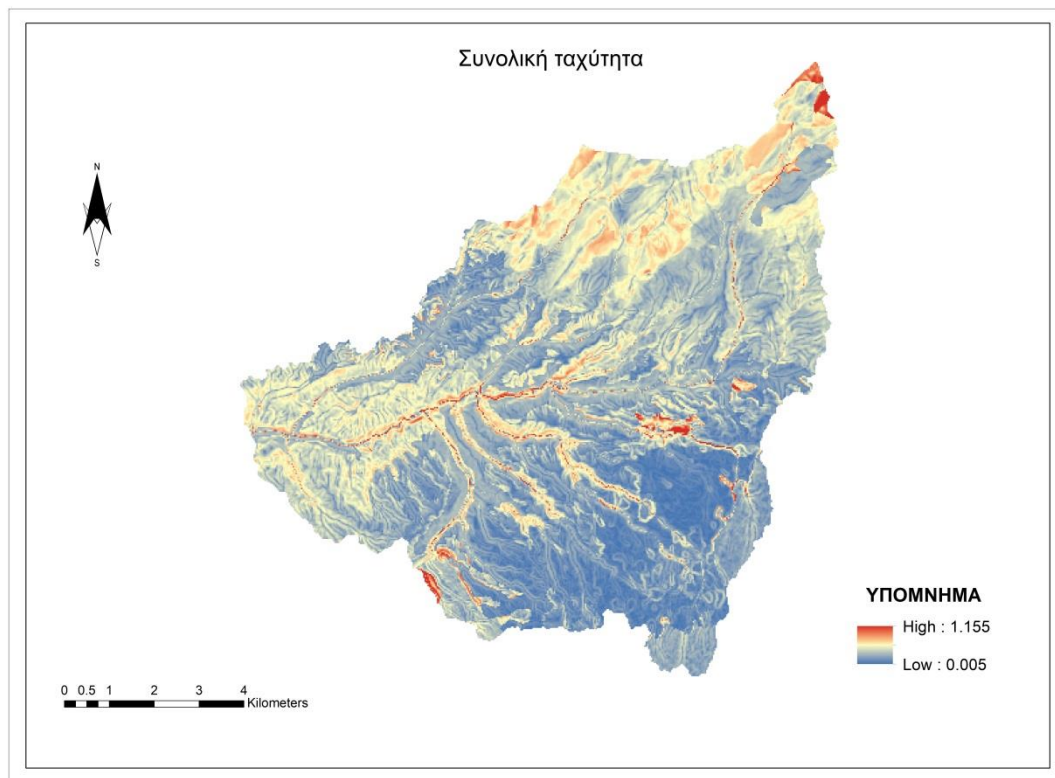
**Σχήμα 4.11:** Διαδικασία Υπολογισμού του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με τη μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών στο ArcGIS.





**Σχήμα 4.12:** Μοναδιαίο Υδρογράφημα με τη μέθοδο των Ισόχρονων Καμπυλών.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη παροχή στην έξοδο της λεκάνης ισούται με  $19.61 \text{ m}^3/\text{s}$  με χρόνο αιχμής τις 11 ώρες.



**Σχήμα 4.13:** Συνολική ταχύτητα στη λεκάνη απορροής.

Παρατηρείται ότι στα σημεία της λεκάνης που εμπίπτουν στο Οροπέδιο Φολόης, η ταχύτητα είναι πολύ μικρή, ενώ στα Βόρεια και Ανατολικά της λεκάνης όπου

βρίσκεται το όρος Ερύμανθος και οι κλίσεις είναι μεγάλες, η μέγιστη ταχύτητα φτάνει τα 1.16 m/s.

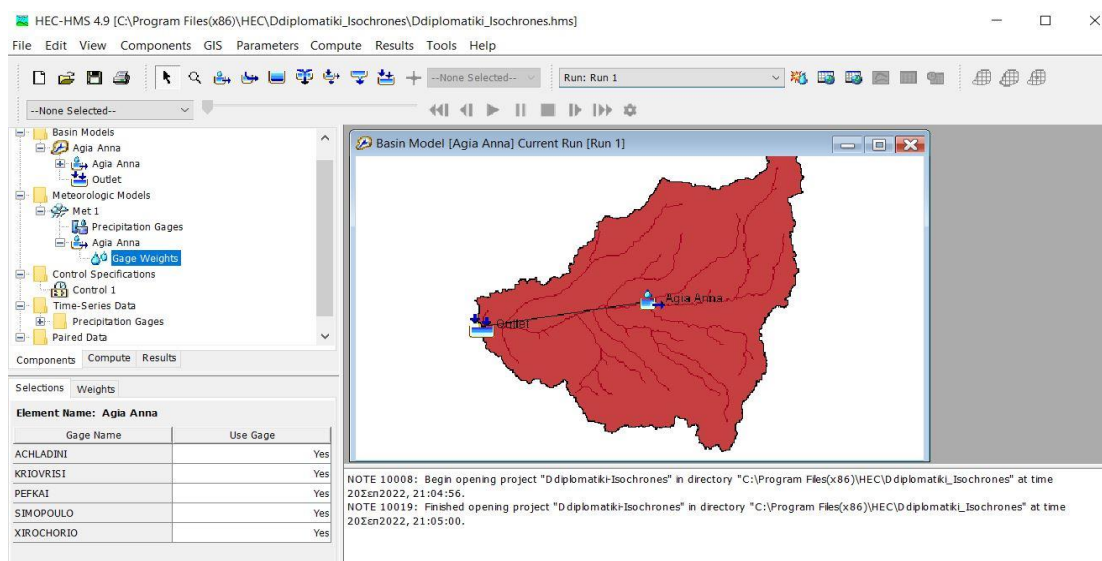
Συνοπτικά, στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται για συγκριτικούς λόγους τα βασικά χαρακτηριστικά των ΜΥ με βάση τις προαναφερθείσες μεθόδους.<sup>4</sup>

**Πίνακας 4.5:** Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων ΜΥ.

Μέθοδος	Χρόνος αιχμής $T_p$ (h)	Παροχή αιχμής $Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)
Συνθετικό ΜΥ κατά Snyder	16	16.43
Αδιάστατο ΜΥ κατά SCS	16	15.67
ΜΥ μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών	11	19.61

## 4.6 Εφαρμογή σε περιβάλλον HEC-HMS

Για την εύρεση του τελικού πλημμυρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης απορροής, κατ' αρχάς εισάγονται τα δεδομένα που προέκυψαν από τη γεωμορφολογική ανάλυση, όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 4.1 (Σχήμα 4.14).



**Σχήμα 4.14:** Περιβάλλον HEC-HMS.

Αρχικά δημιουργείται το μοντέλο της λεκάνης "Basin Model", όπου φορτώνονται τα χωρικά δεδομένα, όπως το πολύγωνο της λεκάνης, το υδρογραφικό δίκτυο και το σημείο εξόδου της λεκάνης. Κατόπιν επιλέγονται οι μέθοδοι που θα ακολουθηθούν για την κατασκευή του πλημμυρογραφήματος.

Για τη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder, το HEC-HMS έχει έτοιμη μεθοδολογία και αρκεί να εισαχθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και οι συντελεστές  $C_p$   $C_t$ . Επιλέγεται η Μέθοδος του Μοναδιαίου

<sup>4</sup> Ο χρόνος αιχμής αναφέρεται σε ώρες μετά την έναρξη του επεισοδίου βροχόπτωσης.

Υδρογραφήματος (Transform Method). Για τη μέθοδο SCS, αρκεί να εισαχθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και ο αριθμός καμπύλης απορροής, όπως αυτός υπολογίστηκε στο Κεφ. 4.3. Για τις Ισόχρονες Καμπύλες, τα δεδομένα του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος εισάγονται με τη μορφή Paired Data.

Κατόπιν, δημιουργείται το μετεωρολογικό μοντέλο "Met Model" μέσω του Time Series Data, στο οποίο εισάγεται σαν δεδομένο το υετογράφημα όπως αυτό αναλύθηκε στο Κεφ. 4.2. Και για τις τρεις μεθόδους που εφαρμόστηκαν το μοντέλο αυτό παραμένει το ίδιο.

Τέλος, μέσω του Control Specification καθορίζονται τα χρονικά όρια του πλημμυρογραφήματος.

## 4.7 Υδραυλική Προσομοίωση

Για την εύρεση του πλημμυρικού πεδίου κατάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης απορροής, αρχικά στο RAS Mapper εισάγεται στο πρόγραμμα HEC-RAS 2D το DEM ολόκληρης της λεκάνης<sup>5</sup>, ο χάρτης χρήσεων γης με τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή τραχύτητας και προσδιορίζεται το σύστημα συντεταγμένων. Ο χάρτης χρήσεων γης συνοδεύεται και από τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning n, ο οποίος προσδιορίζεται με βάση τους κωδικούς CORINE, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6:** Αντιστοίχιση τιμών συντελεστή n, με τους κωδικούς χρήσεων γης (Papaioannou, et al., 2018).

Κωδικός CORINE	Περιγραφή	Manning's n
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.013
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.013
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.013
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0.013
123	Ζώνες λιμένων	0.013
124	Αεροδρόμια	0.013
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0.013
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	0.013
133	Χώροι οικοδόμησης	0.013
141	Περιοχές αστικού πράσινου	0.025
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.025
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.03
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.03
213	Ορυζώνες	0.03
221	Αμπελώνες	0.08
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	0.08
223	Ελαιώνες	0.08
231	Λιβάδια	0.35
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	0.04
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.04
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.05
244	Γεωργο-δασικές περιοχές	0.06
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.1
312	Δάσος κωνοφόρων	0.1
313	Μικτό δάσος	0.1
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.04
322	Θάμνοι και χερσότοποι	0.05
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.05
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	0.06
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.025

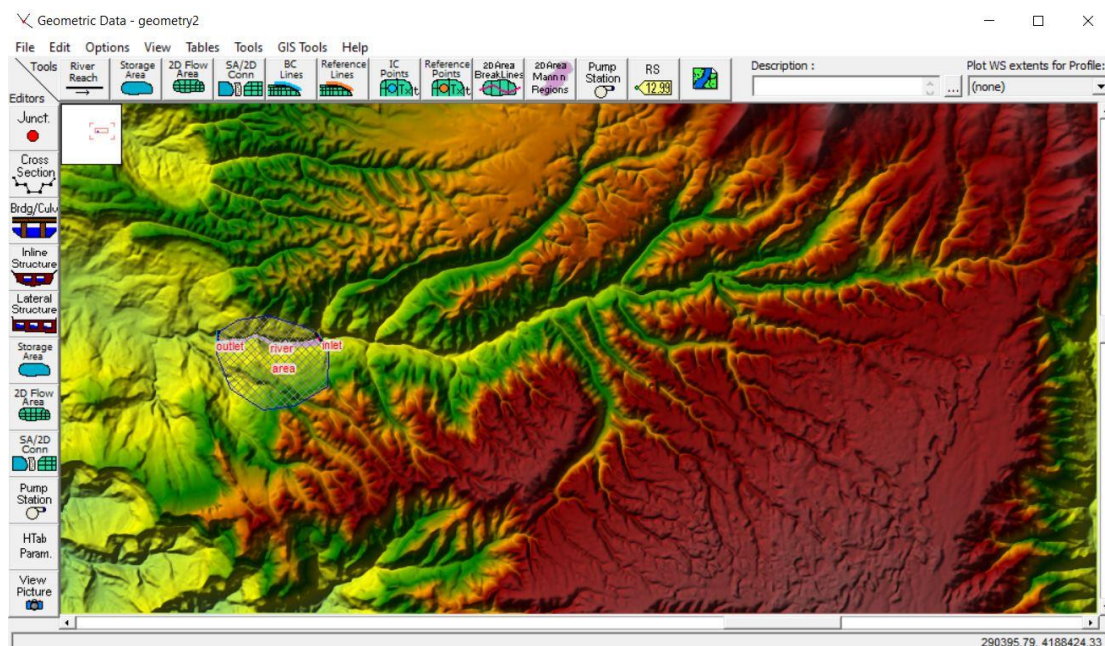
<sup>5</sup> Το DEM ενδείκνυται να είναι υψηλής ακρίβειας (5 m x 5 m) για την καλύτερη και ορθότερη προσομοίωση της ροής.

332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.035
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.027
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.025
335	Παγετώνες και αιώνιο χιόνι	0.01
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.04
412	Τυρφώνες	0.04
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.04
422	Αλυκές	0.04
423	Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα	0.04
511	Υδατορεύματα	0.05
512	Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	0.05
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	0.07
522	Εκβολές ποταμών	0.07
523	Θάλασσες και ωκεανοί	0.07

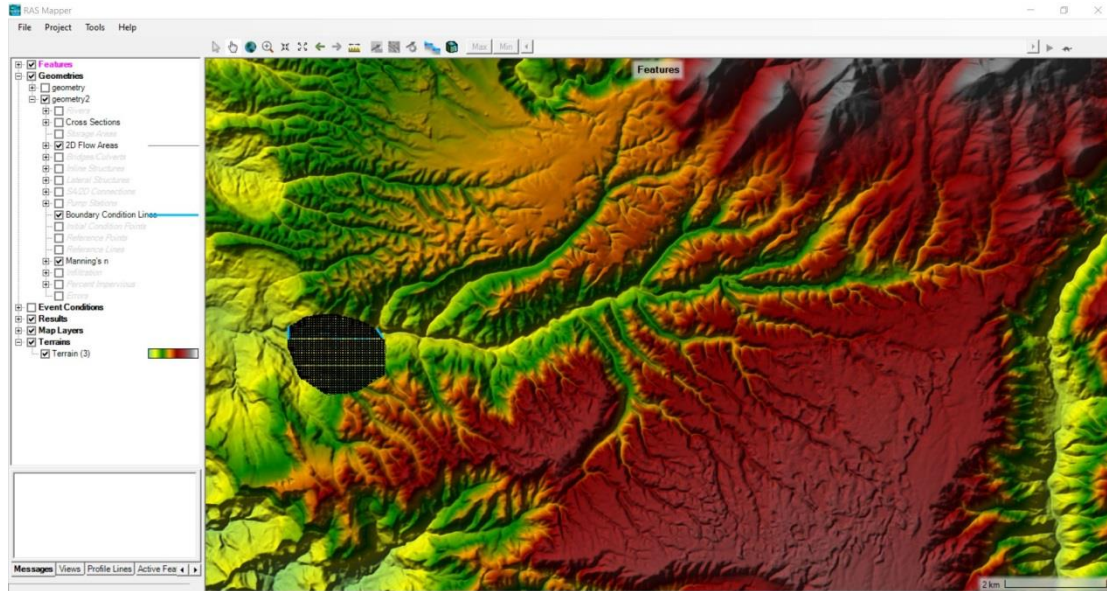
Κατόπιν, με το Geometry Data προσδιορίζεται η γεωμετρία του σημείου εισόδου του πλημμυρογραφήματος, και με το Unsteady Flow Data εισάγεται το πλημμυρογράφημα που υπολογίστηκε στο HEC-HMS, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 4.6. Επιλέγεται να εισαχθεί το πλημμυρογράφημα που προέκυψε μέσω της μεθόδου των Ισόχρονων Καμπυλών, λόγω δυσμενέστερης παροχής αιχμής.

Τέλος με το Unsteady Flow Analysis επιλέγεται το χρονικό βήμα των υπολογισμών της προσομοίωσης και των εξαγόμενων στιγμών της πλημμυρικής ροής. Συγκεκριμένα, επιλέγεται χρονικό βήμα υπολογισμών τα 5 sec.

Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζεται το περιβάλλον του προγράμματος HEC-RAS και του RAS Mapper.



**Σχήμα 4.15:** Επεξεργασία της περιοχής μελέτης με το εργαλείο Geometry Data.



Σχήμα 4.16: Κεντρικό περιβάλλον επεξεργασίας RAS Mapper.

## 5.ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

Η μεταφορά στερεών κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης κατά μήκος ενός υδατορεύματος αποτελεί σύνθητες φαινόμενο σε πολλά μέρη της Ελλάδας, και θεωρείται ότι προκαλείται από την κίνηση του νερού. Η διάβρωση μελετάται προκειμένου αφενός, να υπάρχει μία πλήρης οπτική γύρω από ζητήματα που αφορούν το υδάτινο περιβάλλον και αφετέρου, για να εκτιμηθούν πιθανοί κίνδυνοι που μπορεί να οδηγήσουν είτε σε απλή μεταφορά ιλύος και άμμου, είτε σε κατολισθήσεις τεμαχίων.

Κύριες αιτίες της διάβρωσης αποτελούν οι ακατάλληλες καλλιεργητικές μέθοδοι, η αποψίλωση δασικών εκτάσεων, οι πυρκαγιές, η υπερεκμετάλλευση των εδαφών και οι διάφορες κατασκευαστικές δραστηριότητες (Yassoglou N. , 1998).

“Για την Ηλεία, η μέση ετήσια εδαφική απώλεια αναμένεται αυξημένη, λόγω της καταστροφικής πυρκαγιάς το 2007, μειώνοντας την φυτοκάλυψή της, και συμβάλλοντας στην αποδόμηση των εδαφικών συσσωματωμάτων με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους” (Βιδάλη, 2013).

Η εδαφική διάβρωση μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: 1) στην επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), που εξαρτάται από την ένταση της βροχής και τη διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα της επιφανειακής ροής, 2) στη διάβρωση ρυακιών (rill erosion), που είναι αποτέλεσμα των τοπικών συγκεντρώσεων επιφανειακής ροής και 3) στη διάβρωση χαντακιών (gully erosion) που προκύπτει από την ποσότητα του νερού που ρέει κατά μήκος μιας σαφώς σχηματισμένης κοίτης (χαντάκι) (Κουτσογιάννης & Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, 1987).

Βασικές έννοιες για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης είναι οι εξής:

1. Εδαφική απώλεια (soil loss) SE: Η μάζα του εδαφικού υλικού που αποσπάται, ως αποτέλεσμα της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης και της απορροής (t/ha/year).
2. Στερεοαπορροή (sediment yield)  $S_Y$ : Η μάζα των φερτών υλικών που μετριέται στη διατομή του υδατορεύματος ανά μονάδα λεκάνης απορροής και ανά μονάδα χρόνου (t/km<sup>2</sup>/year).
3. Στερεοπαροχή (sediment discharge)  $Q_s$ : Η μάζα των φερτών υλικών που μετριέται στη διατομή ενός υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου (kg/s).
4. Συντελεστής στερεοαπορροής (sediment delivery ratio) SDR: Ο λόγος της ποσότητας των φερτών προς την ποσότητα που έχει διαβρωθεί στη λεκάνη απορροής, ανάντη της διατομής αναφοράς.

Η μελέτη της συνολικής στερεοαπορροής μίας λεκάνης απορροής είναι υψίστης σημασίας, καθώς με βάση αυτήν μπορούν να διερευνηθούν η ποιοτική κατάσταση των υδάτων ενός ποταμού, οι προσχώσεις που θα μεταφερθούν σε έναν ταμιευτήρα με τη ροή του ποταμού, οι συνέπειες στα κατάντη από την κατασκευή φραγμάτων

και ταμειυτήρων. Επίσης, πολλές φορές, η ποσότητα της συνολικής εδαφικής απώλειας συντελεί στην αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου σε συμβολές παραποτάμων ή σε δέλτα ταμειυτήρων, και μεταβάλλει την κοίτη των ποταμών (εκσκαφή, απόθεση, διάβρωση οχθών) (Παναγούλια & Ζαρρής, 2008).

Τα φερτά υλικά μπορούν να διακριθούν με βάση τον τρόπο μεταφοράς τους, αλλά και την προέλευσή τους (Ζαρρής, Λυκούδη, & Κουτσογιάννης, 2001).

Με βάση τον τρόπο μεταφοράς τους διακρίνονται σε:

1. Φορτίο σε αιώρηση (suspended load): το σύνολο των φερτών υλικών που κινείται πάνω από την κοίτη, όπου υπάρχει αιώρηση.
2. Φορτίο σε σύρση (bed load): το σύνολο των φερτών υλικών που κινείται στην κοίτη ή πολύ κοντά σε αυτή, όπου υπάρχει σύρση.

Με βάση την προέλευση του υλικού διακρίνονται σε:

1. Φορτίο υλικού κοίτης (bed sediment load): προκύπτει από την διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος και μετακινείται με σύρση και αιώρηση.
2. Φορτίο απόπλυσης (wash load): προκύπτει από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής. Πρόκειται για λεπτόκοκκο υλικό (ίλος- άργιλος) και μετακινείται σχεδόν αποκλειστικά με αιώρηση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνολική στερεοαπορροή μίας λεκάνης, ιδιαίτερα στις Μεσογειακές χώρες, αποτελείται στην πλειοψηφία της από φορτίο απόπλυσης και συνήθως μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων έντονων πλημμυρικών επεισοδίων ανά χρόνο.

Η διάβρωση του εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ορισμένες παραμέτρους που διαφέρουν ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα:

1. Υδρογεωλογία εδάφους και χαρακτηριστικά του πετρώματος: Ανάλογα με τη διαπερατότητα του εδάφους καθορίζεται ο όγκος της επιφανειακής απορροής και ανάλογα με την κοκκομετρία και τη συνεκτικότητα του πετρώματος, προσδιορίζεται ο ρυθμός απόσπασης των κόκκων, αλλά και η διαβρωτική και η μεταφορική ικανότητα της ροής.
2. Χρήσεις Γης και Φυτοκάλυψη: Η ύπαρξη χλωρίδας και η επακόλουθη αύξηση της τραχύτητας του εδάφους συντελεί στη μείωση της επιφανειακής απορροής και στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της βροχής από τη φυτοκόμη.
3. Τοπογραφία περιοχής: Σε περιοχές υψηλών υψομέτρων με μεγάλες κλίσεις και μεγάλα μήκη πλαγιάς, αυξάνεται η διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα της ροής και διευκολύνεται η απόσπαση των εδαφικών κόκκων.

Η εκτίμηση της εδαφικής απώλειας και της στερεοαπορροής σε μία λεκάνη απορροής μπορεί να γίνει είτε με επιτόπιες μετρήσεις υπαίθρου, είτε χρησιμοποιώντας ορισμένα εμπειρικά μοντέλα, που συσχετίζουν την στερεοαπορροή με άλλα φυσικά μεγέθη ή χαρακτηριστικά της λεκάνης. “Η εκτίμηση της διάβρωσης με εργασίες υπαίθρου είναι μία χρονοβόρα διαδικασία που δύσκολα μπορεί να καλύψει το σύνολο μίας λεκάνης απορροής, αλλά περιορίζεται σε



πειραματικές επιφάνειες της λεκάνης” (Stefanidis, Sapountzis, & Stathis, 2002). Τέλος, αποτελεί εύστοχη επιλογή η μέτρηση αποθέσεων σε ταμειυτήρες για την εκτίμηση ποσοτήτων διάβρωσης και στερεομεταφοράς, αν και λόγω της μη ιεράρχησης της εκτίμησης της στερεοαπορροής στη Διαχείριση Φυσικών Πόρων, αυτή η πρακτική δεν εφαρμόζεται ευρέως (Βαχαβιώλος, 2014).

## 5.1 Μοντέλο RUSLE

Το μοντέλο RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) ή αλλιώς Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας αναπτύχθηκε σε αρχικό στάδιο το 1994 και αναθεωρήθηκε από τους Renard K. G., Foster G. R., Yoder D. C. και McCool D. K. το 1994. Πρόκειται για ένα εμπειρικό μοντέλο που αναγνωρίζεται σαν μία βασική μέθοδος για τον υπολογισμό της μέσης ετήσια εδαφικής απώλειας σε αρόσιμη γη. Το μοντέλο RUSLE εκτιμά την εδαφική απώλεια συγκεντρωτικά και για μεγάλες χρονικές κλίμακες. Δεν έχει σχεδιαστεί για να παράγει αποτελέσματα για μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης (Renard et. al, 1997).

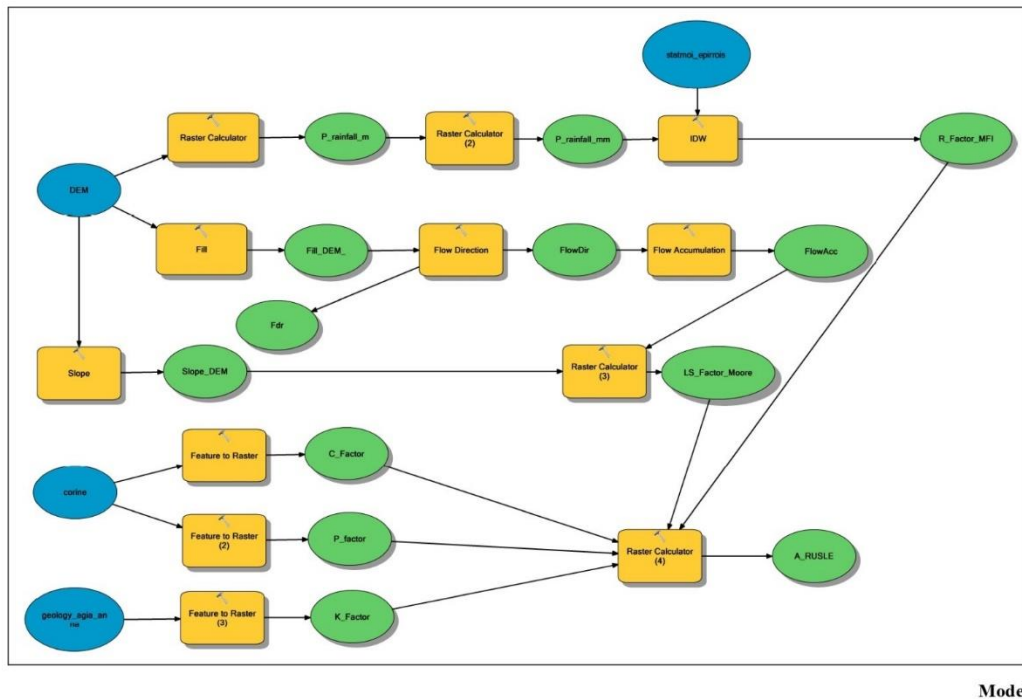
Η μαθηματική εξίσωση του μοντέλου κατασκευάστηκε από τους Wischmeier W. και Smith D., το 1965 και το 1978 και υπολογίζει τη μέση ετήσια εδαφική διάβρωση  $A$  σε  $t/ha/year$ :

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (5.1)$$

- $R$ : Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης ( $MJ*mm/ha/h/year$ )
- $K$ : Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ( $t*h/MJ/mm$ )
- $L$ : Ο συντελεστής μήκους κλίσης
- $S$ : Ο συντελεστής βαθμού κλίσης
- $C$ : Ο συντελεστής φυτοκάλυψης
- $P$ : Ο συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης

Σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ, προωθείται η χρήση του μοντέλου RUSLE με δεδομένα για την κάθε παράμετρο, αυτά που παρέχει το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πληροφοριών Εδάφους (European Soil Data Centre- ESDAC) δωρεάν στην ιστοσελίδα του (European Commission). Οι χάρτες των παραμέτρων προέκυψαν από δεδομένα αναφορικά με τη βροχόπτωση, το έδαφος, την τοπογραφία και τις χρήσεις γης για το έτος 2010 (Panagos et. al, 2012).

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία εκτίμησης της τελικής εδαφικής απώλειας, με βάση όλους τους προαναφερθέντες συντελεστές σε περιβάλλον Model Builder.



**Σχήμα 5.1:** Διαδικασία υπολογισμού της εδαφικής απώλειας σύμφωνα με το μοντέλο RUSLE, σε περιβάλλον Model Builder (πηγή: Ίδια Επεξεργασία).

### 5.1.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R

Ο Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης  $R$  (Rainfall Erosivity Factor) αποτελεί ένα ευμετάβλητο μέγεθος, που μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση των επεισοδίων βροχόπτωσης σε μηνιαία, ετήσια και εποχική βάση και είναι αυτός που επηρεάζει κατά μεγαλύτερο ποσοστό την τελική εδαφική απώλεια (Renard K.G. & Freimund J.R., 1994).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $R$  έχουν αναπτυχθεί πολλές εμπειρικές μέθοδοι, που στηρίζονται σε πολυετή δεδομένα βροχόπτωσης από διάφορους βροχομετρικούς σταθμούς. “Η επιλογή της καταλληλότερης εξίσωσης για τον τελικό υπολογισμό του συντελεστή βροχόπτωσης εξαρτάται από τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα, τα κλιματικά χαρακτηριστικά και την εγγύτητα της περιοχής μελέτης, με την περιοχή εξαγωγής της εμπειρικής εξίσωσης” (Βαχαβιώλος, 2014).

- Τροποποιημένος δείκτης Fournier (Modified Fournier Index, MFI)

Η μέθοδος του τροποποιημένου δείκτη Fournier λαμβάνει υπόψη του, εκτός από τη μέση ετήσια βροχόπτωση, και τη μέση μηνιαία βροχόπτωση. Η συσχέτιση του συντελεστή διαβρωτικότητας με τον τροποποιημένο δείκτη Fournier συνήθως οδηγεί σε πιο ορθές εκτιμήσεις, απ’ ότι οι αντίστοιχες σχέσεις που εμπεριέχουν μονάχα τη μέση ετήσια βροχόπτωση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο MFI λαμβάνει υπόψη

την εποχική διακύμανση της βροχόπτωσης, ειδικά στις Μεσογειακές χώρες, που διακρίνονται από ανομοιογενές καθεστώς βροχόπτωσης.

Ο τροποποιημένος δείκτης Fournier προκύπτει από την εξίσωση:

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P}$$

όπου  $MFI$  ο τροποποιημένος δείκτης Fournier σε mm,  $p_i$  η μέση μηνιαία βροχόπτωση σε mm και  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm.

Οι σχέσεις που συνδέουν το συντελεστή βροχόπτωσης  $R$  με τον τροποποιημένο δείκτη Fournier είναι οι εξής (Renard K.G. & Freimund J.R., 1994):

$$\begin{aligned} R &= 0.07397 * MFI^{1.847}, \quad MFI \leq 55mm \\ R &= 95.77 - 6.081 * MFI + 0.477 * MFI^2, \quad MFI > 55mm \end{aligned} \quad (5.2)$$

Με  $R^2 \approx 0.81$  και  $R^2 \approx 0.75$  αντίστοιχα.

Σε εφαρμογή του τροποποιημένου δείκτη Fournier στην περιοχή της Μεσογείου, παρατηρήθηκε ότι λόγω της εποχικής διακύμανσης της βροχόπτωσης, ο MFI μπορεί να πάρει ορισμένες ακραίες τιμές και έτσι να υπερεκτιμηθεί η ετήσια διαβρωτικότητα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος και την εξομάλυνση ακραίων εποχικών διακυμάνσεων, δημιουργήθηκε ο υπερετήσιος δείκτης Fournier  $F_F$  με  $R^2 \approx 0.63$  (Ferro, Giordano, & Iovino, 1991):

$$F_F = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N MFI_j \quad (5.3)$$

$$R = 0.5249 F_F^{1.59} \quad (5.4)$$

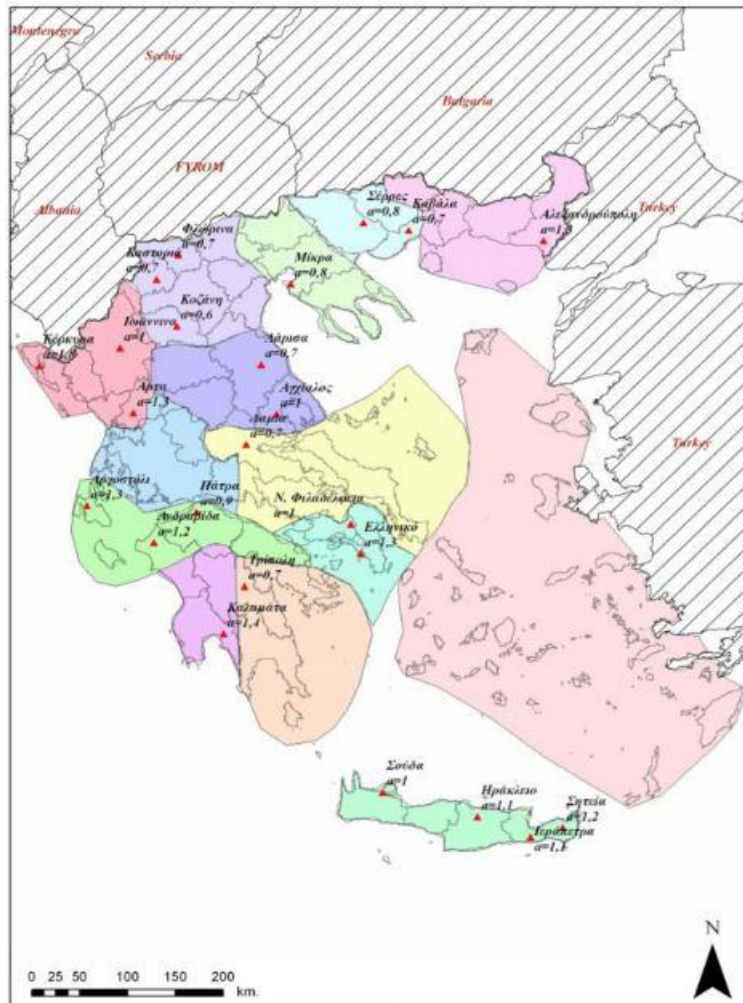
Όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής (MJ\*mm/ha/h/year),  $F_F$  ο υπερετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier (mm) και  $N$  το πλήθος των ετών.

- Μέση ετήσια βροχόπτωση (Mean Annual Precipitation, P)

Ο Φλαμπούρης Κ. το 2008, συλλέγοντας δεδομένα από 24 μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα ανέπτυξε σχέσεις μεταξύ της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης  $P$  και του συντελεστή διαβρωτικότητας  $R$ . Συγκεκριμένα, η βασική σχέση είναι η εξής:

$$R = \alpha * P \quad (5.5)$$

Όπου  $\alpha$  κατάλληλος συντελεστής ανάλογα με την περιοχή (MJ/ha/h/year), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



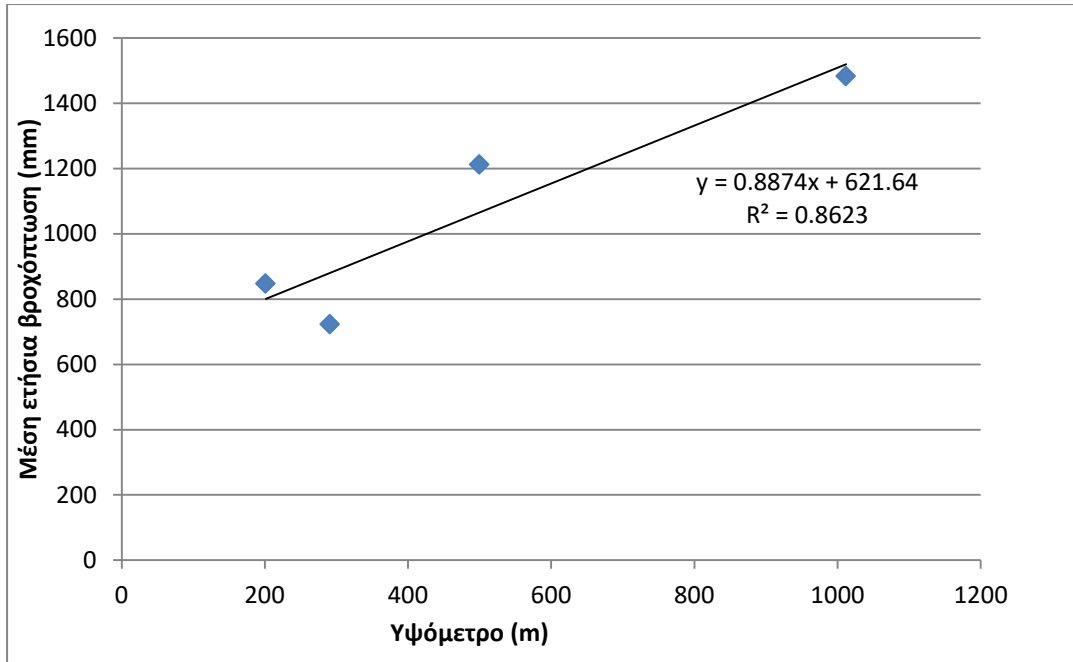
**Σχήμα 5.2:** Τιμές συντελεστή α (Φλαμπούρης, 2008).

Για την εύρεση της παραμέτρου της βροχόπτωσης συλλέχθηκαν δεδομένα εικοσαετίας από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθήνας για τους σταθμούς γύρω από τη λεκάνη απορροής της εξεταζόμενης περιοχής (Πίνακας 5.1).

**Πίνακας 5.1:** Χαρακτηριστικά μετεωρολογικών σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής.

Σταθμός	Υψόμετρο(m)	Μέση ετήσια Βροχόπτωση(mm)
ΣΙΜΟΠΟΥΛΟ	201.4	847.3
ΞΗΡΟΧΩΡΙ	290.9	722.9
ΚΡΥΟΒΡΥΣΗ	1011.9	1482.9
ΚΟΥΜΑΝΗ	500	1212

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα εξάχθηκε η γραμμική εξίσωση τάσης με αρκετά καλό δείκτη συσχέτισης  $R^2 = 0.86$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



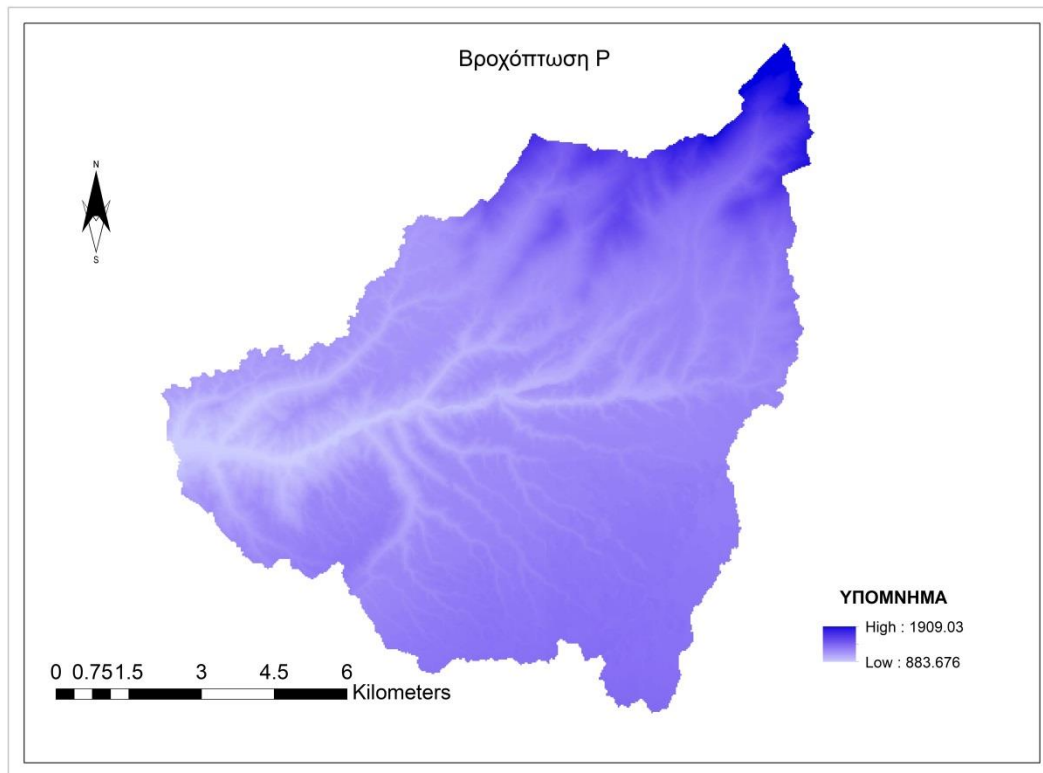
**Σχήμα 5.3:** Συσχέτιση βροχόπτωσης με το υψόμετρο των σταθμών.

Από τα παραπάνω προκύπτει η σχέση:

$$P = 0.8874 * z + 621.64 \quad (5.6)$$

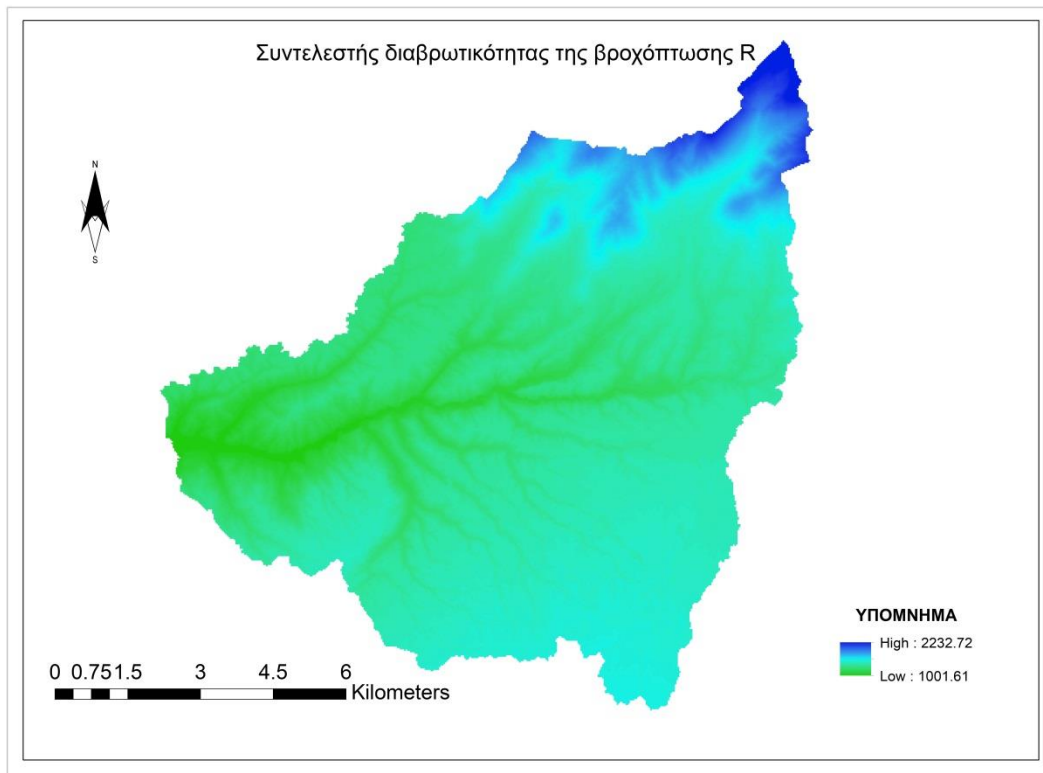
Όπου  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm, και  $z$  το υψόμετρο του κάθε μετεωρολογικού σταθμού σε m.

Η χωρική αναπαράσταση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης φαίνεται στο Σχήμα 5.4, μετά από επεξεργασία στο πρόγραμμα ArcGIS, με βάση το DEM της περιοχής.



**Σχήμα 5.4:** Χωρική Αναπαράσταση μέσης ετήσιας βροχόπτωσης  $P$ (mm).

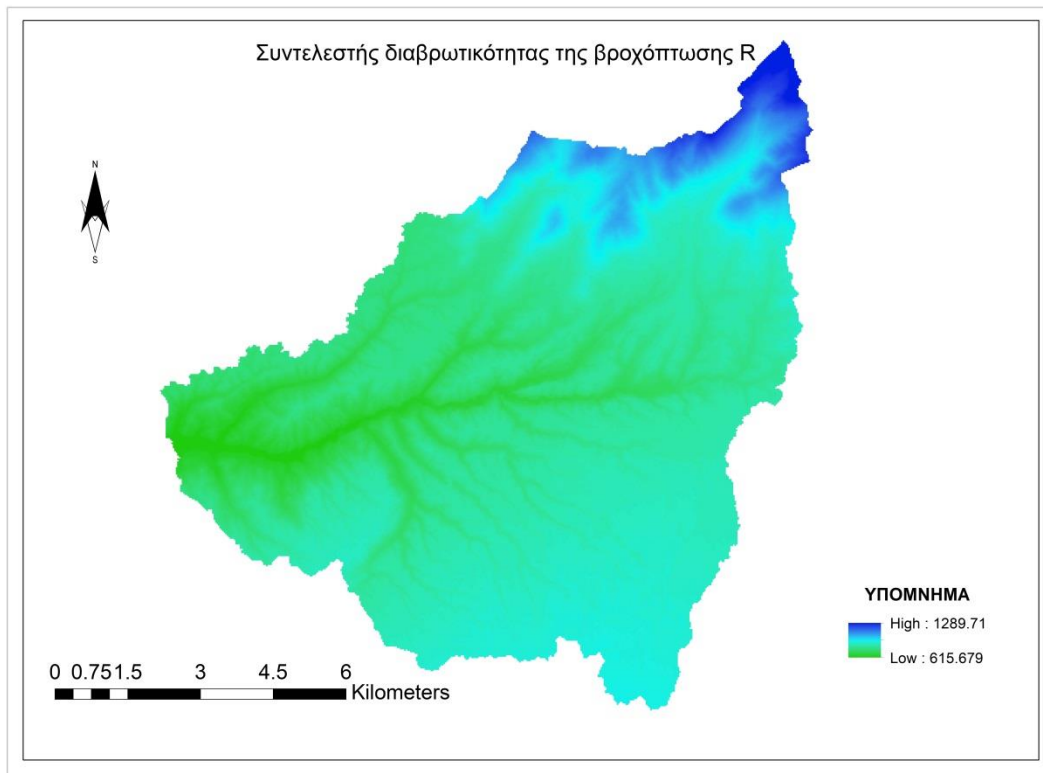
Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωσιμότητας εφαρμόστηκαν και οι δύο μέθοδοι, εκ των οποίων η μέθοδος του τροποποιημένου δείκτη Fournier δίνει πιο έγκυρα αποτελέσματα, λόγω της επιρροής της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης. Αναφορικά με τις τιμές του συντελεστή διαβρωτικότητας από τη σχέση του Φλαμπούρη, ο κοντινότερος σταθμός στη λεκάνη απορροής είναι η «Ανδραβίδα» με  $\alpha=1.2$ . Τόσο η χιλιομετρική απόσταση, όσο και η υψομετρική διαφορά του σταθμού «Ανδραβίδα» με το μέσο υψόμετρο της λεκάνης οδηγούν στην υποεκτίμηση της συνολικής εδαφικής απώλειας και κρίνεται μη ορθή η χρήση της συγκεκριμένης εξίσωσης για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού (Σχήμα 5.5).



**Σχήμα 5.5:** Χωρική αναπαράσταση συντελεστή R, σύμφωνα με την εξίσωση  $R = 1.2 * P$ .

Παρόμοια λογική προκύπτει και εφαρμόζοντας τη λογαριθμική εξίσωση που προέκυψε από την επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων του Φλαμπούρη για τον σταθμό «Ανδραβίδα» με εξίσου καλό δείκτη συσχέτισης  $R^2=0.87$  (Σχήμα 5.6):

$$\ln(R) = 0.96 * \ln(P) - 0.09 \quad (5.7)$$



**Σχήμα 5.6:** Χωρική αναπαράσταση του συντελεστή R, με βάση τη λογαριθμική εξίσωση.

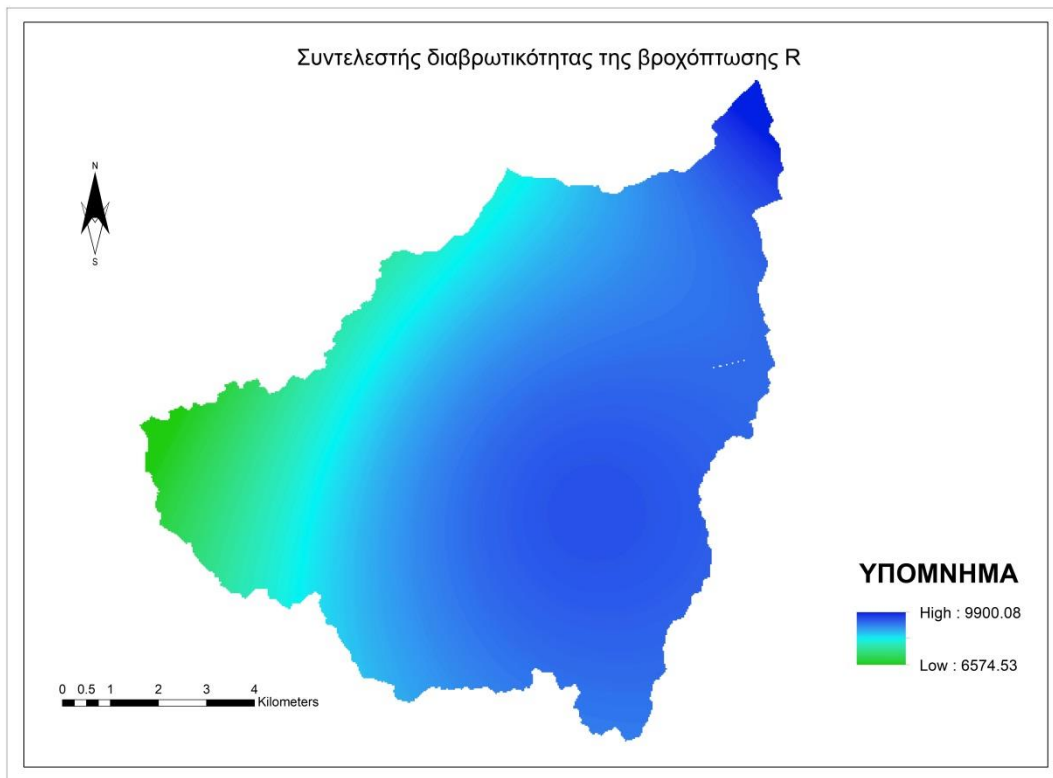
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του τροποποιημένου δείκτη Fournier στους προαναφερθέντες μετεωρολογικούς σταθμούς φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2:** Συντελεστής βροχόπτωσης R, με βάση τον MFI.

Σταθμός	Ετήσια Βροχόπτωση	Τροποποιημένος δείκτης Fournier MFI	R
ΣΙΜΟΠΟΥΛΟ	847.3	102.5	4486
ΞΗΡΟΧΩΡΙ	722.9	82.2	2816.6
ΚΡΥΟΒΡΥΣΗ	1482.9	169.8	12812.4
ΚΟΥΜΑΝΗ	1212	144.9	9223.5

Κατόπιν, μέσω επιφανειακής ολοκλήρωσης του συντελεστή R στο πρόγραμμα ArcGIS, στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή βροχόπτωσης σε όλη τη λεκάνη απορροής.





**Σχήμα 5.7:** Χωρική αναπαράσταση του συντελεστή R, με βάση τη μέθοδο του MFI.

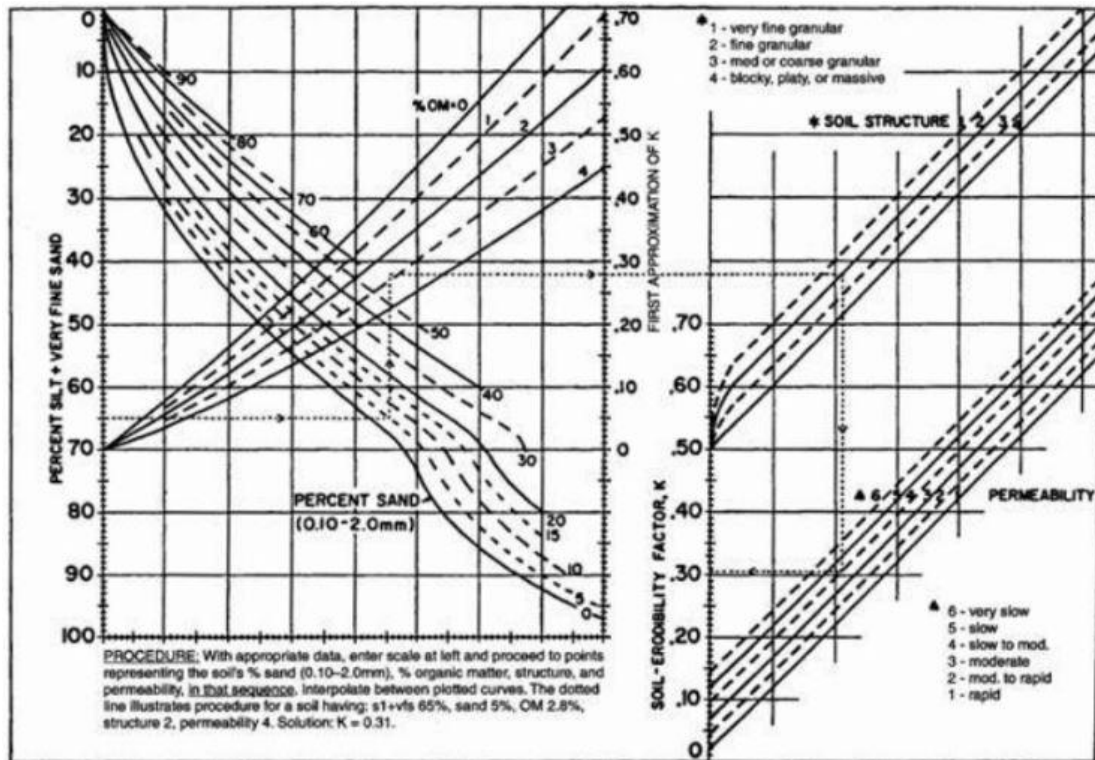
### 5.1.2 Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K

Η πιο δόκιμη διαδικασία για τον ορθό καθορισμό του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K (Soil Erodibility Factor) αποτελεί η συλλογή δειγμάτων από διαφορετικά σημεία της υδρολογικής λεκάνης, προκειμένου να καλυφθούν όλα τα εδαφικά προφίλ που βρίσκονται στη λεκάνη. Επειδή, όμως, η συγκεκριμένη διαδικασία, έχει υψηλές τεχνικοοικονομικές απαιτήσεις, με την πάροδο των ετών έχουν κατασκευαστεί αρκετές εξισώσεις, αλλά και νομογραφήματα, μέσω των οποίων μπορεί να εκτιμηθεί ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους.

Το 1971, οι Wischmeier et al. ανέπτυξαν ένα νομογράφημα για την εκτίμηση του συντελεστή K, με βάση τη δομή, τη διαπερατότητα και την κοκκομετρία των εδαφικών τύπων. “Το νομογράφημα έχει ελεγχθεί από εμπειρικές σχέσεις μεταξύ χαρακτηριστικών του εδάφους και απευθείας μετρήσεις της διαβρωσιμότητας” (Lal, 1988). Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι οι μετρήσεις για την κατασκευή του νομογραφήματος έγιναν σε εδάφη συγκεκριμένης κοκκομετρικής σύστασης, οπότε είναι αμφίβολο κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τροπικά και υπο-τροπικά εδάφη (π.χ. έρημος) (Hudson, 1995).

Το νομογράφημα στο Σχήμα 5.8 συντελεί στη γρήγορη εκτίμηση του συντελεστή διαβρωσιμότητας K του μοντέλου RUSLE, με βάση τα ποσοστά αργίλου, λεπτόκοκκης

άμμου και οργανικών του εδάφους, αλλά και με βάση τη διαπερατότητα και τη συνοχή του.<sup>6</sup>



**Σχήμα 5.8:** Νομογράφημα για την εκτίμηση του συντελεστή  $K$  (Wischmeier, Johnson, & Cross, A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, 1971).

Το 1978, οι Wischmeier και Smith ανέπτυξαν μία νέα εξίσωση που στηρίζεται στο προηγούμενο νομογράφημα, η οποία λαμβάνει υπόψη και τα τεμάχια βράχων, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη διαπερατότητα του εδάφους:

$$K = \left( \frac{[2.1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - OM)M^{1.14} + 3.25 \cdot (S - 2) + 2.5 \cdot (P - 3)]}{7.59} \right) \cdot 100 \quad (5.8)$$

Όπου  $K$  ο συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας ( $t \cdot h / MJ / mm$ ),  $OM$  το ποσοστό οργανικής ουσίας,  $M = [(100 - Ac) \cdot (L + Armf)]$  η δομή της επιφανειακής εδαφικής στρώσης, με  $Ac$  το ποσοστό αργίλου ( $< 0.002$  mm),  $L$  το ποσοστό λύος ( $0.002 \sim 0.005$  mm),  $Armf$  το ποσοστό της άμμου ( $0.05 \sim 0.1$  mm),  $S$  η εδαφική δομή και  $P$  η διαπερατότητα του εδάφους (Wischmeier & Smith, Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning, 1978).

Το 1997 αναπτύχθηκε μία νέα εξίσωση από τους Torri et al. (Torri, Poesen, & Borselli, 1997), η οποία στηρίχθηκε σε μετρήσεις από τους πιο συνηθισμένους γεωλογικούς σχηματισμούς και η οποία εφαρμόστηκε στα εδάφη της Ιταλίας από τους (Castrignanu et. al, 2005).

<sup>6</sup> Για την ορθή εκτίμηση του συντελεστή διαβρωσιμότητας  $K$ , είναι απαραίτητος ο πολλαπλασιασμός με 1.313 για την μετατροπή των μονάδων σε  $t \cdot h / (MJ \cdot cm)$  (Depountis et. al, 2018).

$$K = 0.0293 * (0.65 - D_G + 0.24 * D_G^2) * \exp \left[ -0.0021 * \frac{OM}{C} - 0.00037 * (OM * C)^2 - 4.02 * C + 1.72 * C^2 \right] \quad (5.9)$$

Όπου  $D_G = \sum f_i \log_{10}(\sqrt{d_i d_{i-1}})$ , όπου  $d_i$  η μέγιστη διάμετρος κόκκων σε mm,  $d_{i-1}$  η ελάχιστη διάμετρος κόκκων σε mm και  $f_i$  τα μεγέθη κόκκων της αργίλου και της άμμου, όπως αυτά προσδιορίζονται από τους Shirazi et al (Shirazi, Boersma, & Hart, 1988).

Για γεωλογικούς σχηματισμούς με περιορισμένα δεδομένα σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, το 1996 αναπτύχθηκε από τους Romkens et al. η εξής σχέση, η οποία μπορεί να καλύψει και τις περιπτώσεις εδαφών που αδυνατεί το νομογράφημα Wischmeier (π.χ. η έρημος) και εφαρμόστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες για 138 διαφορετικούς τύπους εδαφών (Romkens, et al., 1996):

$$K = 7.594 \left[ 0.0017 + 0.0494 \exp \left( -0.5 * \left( \frac{\log(Dg) + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right) \right] \quad (5.10)$$

Οι Λυκούδη και Ζαρρής (2001) ομαδοποίησαν ορισμένους γεωλογικούς σχηματισμούς με βάση τη διαβρωσιμότητά τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3 (Ζαρρής, Λυκούδη, & Κουτσογιάννης, 2001).

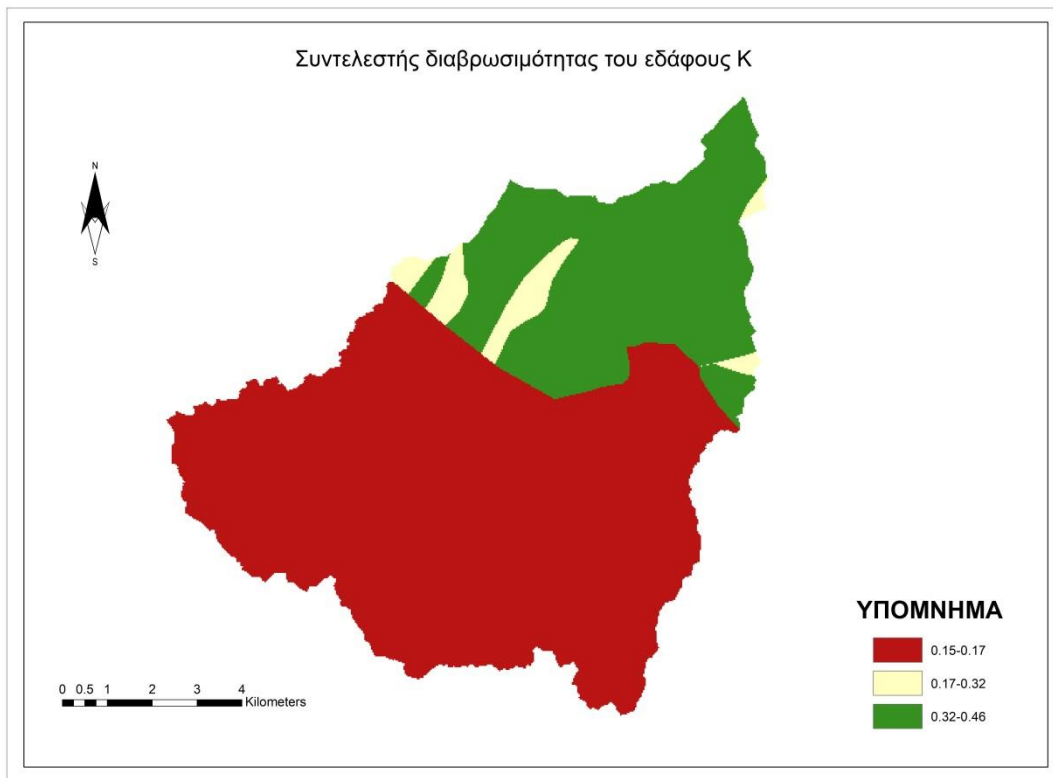
**Πίνακας 5.3:** Τιμές συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K.

Γεωλογικός Σχηματισμός	K
Φλύσσης Γαβρόβου	0.017
Φλύσσης Πίνδου	0.01
Αλλούβιες αποθέσεις	0.027
Ασβεστόλιθος Πίνδου	0.004
Ασβεστόλιθος Γαβρόβου	0.0007
Υπερπινδικοί ασβεστόλιθοι	0.008

Για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού Ηλείας, αφού αντλήθηκαν δεδομένα σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 5.4) του κάθε γεωλογικού σχηματισμού που εμπεριέχεται στη λεκάνη (Yassoglou, Tsadilas, & Kosmas, 2017), στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K.

**Πίνακας 5.4:** Ποσοστά αργίλου, άμμου, ιλύος και οργανικών στα πετρώματα της περιοχής μελέτης.

Πέτρωμα	Άργιλος (%)	Άμμος (%)	Ιλύς(%)	Οργανικά (%)
Φλύσσης/πρώτος Φλύσσης	8	47	45	2.5-8.9
Ηφαιστειακοί Τόφφοι	26	33	41	2.4
Αποθέσεις	45.8	33.2	21	2.9



**Σχήμα 5.9:** Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας Κ, σύμφωνα με το νομογράφημα Wischmeier.

### 5.1.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS

Οι συντελεστές μήκους κλίσης (L-factor/Slope Length) και βαθμού κλίσης (S-factor/Slope Steepness) προσδιορίζουν την επίδραση της γεωμορφολογίας και του ανάγλυφου στην εδαφική διάβρωση. Οι εδαφικές απώλειες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές του βαθμού κλίσης, παρά του μήκους κλίσης (McCool D.K. et. al, 1987).

Οι (Wischmeier & Smith, Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning, 1978) όρισαν την εξίσωση εκτίμησης του συντελεστή LS ως:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^n * (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2) \quad (5.11)$$

$$n = \begin{cases} 0.2, & S < 0.01 \\ 0.3, & 0.01 < S \leq 0.035 \\ 0.4, & 0.035 < S \leq 0.05 \\ 0.5, & S > 0.05 \end{cases} \quad (5.12)$$

Ορισμένοι ερευνητές υποστήριξαν ότι οι εδαφικές απώλειες δεν εξαρτώνται τόσο από το μήκος κλίσης της λεκάνης, όσο από την ανάντη συμβάλλουσα επιφάνεια. Το

1986 οι (Moore & Burch, 1986), με βάση την παραπάνω θεώρηση κατέληξαν στη σχέση:

$$LS = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m * \left(\frac{\sin b}{0.0896}\right)^n \quad (5.13)$$

Όπου  $A_s$  η ανάντη συμβάλλουσα στη διάβρωση επιφάνεια σε  $m^2$ ,  $b$  η τοπική γωνία κλίσης σε μοίρες και  $n, m$  συντελεστές ανάλογα με τον τύπο της διάβρωσης, με προτεινόμενες τιμές 0.4 και 1.3 αντίστοιχα (Panagos et. al, 2012)<sup>78</sup>.

Οι (Mitasova & Mitas, 2001a) σε μεταγενέστερη έρευνα κατέληξαν στη σχέση:

$$LS = (m + 1) * \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m * \left(\frac{\sin b}{0.09}\right)^n \quad (5.14)$$

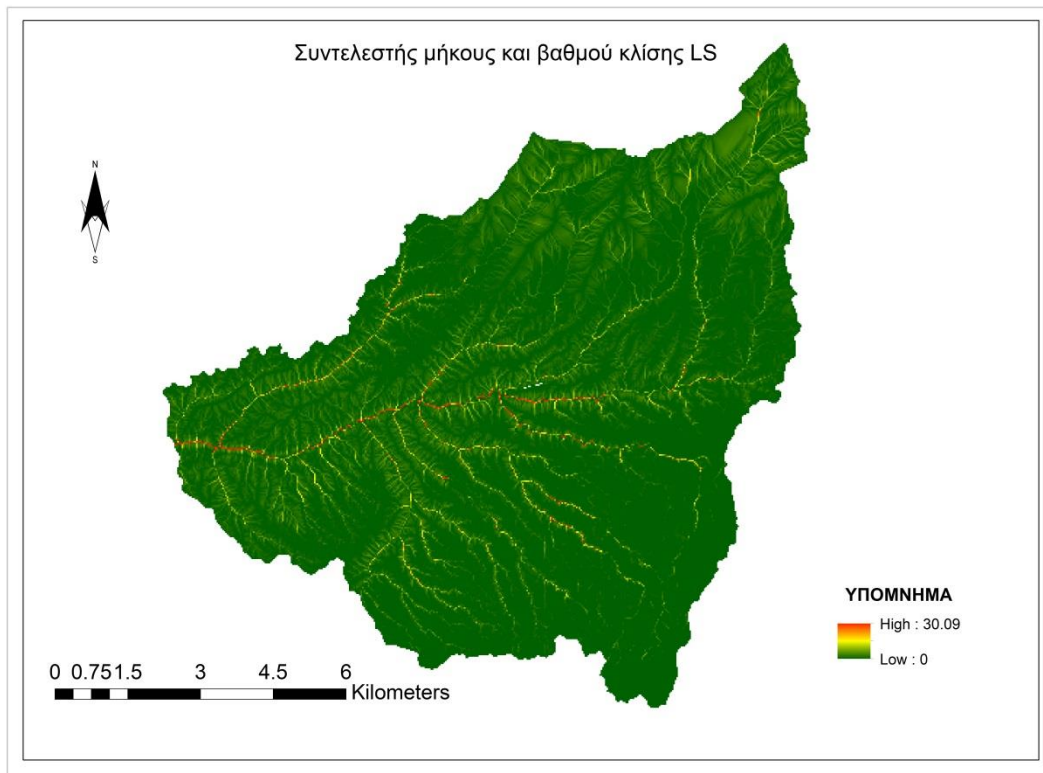
Όπου  $m, n$  συντελεστές που εξαρτώνται από τον τύπο της διάβρωσης και λαμβάνουν τιμές 0.4~0.6 και 1~1.3 αντίστοιχα, με τις μικρές τιμές του συντελεστή  $m$  να αντιστοιχούν σε επιφανειακή (sheet) διάβρωση, και τις μικρές σε αυλακωτή (rill) διάβρωση.

Στο Σχήμα 5.10 αναπαρίσταται η χωρική κατανομή του συντελεστή LS για τη λεκάνη απορροής με βάση τη σχέση των Mitasova and Mitas (2001a), η οποία κρίνεται και ως πιο ορθή μέθοδος για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Για λόγους πληρότητας παρατίθεται στο Σχήμα 5.11 και η χωρική κατανομή του συντελεστή LS, σύμφωνα με τους Moore και Burch (1986), αν και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη λεκάνη απορροής του ποταμού, διότι οι κλίσεις υπερβαίνουν τις 14 μοίρες.

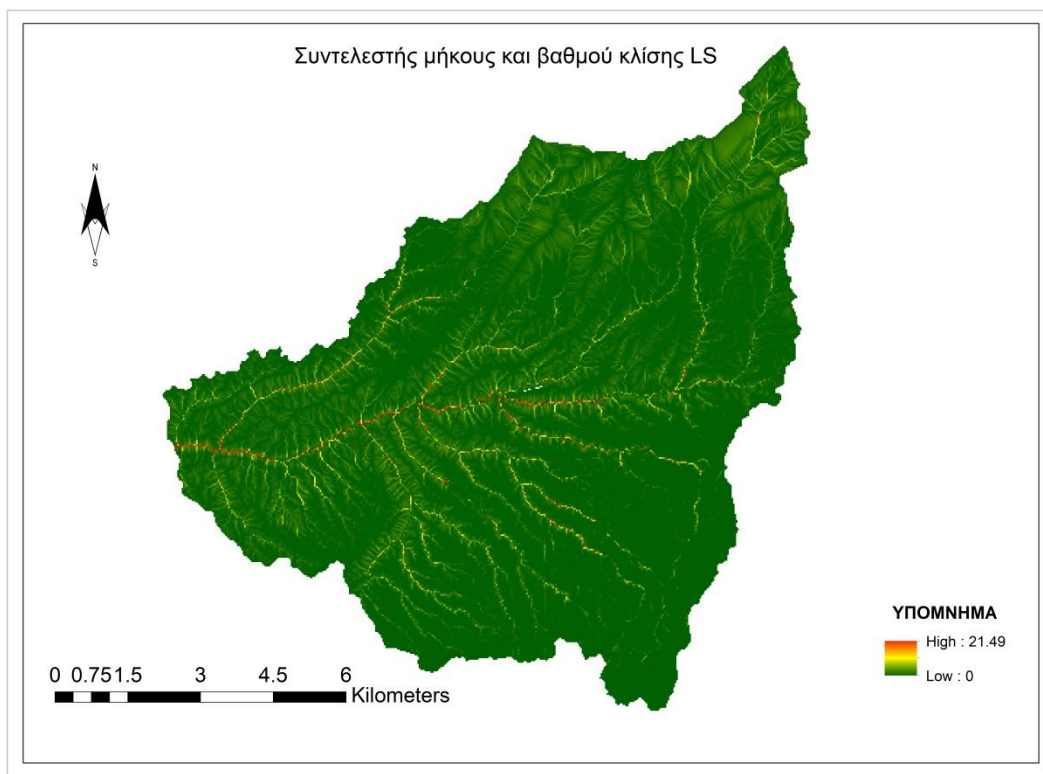
<sup>7</sup> Η σχέση αυτή εφαρμόζεται για μήκη κλίσης μικρότερα των 100 m και για γωνίες κλίσης μικρότερες των 14 μοιρών (Di Stefano, Ferro, & Porto, 2000).

<sup>8</sup> Σε περιβάλλον ArcGIS, ο συντελεστής LS υπολογίζεται από τη σχέση

$$LS = \left[ (flow\ accumulation * \frac{Cell\ Size}{22.13})^{0.4} * \left[ \frac{\sin(slope)}{0.0896} \right]^{1.3} \right] \quad (Moore \& Burch, 1986)$$



**Σχήμα 5.10:** Χωρική κατανομή του συντελεστή LS, με βάση τους Mitasona και Mitas (2001a).



**Σχήμα 5.11:** Χωρική κατανομή του συντελεστή LS, με βάση τους Moore και Burch (1986).

### 5.1.4 Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης C

Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης (Cover management Factor) συνδέει την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών με το ρυθμό παραγωγής εδαφικής απώλειας (Βαχαβιώλος, 2014). Πρόκειται για το δεύτερο πιο σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την εδαφική διάβρωση (Van der Knijff, Jones, & Montanarella, 2000), με τιμές που κυμαίνονται από 0 (ισχυρά προστατευόμενο έδαφος) έως 1 (γυμνό έδαφος).

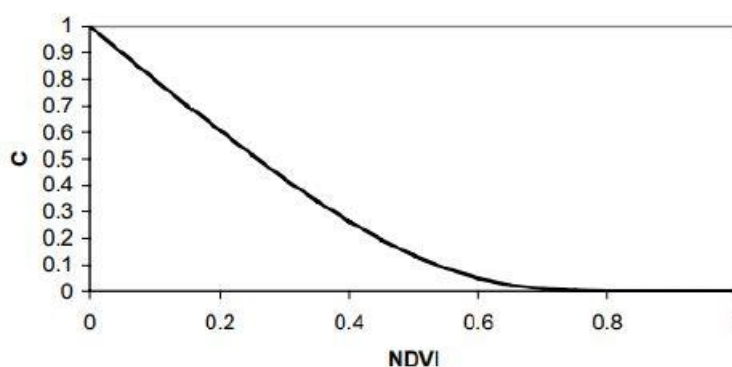
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εκτίμησης του συντελεστή C χρησιμοποιώντας δείκτες βλάστησης μέσω δορυφορικών εικόνων για κάθε περιοχή (Phinzi & Ngetar, 2019). Οι πιο γνωστές μέθοδοι αναλύουν τη γραμμική συσχέτιση του συντελεστή C με τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ο οποίος υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5.15)$$

Όπου *Red* το δορυφορικό κανάλι για το ερυθρό τμήμα του φάσματος (0.63-0.69 μm) και *NIR* το δορυφορικό κανάλι για το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (0.76-0.9 μm). Ο δείκτης βλάστησης NDVI λαμβάνει επαρκώς υπόψη πιθανές αλλαγές στη βλάστηση της περιοχής (π.χ. λόγω πυρκαγιών) (Polykretis, Grillakis, & Alexakis, 2020). Ο συντελεστής C εκτιμάται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$C = \exp \left[ -a \left( \frac{NDVI}{b - NDVI} \right) \right] \quad (5.16)$$

Όπου *a* και *b* αδιάστατοι παράμετροι που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ *C* και *NDVI*, και ισούνται με 2 και 1 αντίστοιχα, και καθορίζουν τη μορφή της προαναφερθείσας καμπύλης (Σχήμα 5.12) (Van der Knijff, Jones, & Montanarella, 2000).

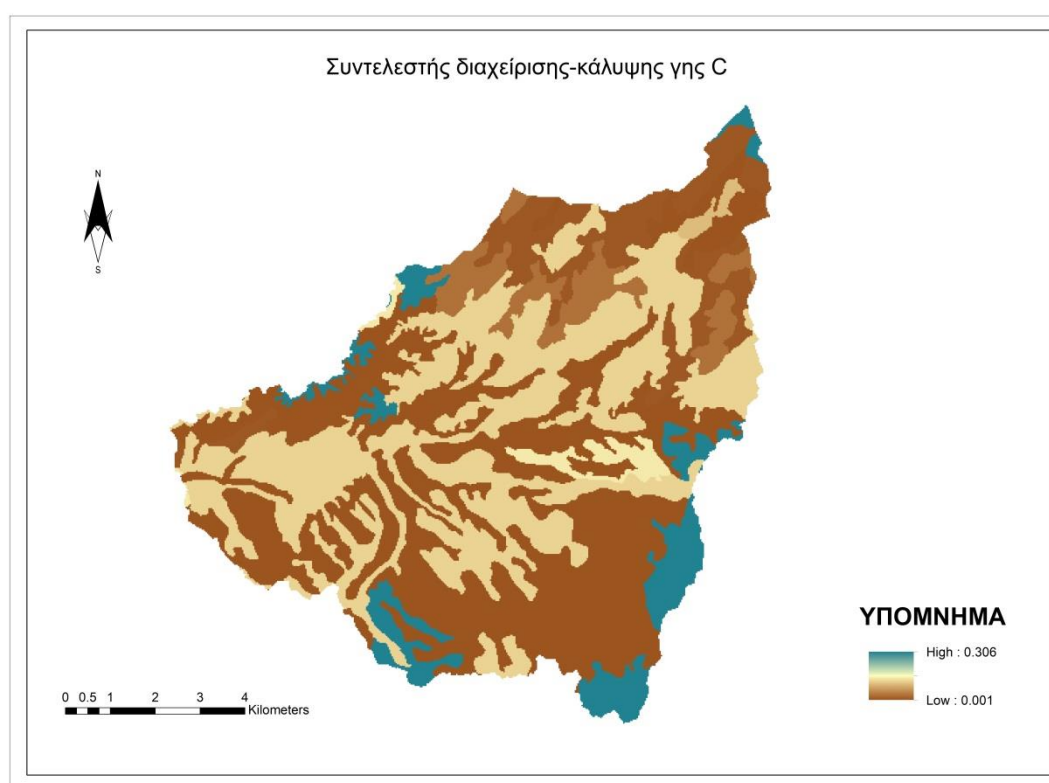


**Σχήμα 5.12:** Καμπύλη NDVI-C για  $a=2$  και  $b=1$  (Van der Knijff, Jones, & Montanarella, 2000).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων, οι τιμές του συντελεστή C λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία και προσδιορίζονται με βάση τις χρήσεις γης της περιοχής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5 και στο Σχήμα 5.13.

**Πίνακας 5.5:** Αντιστοίχιση Χρήσεων Γης με τιμές του συντελεστή C.

Κωδικός Corine	Περιγραφή	Συντελεστής C
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.001
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.3
231	Λιβάδια	0.1132
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.1476
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.1307
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.0014
312	Δάσος κωνοφόρων	0.001
313	Μικτό δάσος	0.001
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.0522
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.03
324	Μεταβατικές δασώσεις θαμνώδεις εκτάσεις	0.026
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.3062



**Σχήμα 5.13:** Χωρική κατανομή του συντελεστή C, με βάση τις χρήσεις γης.

### 5.1.5 Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης P

“Ο συντελεστής P αντικατοπτρίζει την επίδραση που μπορούν να έχουν διάφορες καλλιεργητικές και διαχειριστικές τεχνικές στη μείωση της εδαφικής διάβρωσης”



(Βαχαβιώλος, 2014). Λαμβάνει θεωρητικές<sup>9</sup> τιμές από 0 έως 1, ανάλογα με τις καλλιεργητικές πρακτικές και την κλίση της λεκάνης (Πίνακας 5.6).

**Πίνακας 5.6:** Τιμές συντελεστή *P* με βάση τις καλλιεργητικές πρακτικές στη λεκάνη απορροής.

Κλίση (%)	A	B	C
1 - 2	0.6	0.3	0.12
3 - 8	0.5	0.25	0.1
9 - 12	0.6	0.3	0.12
13 - 16	0.7	0.35	0.14
17 - 20	0.8	0.4	0.16
21 - 25	0.9	0.45	0.18

Όπου:

Κατηγορία A: όργανο και φύτευση σε γραμμές παράλληλες προς τις ισοϋψείς,  
Κατηγορία B: Διαχωρισμός της γης σε λωρίδες παράλληλες με τις ισοϋψείς, με διαφορετική καλλιέργεια στην κάθε μία και ανακύκλωση των καλλιεργειών,  
Κατηγορία C: Κατασκευή μικρών αναχωμάτων κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους (Τσακίρης, 2013).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, λαμβάνοντας υπόψη ότι το 44.14% της λεκάνης απορροής αποτελείται από γεωργικές εκτάσεις, χωρίς να μπορεί να εξακριβωθεί πως είναι οργανωμένες παράλληλα με τις ισοϋψείς, λαμβάνεται τιμή του συντελεστή *P* ίση με 1 υπέρ της ασφαλείας. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα επεισόδια πυρκαγιών οδηγούν σε καταστροφή των καλλιεργητικών εκτάσεων και κατ' επέκταση των διαχειριστικών έργων σε μία περιοχή. Οι Derountis et. al θεωρώντας ότι ολόκληρη η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού Ηλείας είχε καεί ολοσχερώς από τις πυρκαγιές το 2007, χρησιμοποιούν τιμή συντελεστή ίση με τη μονάδα (Derountis et. al, 2018).

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η τιμή του συντελεστή *P*, η οποία παραμένει η ίδια σε όλη την έκταση της λεκάνης.

---

<sup>9</sup> Οι σύγχρονες πρακτικές και δράσεις αποτροπής της διάβρωσης, επιβραδύνουν το φαινόμενο, αλλά δεν το διακόπτουν (Παπάζογλου, 2009).



**Σχήμα 5.14:** Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης P.

## 5.2 Μέθοδος Gavrilovic

Η μέθοδος Gavrilovic ή αλλιώς Erosion Potential Method (EPM) αναπτύχθηκε από τον Gavrilovic S. (1962, 1970, 1972) και στοχεύει στην εκτίμηση του μέσου ετήσιου όγκου διάβρωσης μίας λεκάνης απορροής, με βάση κλιματικές και γεωλογικές παραμέτρους.

“Το μοντέλο Gavrilovic εστιάζει στην εκτίμηση της στερεοαπορροής σε επίπεδο λεκάνης απορροής καθώς έχει τη δυνατότητα προσδιορισμού του συνόλου των σημαντικών διαδικασιών διάβρωσης, όπως η επιφανειακή ή φυλλοειδής (sheet), αυλακωτή (rill), χαραδρωτική (gully) και ποτάμια διάβρωση (bank erosion), κατολισθήσεις (landslides) και την απόθεση (deposition) αυτών” (Blinkov & Konstadinon, 2010). Συνεπώς, σε ορεινές λεκάνες μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστο συγκριτικά με τη μέθοδο RUSLE, που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της διάβρωσης για καλλιεργήσιμες λεκάνες.

Ο μέσος ετήσιος όγκος εδαφικής διάβρωσης υπολογίζεται από την εξίσωση (Gavrilović, Proracim srednje goclisnje kolicine nanosa prema potencijalu erozije (Serbian), 1962) (Gavrilović, Savremeni nacini proracunavanja bujicnih nanosa i izrada karata erozije (Serbian), 1970) (Gavrilović, Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji (Serbian), 1972):

$$W = T * P * \pi * \sqrt{Z^3} * A \quad (5.17)$$

Όπου  $W$  η μέση ετήσια διάβρωση<sup>10</sup> σε  $m^3/year$ ,  $T$  ο συντελεστής θερμοκρασίας,  $P$ <sup>11</sup> η μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm,  $\pi$  ο μαθηματικός τελεστής 3.14,  $Z$  η παράμετρος της εδαφικής διάβρωσης και  $A$  η έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής σε  $km^2$ .

### 5.2.1 Συντελεστής θερμοκρασίας $T$

Ο συντελεστής θερμοκρασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = \sqrt{\left(\frac{T_0}{10} + 0.1\right)} \quad (5.18)$$

Όπου  $T_0$  η μέση ετήσια θερμοκρασία σε  $^{\circ}C$ .

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για τέσσερις σταθμούς στην περιοχή της λεκάνης απορροής (Πίνακας 5.7). Στη συνέχεια εξάχθηκε η γραμμική εξίσωση θερμοκρασίας-υψόμετρο σταθμών, με δείκτη συσχέτισης  $R^2 = 0.89$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.

**Πίνακας 5.7:** Δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών στη λεκάνη απορροής.

Σταθμός	Υψόμετρο(m)	Μέση ετήσια θερμοκρασία( $^{\circ}C$ )
ΩΛΕΝΗ	61	17.2
ΠΗΝΕΙΑ	184	17.5
ΛΑΓΚΑΔΙΑ	970	13.9
ΠΥΡΓΟΣ	22	19.2

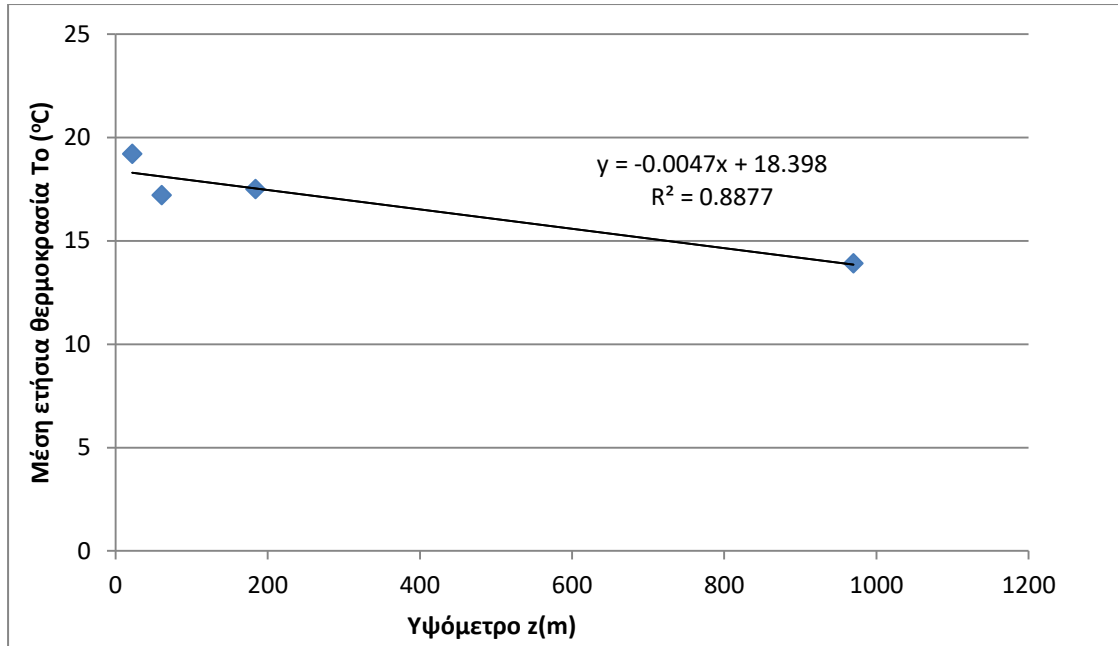
Η εξίσωση που εξάχθηκε έχει τη μορφή:

$$T_0 = -0.0047 * z + 18.398 \quad (5.19)$$

Όπου  $T_0$  η μέση ετήσια θερμοκρασία του σημείου σε  $^{\circ}C$  και  $z$  το αντίστοιχο υψόμετρο σε m.

<sup>10</sup> Για την αναγωγή του όγκου σε μάζα διαβρωμένου εδάφους, πολλαπλασιάζεται με τη φαινόμενη πυκνότητα των πετρωμάτων, που θεωρητικά μπορεί να πάρει την τιμή  $2.67 t/m^3$  (Κωτούλας, 2001).

<sup>11</sup> Ο υπολογισμός του συντελεστή βροχόπτωσης περιγράφεται στο Κεφ. 5.1.1.



Σχήμα 5.15: Γραμμική συσχέτιση θερμοκρασίας με το υψόμετρο.

### 5.2.2 Παράμετρος διάβρωσης Z

Η παράμετρος της διάβρωσης πρόκειται πρακτικά για το μέτρο της έντασης των διαβρωτικών διεργασιών (Staut, 2004) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Z = X * Y * (\varphi + \sqrt{J}) \quad (5.20)$$

Όπου  $X$  ο συντελεστής προστασίας της φυτοκάλυψης από τη διάβρωση,  $Y$  ο συντελεστής ανθεκτικότητας των πετρωμάτων κατά της βροχοπτώσης,  $\varphi$  ο συντελεστής της υφιστάμενης διάβρωσης και  $J$  η κλίση της λεκάνης απορροής(%).

Ο συντελεστής  $X$  εξαρτάται από τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής και από τη φυτοκάλυψη. Συγκεκριμένα, συνδυάζει δύο ξεχωριστούς συντελεστές, το συντελεστή  $x$  που αφορά τη γη, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και το βαθμό κάλυψης, και το συντελεστή  $\alpha$ , ο οποίος αφορά ήδη υφιστάμενα μέτρα προστασίας στη γεωργία (Efthimiou, Lykoudi, & Karavitis, 2017). Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή  $X$  με βάση το είδος φυτοκάλυψης (Zemljic, 1971), ενώ στον Πίνακα 5.9 οι τιμές του συντελεστή  $X$  με βάση την κατάσταση της λεκάνης και την ύπαρξη ή όχι υδρονομικών έργων (Κωτούλας, 2001).

Ο συντελεστής  $Y$  αφορά τη διαβρωσιμότητα της λεκάνης απορροής και εξαρτάται από τη γεωλογία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών (Πίνακας 5.10), ενώ ο συντελεστής  $\varphi$  είναι ένας εμπειρικός συντελεστής και αφορά το βαθμό της ήδη υπάρχουσας διάβρωσης στη λεκάνη. Συχνά, λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων υιοθετείται η ακόλουθη εξίσωση για την εκτίμηση του συντελεστή  $\varphi$ :

$$\varphi = 0.7 * X + 0.3 * Y \quad (5.21)$$

Όπου  $X$  ο συντελεστής προστασίας της φυτοκάλυψης από τη διάβρωση και  $Y$  ο συντελεστής ανθεκτικότητας των πετρωμάτων κατά της βροχόπτωσης.<sup>12</sup>

Για το συντελεστή  $\varphi$ , η βιβλιογραφία δίνει ορισμένες τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας, με τις τιμές κοντά στο 0 να δηλώνουν ασθενή διάβρωση και τιμές κοντά στο 1 έντονη διάβρωση και υποτίμηση της λεκάνης (Πίνακας 5.11).

Τέλος, σύμφωνα με το μοντέλο Gavrilovic, συνίσταται η κατηγοριοποίηση των υποπεριοχών της λεκάνης απορροής ανάλογα με το βαθμό διάβρωσής τους, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.12 (Gavrilović et. al, 2004).

**Πίνακας 5.8:** Τιμές συντελεστή  $X$ , με βάση το είδος της φυτοκάλυψης.

Είδος φυτοκάλυψης	$X$
Μικτές δασοσυστάδες και πυκνοί θαμνώνες ή δασοσυστάδες αραιές με υπόροφο	0.05 - 0.20
Δασοσυστάδες κωνοφόρων με υπόροφο ασθενή ή θαμνώνες, όχι σύμπυκνοι	0.20 - 0.40
Δασοσυστάδες και θαμνώνες υποβαθμισμένοι, λιβάδια	0.40-0.60
Λιβάδια και εδάφη καλλιεργούμενα, υποβαθμισμένα	0.60 - 0.80
Επιφάνεια χωρίς φυτοκάλυψη	0.80 - 1.00

**Πίνακας 5.9<sup>α,β</sup>:** Τιμές συντελεστή  $X$ , ανάλογα με την κατάσταση της λεκάνης και την ύπαρξη ή όχι υδρονομικών έργων.

Κατάσταση λεκάνης χωρίς υδρονομικά έργα <sup>α</sup>	$X$
Έδαφος πλήρως υποβαθμισμένο, μη καλλιεργήσιμο	1
Αγροί καλλιεργούμενοι με κλιτείς	0.9
Αμπελώνες χωρίς βλάστηση στο έδαφος	0.7
Υποβαθμισμένες δασοσυστάδες και θαμνώνες με υποβαθμισμένο έδαφος	0.6
Λιβάδια, αγροί με τριφύλλι και άλλες παρόμοιες καλλιέργειες	0.4
Εκτεταμένες δασοσυστάδες και θαμνώνες σε καλή κατάσταση	0.05
Κατάσταση λεκάνης με υδρονομικά έργα <sup>β</sup>	$X$
Διευθετημένες κοίτες με φράγματα	0.7
Αγροί καλλιεργημένοι συχνά κατά τις ισοΰψεις	0.63
Αγροί καλά καλλιεργούμενοι	0.54
Αγροί καλλιεργημένοι κατά λωρίδες οριζόντιες	0.45
Αγροί βαθμιδωμένοι	0.36
Αμπελώνες κατά τις ισοΰψεις	0.32
Υποβαθμισμένα εδάφη μετά από αναχλόαση, βελτιωμένα λιβάδια	0.3
Εδάφη με αγωγούς ανάσχεσης και συγκράτησης του νερού	0.27
Εδάφη λεκανών με αναδασώσεις συνοδευόμενες και από βαθμίδωση του εδάφους	0.1

<sup>12</sup> Σε περίπτωση τιμών του συντελεστή  $\varphi$  μεγαλύτερων της μονάδας, αυτός διαιρείται με τη μέγιστη προκύπτουσα τιμή.

**Πίνακας 5.10:** Τιμές συντελεστή  $Y$ , με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς (Κωτούλας, 2001).

Είδος πετρώματος και υπεδάφους	$Y$
Σκληρά πετρώματα, ανθεκτικά στη διάβρωση	0.20 - 0.60
Πετρώματα μετρίως ανθεκτικά στη διάβρωση	0.60 - 1.00
Εύθρυπτα πετρώματα	1.00 - 1.30
Αποθέσεις, μορένες, άργιλοι, ψαμμόλιθοι και άλλα λιγότερο ανθεκτικά πετρώματα	1.30 - 1.80
Πολύ ευαίσθητα στη διάβρωση πετρώματα και εδάφη	1.80 - 2.00

**Πίνακας 5.11:** Τιμές συντελεστή  $\phi$ , με βάση την υφιστάμενη διάβρωση της λεκάνης απορροής (Κωτούλας, 2001).

Είδος και βαθμός διάβρωσης λεκάνης	$\phi$
Ασθενής διάβρωση	0.10 - 0.20
Επιφανειακή διάβρωση στα 25-50% της λεκάνης	0.30 - 0.50
Επιφανειακή διάβρωση, ολισθήσεις και αποθέσεις, καρστική διάβρωση	0.60 - 0.70
Το 50-80% της λεκάνης είναι υποβαθμισμένο από χαραδρώσεις και ολισθήσεις	0.80 - 0.90
Πλήρης υποβάθμιση από έντονες διαβρώσεις	0.90 - 1.00

**Πίνακας 5.12:** Κατηγοριοποίηση της διάβρωσης με βάση την παράμετρο  $Z$ .

Κατηγορία Διάβρωσης	Ποιοτικά χαρακτηριστικά	$Z$
I	Εκτενής διάβρωση – βαθιές διεργασίες διάβρωσης	>1.00
II	Εντονότερες ή ηπιότερες μορφές εκτενούς διάβρωσης	0.71 - 1.00
III	Μέτρια διάβρωση	0.41 - 0.70
IV	Ήπια διάβρωση	0.20 - 0.40
V	Μηδαμινή διάβρωση	<0.19

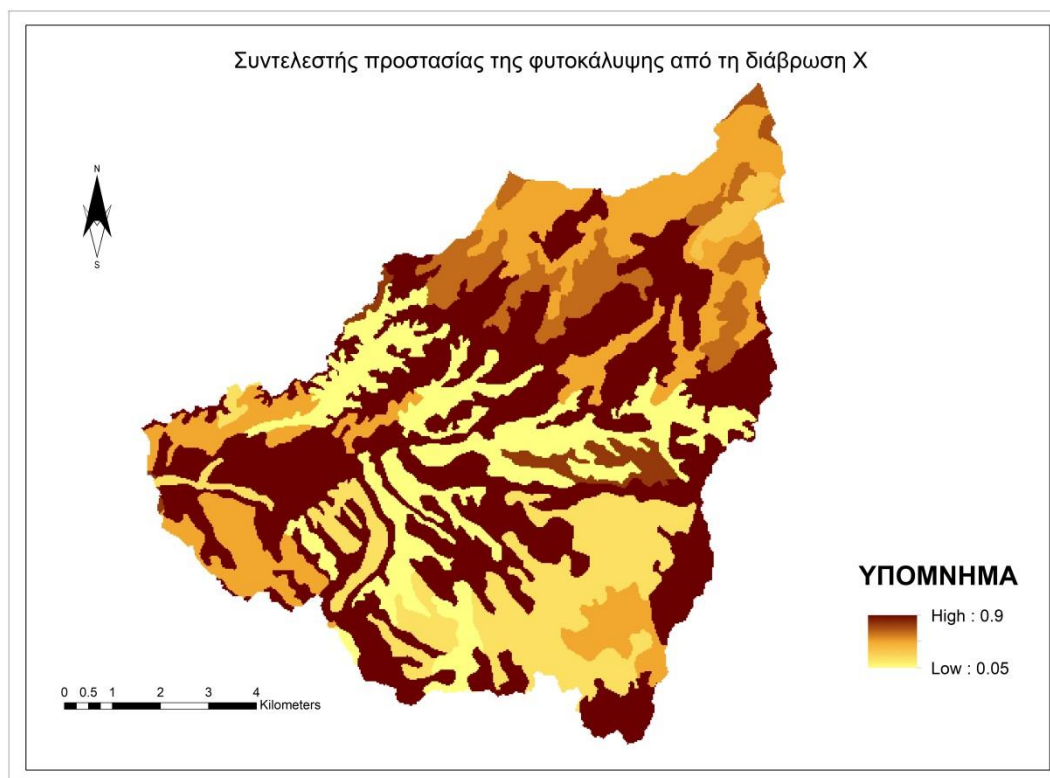
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο συντελεστής  $X$  εκτιμήθηκε με βάση τους κωδικούς CORINE<sup>13</sup> 2018 (Ευθυμίου, 2016) στον Πίνακα 5.13 και στη συνέχεια αναπαρίσταται χωρικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16.

**Πίνακας 5.13:** Αντιστοίχιση κωδικών CORINE με τιμές του συντελεστή  $X$ .

Κωδικός CORINE	Περιγραφή	$X$
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.05
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	1
231	Λιβάδια	0.4
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.7
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.9

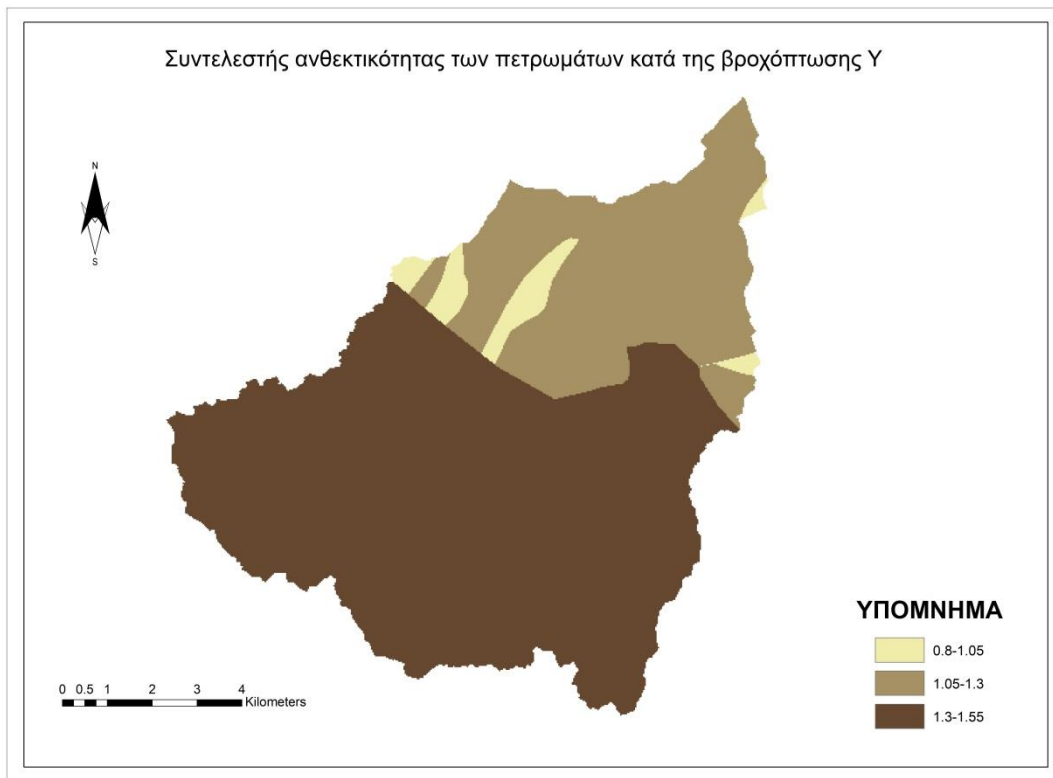
<sup>13</sup> Για τις μη υπάρχουσες τιμές έγιναν εύλογες εκτιμήσεις.

311	Δάσος πλατύφυλλων	0.6
312	Δάσος κωνοφόρων	0.6
313	Μικτό δάσος	0.6
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.4
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.4
324	Μεταβατικές δασώσεις θαμνώδεις εκτάσεις	0.6
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.8



**Σχήμα 5.16:** Χωρική αναπαράσταση συντελεστή Χ της μεθόδου Gavrilovic.

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η χωρική αναπαράσταση του συντελεστή Υ, με βάση τις τιμές που προκύπτουν από τον Πίνακα 5.10.

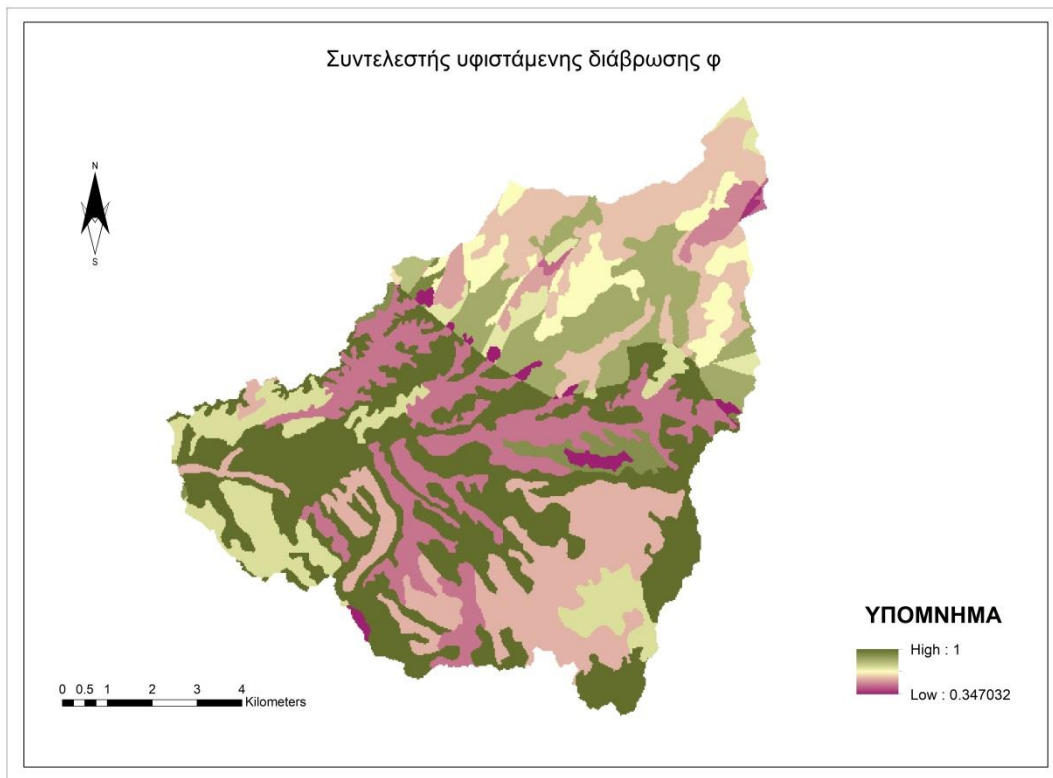


**Σχήμα 5.17:** Χωρική αναπαράσταση συντελεστή Υ της μεθόδου Gavrilovic.

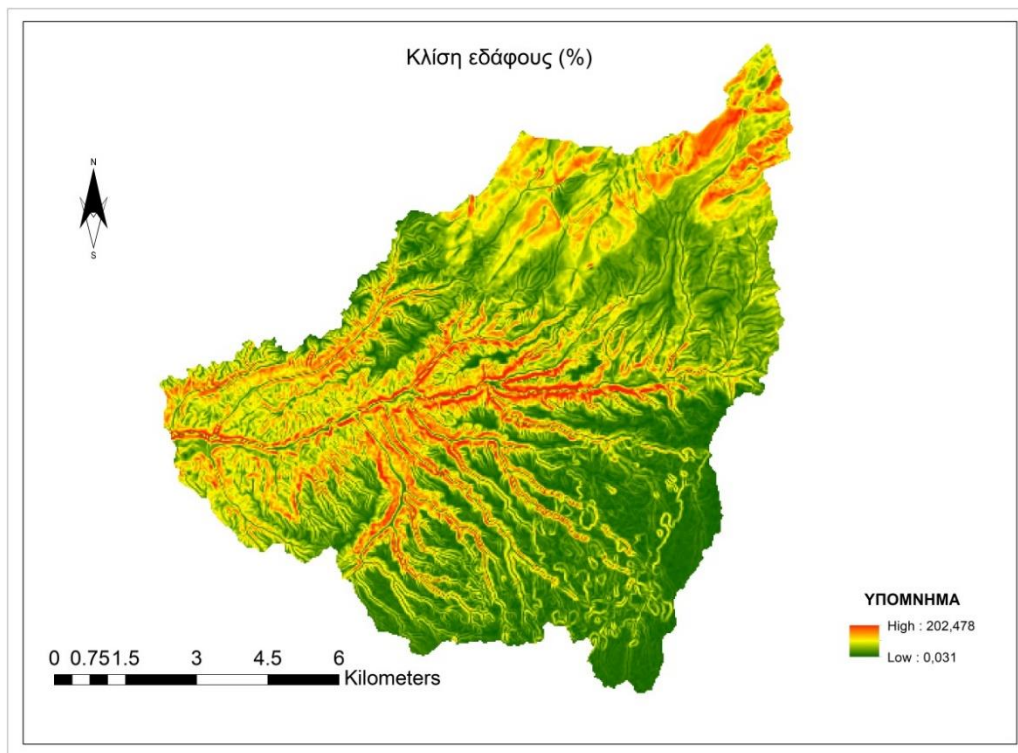
Εφαρμόζοντας την εμπειρική σχέση για την εκτίμηση του συντελεστή  $\phi$  σε περιβάλλον ArcGIS, και διορθώνοντας τις τιμές του, προκειμένου να έχουν μέγιστη τιμή τη μονάδα, παρουσιάζεται η χωρική αναπαράστασή του στο Σχήμα 5.18.

Τέλος, για την τελική εκτίμηση της παραμέτρου Z (Σχήμα 5.20) μέσω της εφαρμογής της αντίστοιχης σχέσης, υπολογίζεται μέσω των αντίστοιχων εργαλείων σε περιβάλλον ArcGIS η κλίση της λεκάνης απορροής (%) (Σχήμα 5.19).

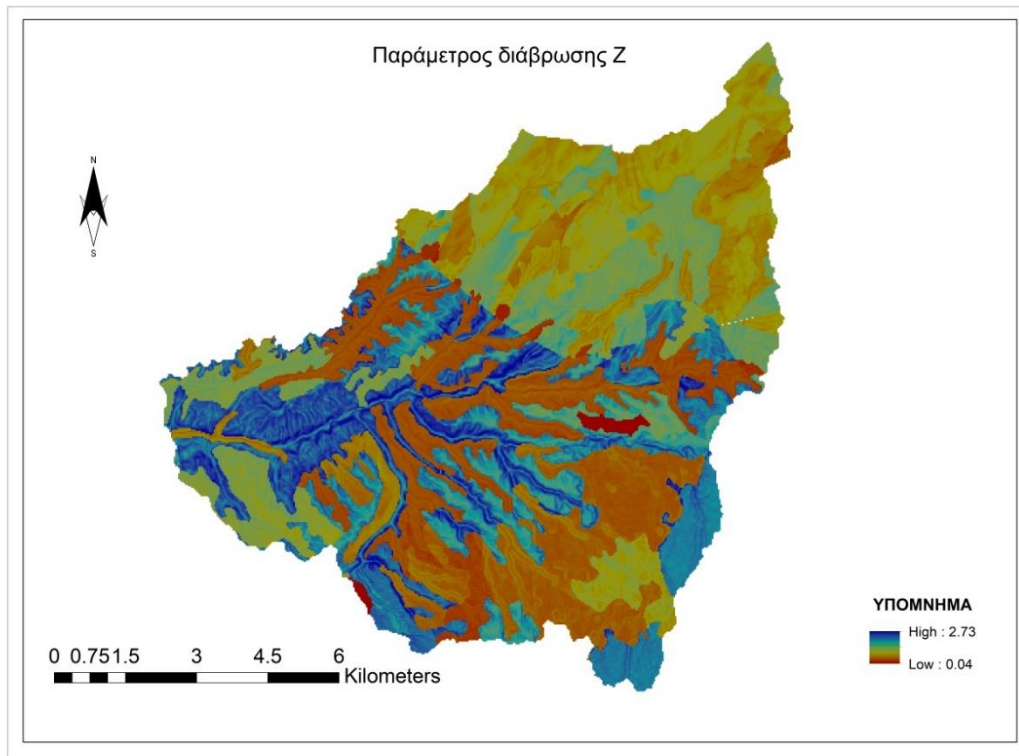




**Σχήμα 5.18:** Χωρική αναπαράσταση συντελεστή φ της μεθόδου Ganrilovic.



**Σχήμα 5.19:** Κλίση (%) της λεκάνης απορροής.



*Σχήμα 5.20: Χωρική αναπαράσταση παραμέτρου Z της μεθόδου Gavrilovic.*

## 5.3 Στερεοαπορροή

### 5.3.1 Συντελεστής Στερεοαπορροής SDR

Ο συντελεστής στερεοαπορροής (Sediment Delivery Ratio- SDR) αποτελεί το κλάσμα της διάβρωσης που καταλήγει σε στερεοαπορροή μέσω του υδρογραφικού δικτύου. Πρόκειται, δηλαδή, για τη διαφορά μεταξύ της παραγόμενης εδαφικής απώλειας και των ποσοτήτων που απολήγουν σε περιοχές εναπόθεσης.

$$SDR = \frac{S_Y}{A_S} \quad (5.22)$$

Όπου  $S_Y$  η συνολική ποσότητα της στερεοαπορροής σε t/ha/year, και  $A_S$  οι εδαφικές απώλειες σε t/ha/year.

Για την εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής χρησιμοποιούνται εμπειρικές εξισώσεις που συσχετίζουν το συντελεστή είτε με την έκταση, είτε με χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου. Από τους τύπους σχέσεων, πιο διαδεδομένες είναι αυτές, στις οποίες η μεταβολή του συντελεστή στερεοαπορροής σε σχέση με την έκταση της λεκάνης απορροής παρουσιάζει σημαντική στατιστική συσχέτιση, εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες, που εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά και ανομοιογένεια. Επίσης, οι σχέσεις συσχέτισης SDR-έκτασης χαρακτηρίζονται από απόλυτη ευκολία στην εφαρμογή, καθώς η

έκταση είναι το πιο κοινό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής (Βαχαβιώλος, 2014).

Σε ποτάμια συστήματα με λεκάνες απορροής από λίγα εκτάρια έως αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα, ο συντελεστής SDR έχει τιμές αρκετές δεκάδες %. Όσο αυξάνεται σε έκταση η λεκάνη απορροής, η τιμή του SDR μειώνεται, κάτι που εξηγείται από τον Boyce (1975), καθώς οι λεκάνες με μεγάλες κλίσεις είναι αυτές που προσφέρουν τη μεγαλύτερη ποσότητα της στερεοαπορροής (Boguslaw, 2018).

Με βάση δεδομένα στερεοαπορροής στην περιοχή του Blackland Prairies στο Τέξας των Η.Π.Α. από 14 λεκάνες απορροής με έκταση 1.1~252.3 km<sup>2</sup>, προέκυψε η παρακάτω σχέση εκτίμησης του SDR (Renfro, 1972):

$$\log SDR = 1.7935 - 0.14191 * \log A \quad (5.23)$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής σε km<sup>2</sup>.

Το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α. (USDA-SCS, 1979), αντλώντας δεδομένα από την ίδια περιοχή κατέληξε στη σχέση:

$$SDR = 0.51 * A^{-0.11} \quad (5.24)$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης σε τετραγωνικά μίλια (mi<sup>2</sup>).

Επιπρόσθετα, ο Vanoni το 1975, αναλύοντας δεδομένα στερεοαπορροής από 300 λεκάνες απορροής παγκοσμίως κατέληξε σε μία γενική μορφή της εξίσωσης (Vanoni, 1975):

$$SDR = 0.42 * A^{-0.125} \quad (5.25)$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης σε τετραγωνικά μίλια (mi<sup>2</sup>).

Μία άλλη σχέση δημιουργήθηκε από τον Boyce το 1975, κατά την οποία (Boyce, 1975):

$$SDR = 0.31 * A^{-0.3} \quad (5.26)$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης σε τετραγωνικά μίλια (mi<sup>2</sup>).

Τέλος, για τις Ευρωπαϊκές συνθήκες, με βάση δεδομένα από τη Βαυαρία, κατασκευάστηκε η εξής σχέση για την εκτίμηση του συντελεστή SDR (Maniak, 2010):

$$SDR = -0.02 + 0.385 * A^{-0.2} \quad (5.27)$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης σε τετραγωνικά μίλια (mi<sup>2</sup>).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίθηκε ως καταλληλότερη η σχέση του Renfro (1972), καθώς αναπτύχθηκε με βάση λεκάνες απορροής συγκεκριμένης έκτασης και κλιματικών συνθηκών, και η τιμή του συντελεστή στερεοαπορροής βρέθηκε ίση με 0.323.

### 5.3.2 Συντελεστής Κατακράτησης R

Δεδομένου του προβλήματος της στερεοαπορροής, η μέθοδος Gavrilovic εισάγει την έννοια του συντελεστή κατακράτησης (Retention Coefficient), με την ίδια λογική του συντελεστή στερεοαπορροής, όπως αυτός αναλύεται στο Κεφ. 5.3.1.

Για λεκάνες απορροής σχετικά μικρής έκτασης, συστήνεται η χρήση της σχέσης του Gavrilovic:

$$R_{Gavrilovic} = \frac{4 * \sqrt{O * D}}{L + 10} \quad (5.28)$$

Όπου  $O$  η περίμετρος της λεκάνης απορροής σε km,  $D$  η μέση υψομετρική απόσταση της λεκάνης απορροής σε km, και  $L$  το μήκος του κύριου υδατορεύματος που διατρέχει τη λεκάνη απορροής σε km.

Για λεκάνες απορροής μεγάλης έκτασης, συστήνεται η εφαρμογή της σχέσης του Zemljic (1971):

$$R_{Zemljic} = \frac{\sqrt{OD} * (L + L_i)}{A * (L + 10)} \quad (5.29)$$

Όπου  $O$  η περίμετρος της λεκάνης απορροής σε km,  $D$  η μέση υψομετρική απόσταση της λεκάνης απορροής σε km,  $L$  το μήκος του κύριου υδατορεύματος που διατρέχει τη λεκάνη απορροής σε km,  $L_i$  το συνολικό μήκος των παραποτάμων σε km, και  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής σε km<sup>2</sup>.

Η μέση υψομετρική απόσταση  $D$  ορίζεται από τη σχέση (Globevnik, 2003):

$$D = H_{mean} - H_{min} \quad (5.30)$$

Όπου  $H_{mean}$  το μέσο υψόμετρο της λεκάνης σε m και  $H_{min}$  το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης σε m.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο συντελεστής Κατακράτησης υπολογίστηκε ίσος με 0.1389.

### 5.3.3 Σχέση Κουτσογιάννη - Ταρλά

Οι Κουτσογιάννης και Ταρλά (1987), συλλέγοντας διαθέσιμα στοιχεία στερεοπαροχής στην Ελλάδα κατασκεύασαν μία εμπειρική εξίσωση, η οποία με βάση το γεωλογικό σχηματισμό και την υδρολογία της εκάστοτε λεκάνης απορροής εκτιμά τη μέση ετήσια στερεοαπορροή που παράγεται εντός της. Συγκεκριμένα, “εξετάστηκε η επίδραση των υδρολογικών, κλιματικών, τοπογραφικών και γεωλογικών παραμέτρων στην ποσότητα φερτών υλικών” και κατέληξαν ότι οι μόνες παράμετροι που επηρεάζουν την στερεοαπορροή είναι η βροχόπτωση, η απορροή και η γεωλογία της λεκάνης.

Για να υιοθετηθεί μία και μόνο αντιπροσωπευτική παράμετρος της γεωλογίας της λεκάνης, θεωρώντας ότι σε μία υδρολογική λεκάνη συμβάλλουν διαφορετικά πετρώματα, κατηγοριοποιούν του γεωλογικούς σχηματισμούς σε τρεις κατηγορίες, με βάση τη διαβρωσιμότητά τους από το νερό (Πίνακας 5.14) και εν τέλει βρίσκουν έναν τελικό μέσο δείκτη  $\gamma$  για το μέτρο της διαβρωσιμότητας ολόκληρης της λεκάνης απορροής:

$$\gamma = \kappa_1 * p_1 + \kappa_2 * p_2 + \kappa_3 * p_3 \quad (5.31)$$

Όπου  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  οι συντελεστές διαβρωσιμότητας και  $p_1, p_2, p_3$  οι αντίστοιχες αναλογίες της έκτασης ανά κατηγορία πετρώματος.

**Πίνακας 5.14:** Κατηγοριοποίηση γεωλογικών σχηματισμών, με βάση τη διαβρωσιμότητά τους (Κουτσογιάννης & Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, 1987).

Κατηγοριοποίηση	Γεωλογικοί σχηματισμοί	$\kappa_1$
Υψηλή διαβρωσιμότητα	Αλλούβια, φλύσχης	1
Μέτρια διαβρωσιμότητα	Μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι	0.5
Χαμηλή διαβρωσιμότητα	Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκρηξιγενή	0.1

Έτσι εξήγαγαν την σχέση:

$$G = 15 * \gamma * e^{3*P} \quad (5.32)$$

Όπου  $G$  η μέση ετήσια στερεοαπορροή σε αιώρηση σε  $t/km^2$ ,  $\gamma$  ο γεωλογικός συντελεστής λεκάνης όπως προέκυψε από τα παραπάνω και  $P$  το μέσο ετήσιο ύψος βροχής σε m.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη σχέση δε λαμβάνει καθόλου υπόψη της τον τοπογραφικό παράγοντα, η συνεισφορά του οποίου είναι ιδιαίτερης σημασίας, ειδικά σε ορεινές λεκάνες, όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, το μέγεθος  $G$  αποτελεί κατά βάση φορτίο φερτών σε αιώρηση. Σε περίπτωση ορεινής λεκάνης, προτείνεται ένα ποσοστό προσαύξησης της τάξης του 50%, ώστε να περιληφθούν και τα φερτά που μεταφέρονται σε σύρση (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριασίου πεδίου, 2001).

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Υδρολογική Ανάλυση

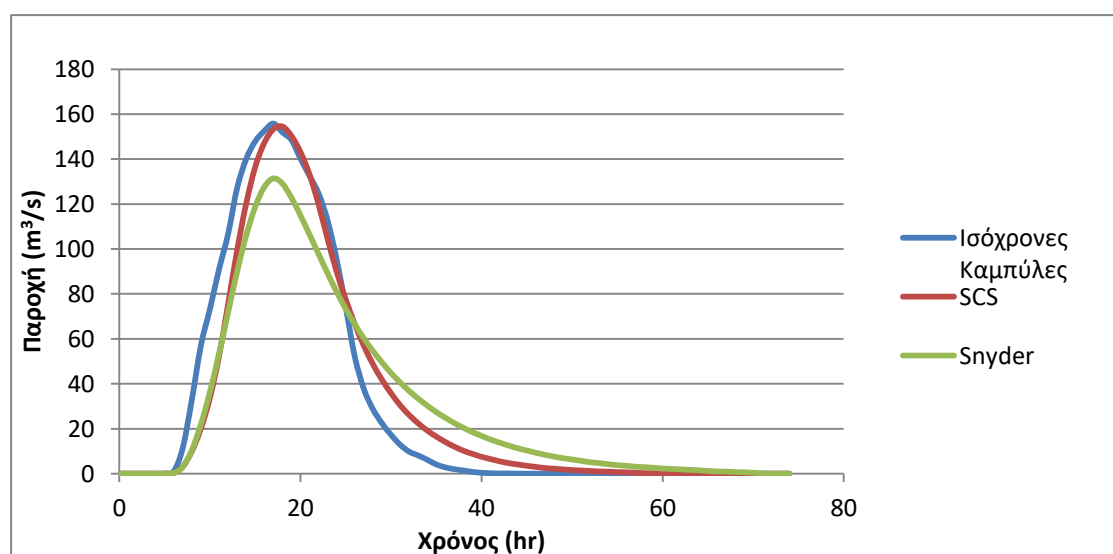
Με βάση τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο Κεφ. 4, καταρτίστηκαν τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η παροχή αιχμής και ο χρόνος στον οποίο εμφανίζεται η αιχμή, σύμφωνα με τις μεθόδους: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder, Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά SCS και Μοναδιαίο Υδρογράφημα μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών.

**Πίνακας 6.1:** Παροχή και χρόνος αιχμής πλημμυρογραφήματος, ανάλογα με την κάθε μέθοδο.

Μέθοδος	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	Χρόνος αιχμής
Ισόχρονες Καμπύλες	155.8	17:00
SCS	154.5	18:00
Snyder	131.4	17:00

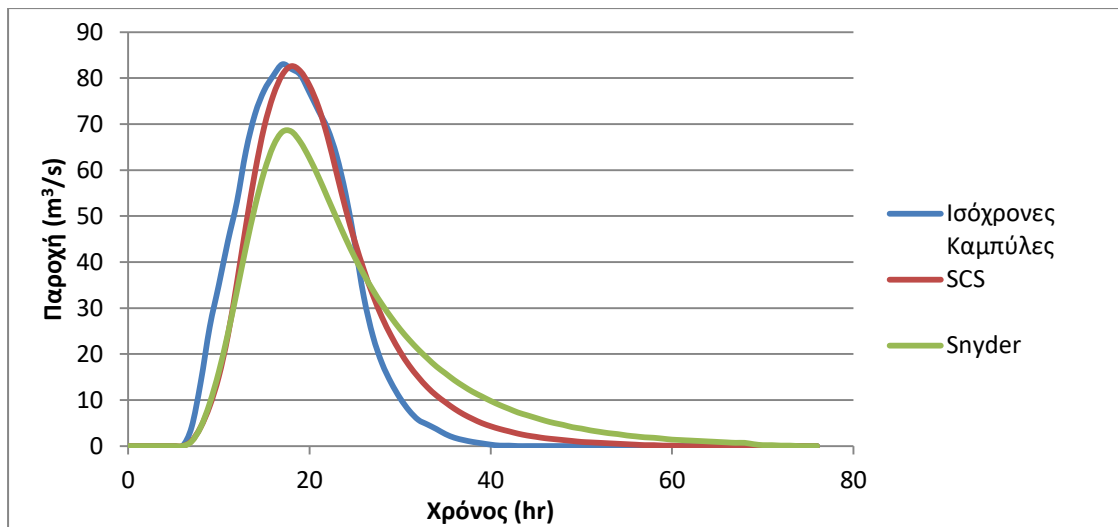
Παρατηρείται ότι το πλημμυρογράφημα εμφανίζει αιχμή στις 16 ώρες μετά την έναρξη του επεισοδίου σύμφωνα με το Συνθετικό ΜΥ κατά Snyder και το ΜΥ μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών, ενώ στις 17 ώρες σύμφωνα με το Αδιάστατο ΜΥ κατά SCS.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται γραφικά το πλημμυρογράφημα εξόδου της λεκάνης απορροής για βροχόπτωση διάρκειας 12 ωρών, και για κανονικές συνθήκες υγρασίας, όπου όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 4.3 ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι ίσος με 80, μετά από την εφαρμογή και των τριών μεθόδων.



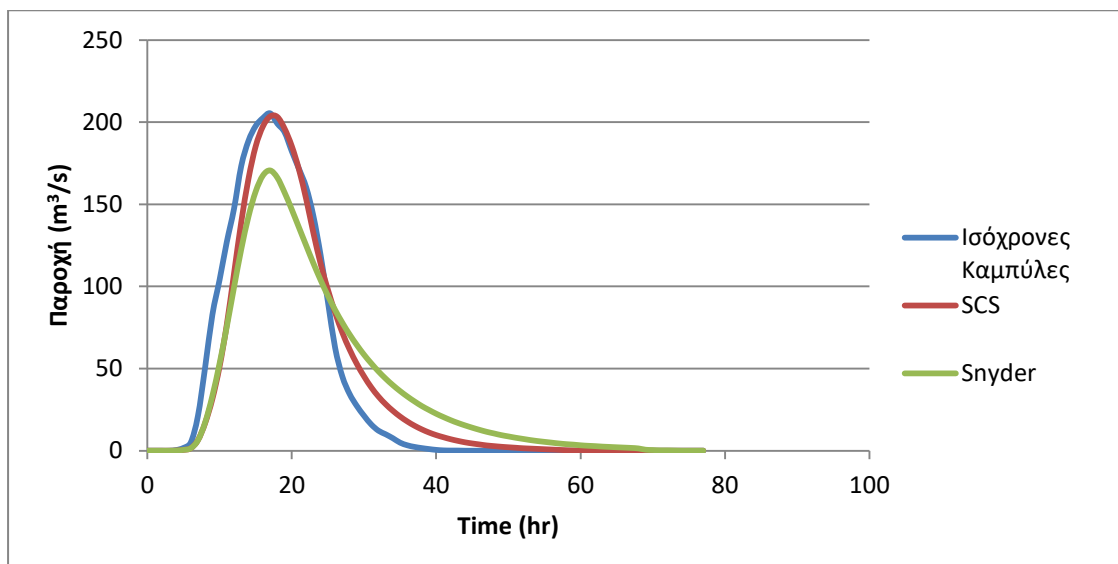
**Σχήμα 6.1:** Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για  $CN_{II}=80$ .

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται γραφικά το πλημμυρογράφημα εξόδου της λεκάνης απορροής για βροχόπτωση διάρκειας 12 ωρών, και για ξηρές συνθήκες υγρασίας, όπου όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 4.3 ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι ίσος με 62.70, μετά από την εφαρμογή και των τριών μεθόδων.



**Σχήμα 6.2:** Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για  $CN_{II}=60.70$ .

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται γραφικά το πλημμυρογράφημα εξόδου της λεκάνης απορροής για βροχόπτωση διάρκειας 12 ωρών, και για υγρές συνθήκες, όπου όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 4.3 ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι ίσος με 90.2, μετά από την εφαρμογή και των τριών μεθόδων.



**Σχήμα 6.3:** Πλημμυρογραφήματα ανά μέθοδο, στο σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για  $CN_{III}=90.20$ .

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η παροχή αιχμής είναι της τάξεως των 150  $m^3/s$  για κανονικές συνθήκες υγρασίας, της τάξεως των 80  $m^3/s$  για ξηρές συνθήκες

και της τάξεως των  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  για υγρές συνθήκες, όπως αναλύθηκε η κάθε κατηγορία στο Κεφ. 4.3. Όπως ήταν αναμενόμενο, μεγαλύτερη παροχή αιχμής προκύπτει από τις υγρές συνθήκες, αφού το έδαφος είναι σαφώς κορεσμένο και το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης μετατρέπεται αμέσως σε επιφανειακή απορροή. Αντίθετα, στις ξηρές συνθήκες, στην αρχή του επεισοδίου το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης απορροφάται στην αρχή από το έδαφος, και στη συνέχεια όσο αυτό τείνει προς τον κορεσμό, τόσο αρχίζει να αυξάνεται η επιφανειακή απορροή.

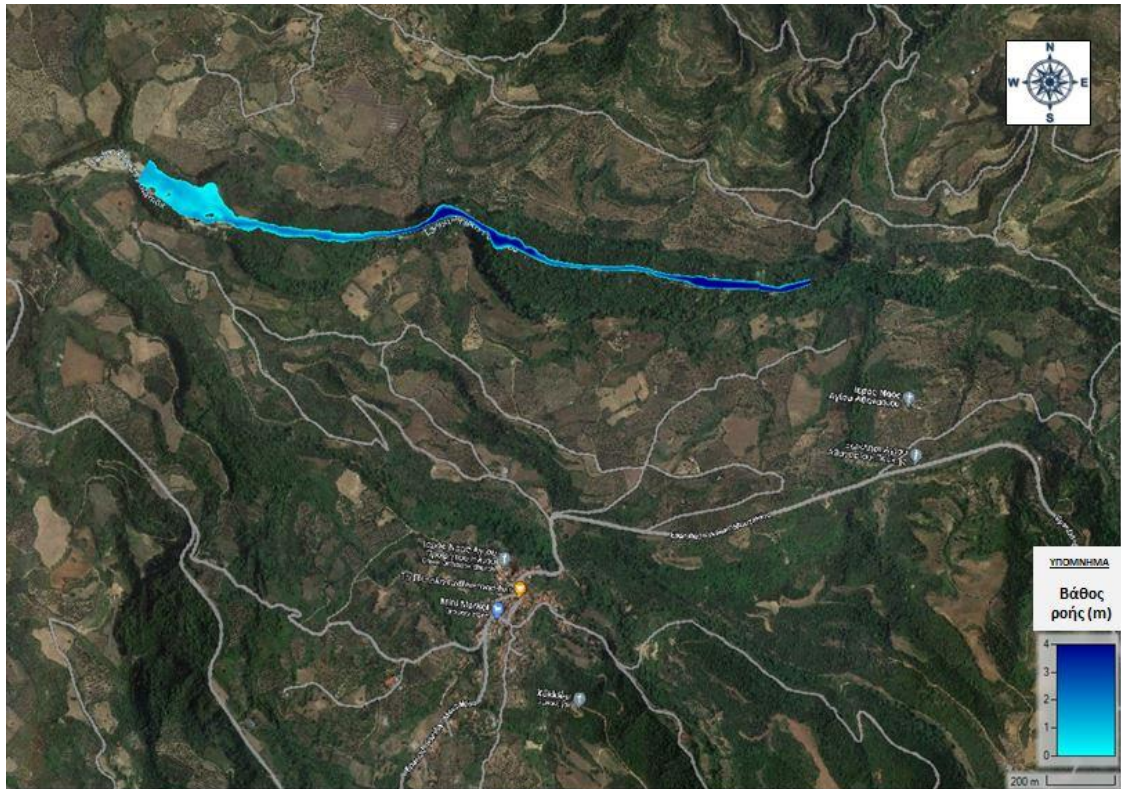
## 6.2. Υδραυλική Προσομοίωση

Η υδραυλική προσομοίωση ξεκινάει κατάντη του σημείου εξόδου της λεκάνης. Στα Σχήματα 6.4 και 6.5 παρουσιάζονται τα μέγιστα βάθη και οι μέγιστες ταχύτητες ροής, καθώς και το πεδίο κατάκλισης. Γενικά συστήνεται η υδραυλική προσομοίωση να εμπεριέχει και αστικές ή ημι-αστικές περιοχές, προκειμένου να μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός της πλημμύρας και να ληφθούν τα απαραίτητα αντιπλημμυρικά μέτρα, για να προστατευτεί η δημόσια υγεία.

Η περιοχή κατάντη της λεκάνης απορροής που μελετήθηκε, σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60, δεδομένου ότι δεν αποτελεί κατοικημένη περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ως μικρής σημασίας. Και όπως φαίνεται και στα παρακάτω Σχήματα, το πεδίο κατάκλισης είναι μικρό, αν και τόσο τα βάθη ροής, όσο και οι ταχύτητες ροής είναι αρκετά αυξημένα.

Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι τα μέγιστα βάθη ροής (έως και 4 m) εμφανίζονται εντός της κοίτης των υδατορευμάτων, χωρίς πιθανότητα πλημμύρας των όμορων περιοχών, ενώ αναφορικά με τις ταχύτητες ροής, παρατηρούνται πολύ μεγάλες ταχύτητες (της τάξεως των  $5 \text{ m/s}$ ) στην είσοδο του πεδίου κατάκλισης και κατά μήκος του υδατορεύματος.





**Σχήμα 6.4:** Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας.



**Σχήμα 6.5:** Μέγιστες ταχύτητες ροής εντός πεδίου πλημμύρας.

### 6.3. Στερεομεταφορά

Όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 5, η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής, πρόκειται για ένα αρκετά πολυδιάστατο πρόβλημα, καθώς η ορθή επιλογή μεθόδου και παραμέτρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του μελετητή. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πάρα πολλές σχέσεις για όλους τους κλιματικούς και γεωλογικούς παράγοντες που απαιτούνται για τα μοντέλα. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων RUSLE, Gavrilovic αλλά και της σχέσης Κουτσογιάννη-Ταρλά, όπως προέκυψαν μετά από επεξεργασία των δεδομένων.

Κατ' αρχάς, για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με εφαρμογή του μοντέλου RUSLE, στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα με δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης  $R$ , τη μέθοδο του τροποποιημένου δείκτη Fournier και την εξίσωση που κατασκεύασε ο Φλαμπούρης το 2008 της μορφής  $R = a * P$ .

**Πίνακας 6.2:** Εδαφική Διάβρωση με διαφορετικούς συντελεστές  $R$ .

Μέθοδος εκτίμησης συντελεστή $R$	Εδαφική Διάβρωση (t/ha/year)
Τροποποιημένος δείκτης Fournier (MFI)	29.98
Φλαμπούρης (2008)	4.37

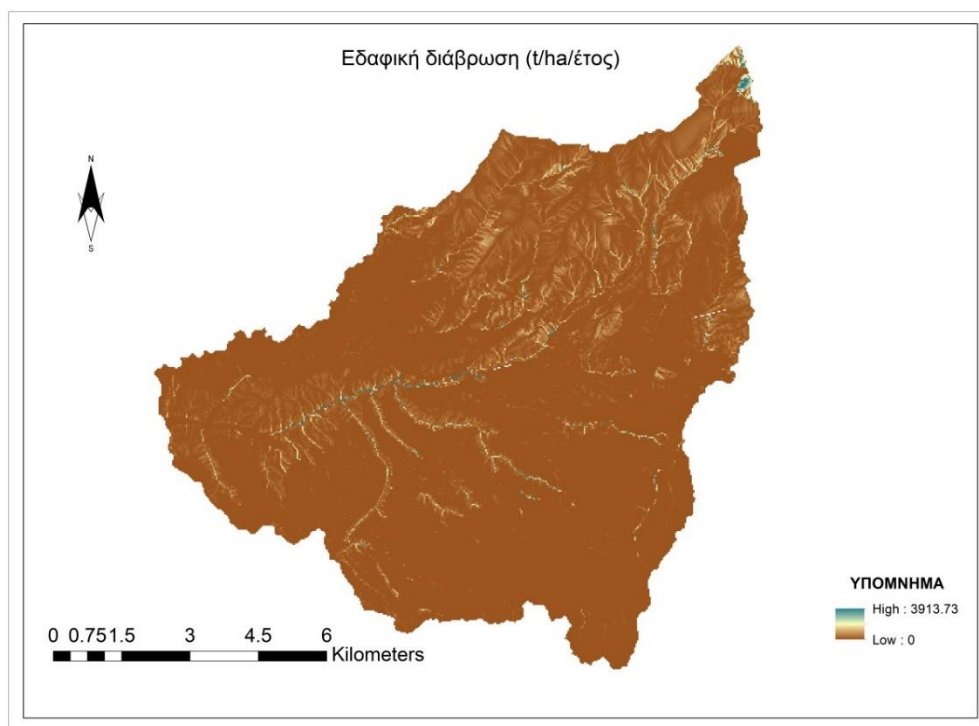
Παρατηρείται πολύ μεγάλη απόκλιση της τελικής εδαφικής διάβρωσης ανά μονάδα επιφάνειας, πράγμα που, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ. 5.1, αποδίδεται στην μη ορθή χρήση της εξίσωσης του Φλαμπούρη, για μία λεκάνη απορροής που βρίσκεται αρκετά μακριά χωρικά από το σημείο που έγιναν οι μετρήσεις για την κατασκευή της εξίσωσης. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει και η διαφορά του υψομέτρου. Η παράθεση των αποτελεσμάτων γίνεται για λόγους πληρότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα εφαρμογής των δύο διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό του συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης  $LS$ . Στον Πίνακα 6.3, παρουσιάζεται η εδαφική διάβρωση με βάση τις μεθόδους Moore and Burch(1986) και Mitasova and Mitas(2001) και μπορεί να θεωρηθεί ότι τα αποτελέσματα είναι της ίδιας τάξεως.

**Πίνακας 6.3:** Εδαφική Διάβρωση με διαφορετικούς συντελεστές  $LS$ .

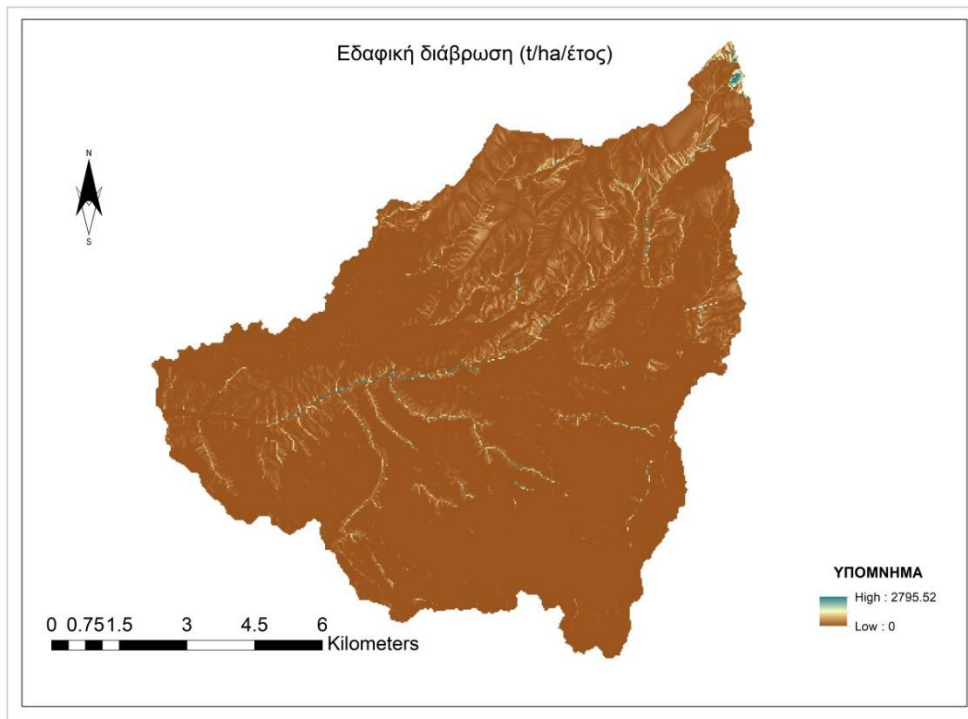
Μέθοδος εκτίμησης συντελεστή $LS$	Εδαφική Διάβρωση (t/ha/year)
Mitasova και Mitas (2001)	29.98
Moore και Burch (1986)	21.41

Στα Σχήματα 6.6 και 6.7 φαίνεται ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης σε όλη την έκταση της λεκάνης, μέσω του μοντέλου RUSLE. Στο Σχήμα 6.6, ο συντελεστής  $LS$  έχει προκύψει από τη σχέση Mitasova and Mitas (2001), και ο συντελεστής  $R$  από τη

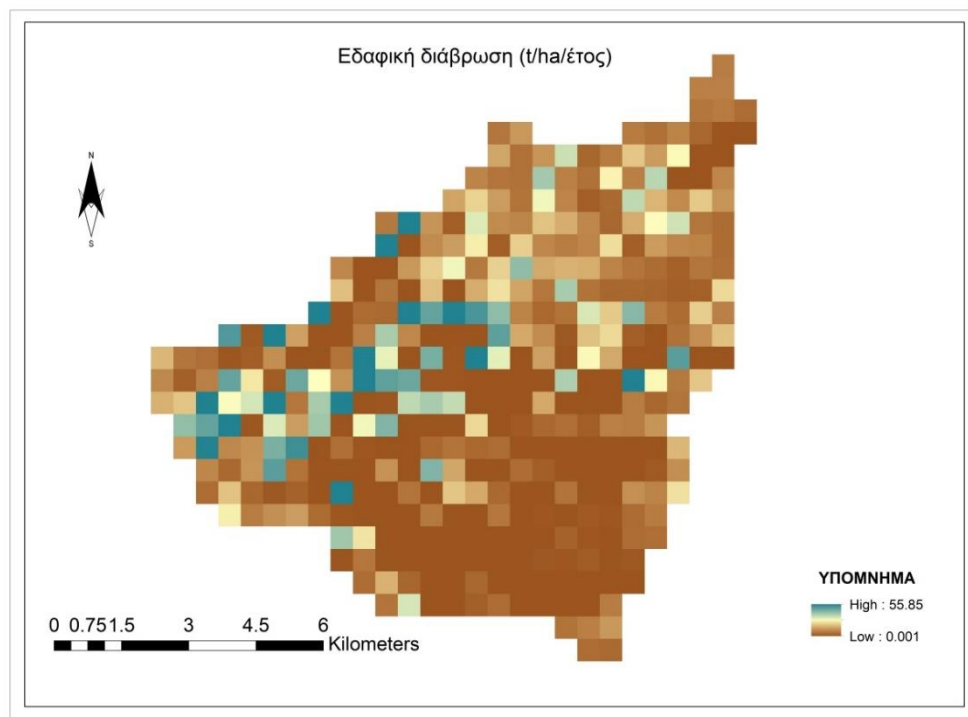
μέθοδο του τροποποιημένου δείκτη Fournier. Στο Σχήμα 6.7 ο συντελεστής LS έχει προκύψει από τη σχέση Moore and Burch (1986) και ο συντελεστής R από τη μέθοδο του τροποποιημένου δείκτη Fournier. Στη συνέχεια, με βάση τα δεδομένα από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πληροφοριών Εδάφους (European Soil Data Centre- ESDAC), προκύπτει ότι η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση ισούται με 5.9 t/ha/year, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η απόκλιση αυτής της μεθόδου, σε σχέση με τις προηγούμενες, σε ένα βαθμό αποδίδεται στη διαφορά της ακρίβειας των χαρτών. Συγκεκριμένα, οι χάρτες του ESDAC έχουν ανάλυση 100 m x 100 m και 500 m x 500 m, ενώ οι προηγούμενοι χάρτες έχουν ανάλυση 30 m x 30 m.



**Σχήμα 6.6:** Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (LS-Mitasova and Mitas (2001), R-MFI).



**Σχήμα 6.7:** Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (LS- Moore and Burch (1986) R-MFI).



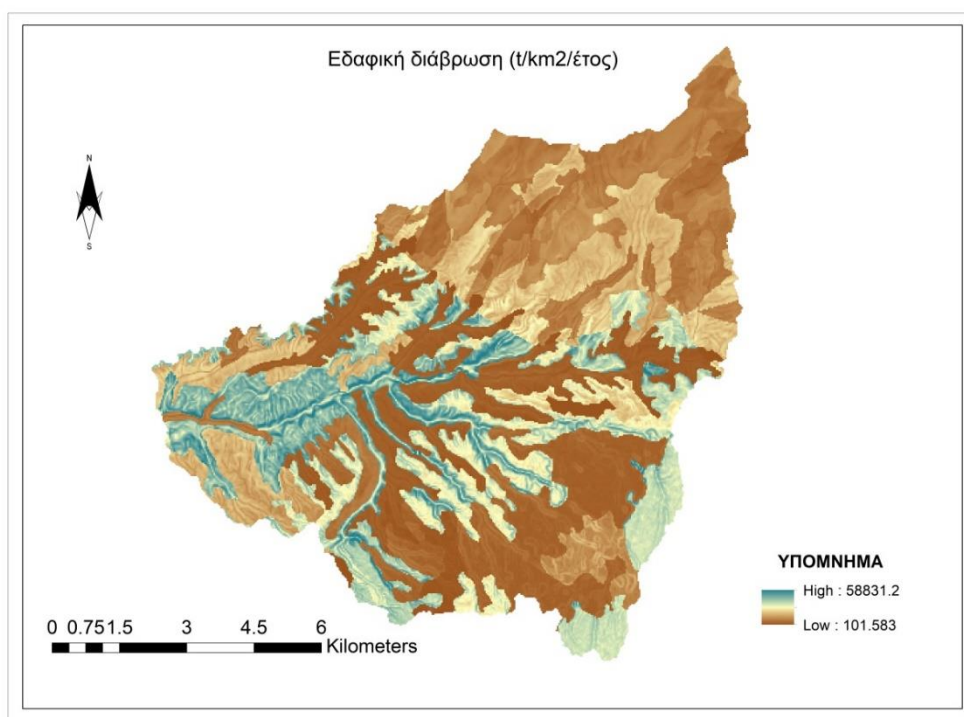
**Σχήμα 6.8:** Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση το μοντέλο RUSLE (ESDAC).

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μοντέλου RUSLE τόσο με τη μέθοδο των Mitasova και Mitas (2001), όσο και με τη μέθοδο των Moore και Burch (1986), ήτοι 29.98 t/ha/year και 21.41 t/ha/year είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα που

προέκυψαν από την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με το μοντέλο RUSLE για τη λεκάνη απορροής ανάντη του Φράγματος του Πηνειού Ηλείας των Derountis et. Al (2018), η τελική εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης των οποίων ήταν 23.39 t/ha/year (Derountis, Vidali, Kavoura, & Sabatakakis, 2018).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης με βάση το μοντέλο Gavrilovic, όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 5.2 (Σχήμα 6.9). Η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση εκτιμάται ίση με 14551.15 t/km<sup>2</sup>/year. Παρατηρείται ότι η εδαφική διάβρωση της μεθόδου Gavrilovic εκτιμάται αυξημένη κατά 4 φορές σε σχέση με αυτή που εκτιμάται από το μοντέλο RUSLE.

Αναφορικά με τη στερεοαπορροή, ο συντελεστής στερεοαπορροής SDR για την εκτίμηση της συνολικής στερεοαπορροής μέσω της εδαφικής διάβρωσης του μοντέλου RUSLE, υπολογίστηκε με βάση τις σχέσεις που αναλύονται στο Κεφ. 5.3.1. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.4.



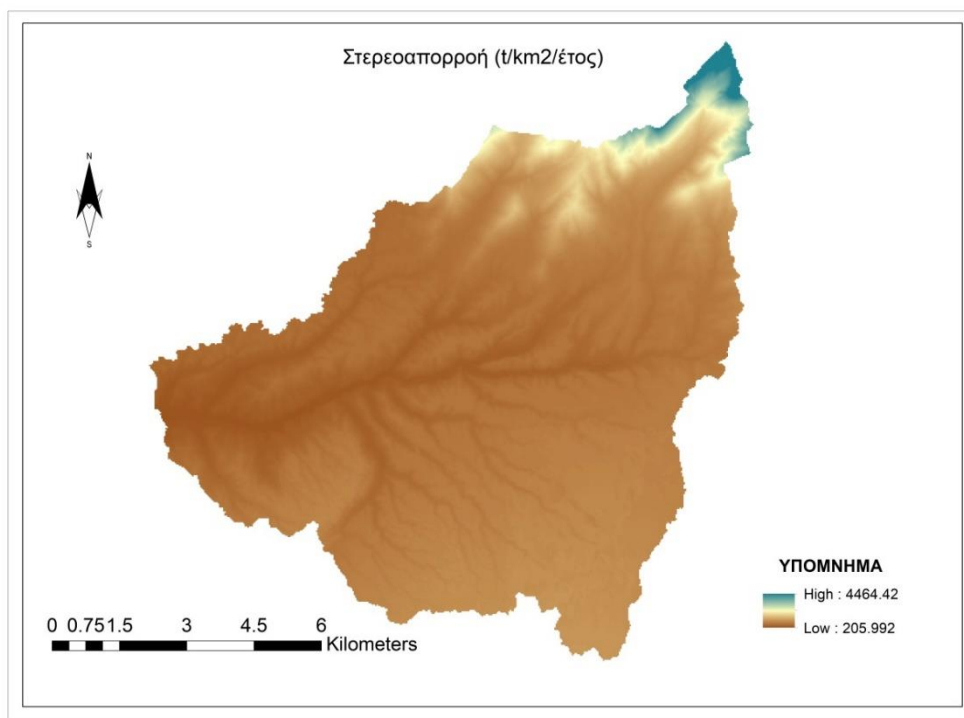
**Σχήμα 6.9:** Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, με βάση τη μέθοδο Gavrilovic.

**Πίνακας 6.4:** Συντελεστής SDR, με βάση σχέσεις από τη βιβλιογραφία και στερεοαπορροή, βάσει του μοντέλου RUSLE.

Μέθοδος εκτίμησης	SDR (%)	Στερεοαπορροή (t/year)
Renfro (1975)	32.3	97180.13
Vanoni (1975)	26.58	79970.53
Boyce (1975)	10.23	30778.72

USDA SCS (1979)	30.7	92366.26
Maniak (2010)	13.3	40015.35

Όμοια λογική ακολουθεί και ο συντελεστής κατακράτησης R, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της στερεοαπορροής μέσω της εδαφικής διάβρωσης που προέκυψε από τη μέθοδο Gavrilovic. Λόγω της μεγάλης έκτασης της λεκάνης, προτιμάται η χρήση της σχέσης του Zemljic (1971), μέσω της οποίας ο συντελεστής κατακράτησης R βρίσκεται ίσος με 0.1389, και επακόλουθα η στερεοαπορροή της λεκάνης απορροής μέσω της μεθόδου Gavrilovic, εκτιμάται ίση με 215241.10 t/year. Τέλος, εφαρμόζοντας τη σχέση Κουτσογιάννη- Ταρλά, τόσο σε επίπεδο άμεσου υπολογισμού, όσο και σε χωρικό επίπεδο μέσω του περιβάλλοντος ARCGIS, παρατηρήθηκε σχετικά καλή εκτίμηση της στερεοαπορροής, λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση των συγγραφέων για προσαύξηση 50% της τελικής στερεοαπορροής για ορεινές λεκάνες. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.10 αναπαριστάται ο χάρτης της στερεοαπορροής με βάση τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά, και στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 6.10:** Χωρική αναπαράσταση στερεοαπορροής, σύμφωνα με τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά.

**Πίνακας 6.5:** Σύγκριση άμεσης και χωρικής μεθόδου υπολογισμού της στερεοαπορροής, με βάση τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά.

Μέθοδος	Στερεοαπορροή (t/year)
Άμεσος υπολογισμός	49109.07

Χωρικός υπολογισμός (ArcGIS)	61805.24
---------------------------------	----------

Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα αποτελέσματα της χωρικής ανάλυσης κρίνονται πιο αξιόπιστα, καθώς λαμβάνουν υπόψη το καθεστώς βροχόπτωσης σε κάθε υποπεριοχή της λεκάνης, και δε γίνεται η παραδοχή πως σε όλη τη λεκάνη απορροής η τιμή του μέσου ετήσιου ύψους βροχής P παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται, όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 5.1.1. Λαμβάνοντας υπόψη και την προσαύξηση 50% που προτείνεται από τους Κουτσογιάννη–Ταρλά, για να συμπεριληφθεί και το φορτίο σύρσης σε ορεινές λεκάνες, η τελική στερεοαπορροή εκτιμάται ίση με 92707.86 τόνοι/έτος. Συμπερασματικά, στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζεται συνοπτικά η στερεοαπορροή ολόκληρης της λεκάνης, με βάση και τις τρεις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

**Πίνακας 6.6:** Στερεοαπορροή, με βάση και τις τρεις μεθόδους εκτίμησης.

Μέθοδος Εκτίμησης	Στερεοαπορροή (t/year)
RUSLE	97180.1
EPM	215241.1
Κουτσογιάννη-Ταρλά	92707.8

Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης, η διαφορά των τριών μεθόδων σε μορφή ποσοστών ως προς την εκτίμηση της στερεοαπορροής.

**Πίνακας 6.7:** Ποσοστιαία διαφορά στερεοαπορροής ανά μοντέλο εκτίμησης.

Σύγκριση Μεθόδων	Διαφορά (%)
RUSLE - EPM	55
RUSLE - Κουτσογιάννη- Ταρλά	4.8
EPM - Κουτσογιάννη- Ταρλά	57

Η μέθοδος RUSLE αναπτύχθηκε με βάση δεδομένα από καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οπότε υποεκτιμά την τελική στερεοαπορροή σε ορεινές λεκάνες, όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επιπρόσθετα, η σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά, όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 5.3.3 δε λαμβάνει υπόψη τοπογραφικούς παράγοντες της λεκάνης απορροής, όπως το υψόμετρο και την κλίση της λεκάνης, οπότε είναι εύλογο τα αποτελέσματα να υποεκτιμούν την τελική στερεοαπορροή, αν και με την προσαύξηση που προτείνουν οι συγγραφείς η τελική στερεοαπορροή εκτιμάται σε ένα καλό βαθμό.

## **7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **7.1 Σύνοψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής της υδρολογικής λεκάνης ανάντη της Αγίας Άννας στη Ηλεία. Με την ολοκλήρωσή της και παρατηρώντας τα αποτελέσματα της κάθε ενότητας ξεχωριστά, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα τόσο για την περιοχή μελέτης, όσο και ευρύτερα για τον τρόπο προσέγγισης αντίστοιχων υδρολογικών ζητημάτων.

### **7.2 Γενικά Συμπεράσματα**

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, τα συμπεράσματα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα και πολύπλευρα. Κατ' αρχάς, η εδαφική διάβρωση μίας λεκάνης απορροής, αλλά και η τάξη μεγέθους της, εξαρτάται αρχικά από τη γεωλογία του εδάφους και από τις χρήσεις γης. Εάν μία υδρολογική λεκάνη απαρτίζεται από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως ο φλύσχης στην παρούσα εργασία, είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο τμήμα της βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, καθώς η κατακράτηση του βρόχινου νερού από το έδαφος είναι περιορισμένη. Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο παίζει και η κοκκομετρική σύσταση του ανώτερου γεωλογικού σχηματισμού, δηλαδή ο βαθμός διάσπασης των κόκκων του ανώτερου στρώματος του εδάφους, που σε συνδυασμό με την αυξημένη απορροή, συντελούν στην αυξημένη δυνατότητα διάβρωσης του εδάφους.

Σημαντικό ρόλο, επιτελούν και οι χρήσεις γης. Σε εκτάσεις που έχουν καεί, σχετικά πρόσφατα, όπως και μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής που εξετάζεται σε αυτή την εργασία, αλλάζει ο συντελεστής χρήσης γης. Με όρους φυσικής σημασίας, η έλλειψη χλωρίδας και η επακόλουθη μη-κατακράτηση και φραγή της πλημμυρικής απορροής, μαζί με τα φερτά που αυτή μεταφέρει, οδηγούν σε προβλήματα στο όμορο περιβάλλον, πολλώ δε μάλλον, όταν αφορά ημι-αστικές περιοχές, οικισμούς σε μεγάλα υψόμετρα. Μία πλημμυρική ροή με μεγάλες ποσότητες στερεών μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στο οδικό δίκτυο, αλλά και στις ανθρώπινες δραστηριότητες των τοπικών κοινωνιών.

Επιπρόσθετα, σε όρους εκτίμησης της στερεοαπορροής σε μία λεκάνη, πρέπει να αναφερθεί η δυσκολία επιλογής των κατάλληλων σχέσεων και ανάγνωσης των σωστών δεδομένων, καθώς έχουν γίνει μετρήσεις στερεοαπορροής και εδαφικής διάβρωσης σε πολύ λίγες υδρολογικές λεκάνες στην Ελλάδα. Συνεπώς, η σύγκριση της τάξης μεγέθους της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής, τις περισσότερες φορές, δεν μπορεί να επιτευχθεί σε πρακτικό επίπεδο, παρά μόνο σε θεωρητικό.

Αναφορικά με τη γεωμορφολογική και την υδρολογική ανάλυση, έχει μεγάλη σημασία η ορθή κατανόηση των αποτελεσμάτων της γεωμορφολογικής ανάλυσης



που προκύπτουν από το περιβάλλον ArcGIS και η σύγκρισή τους με την πραγματικότητα. Για την ορθή εξαγωγή του πλημμυρογραφήματος, πρέπει το υδρογραφικό δίκτυο που εισάγεται να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και να μπορούν να διακριθούν και να διορθωθούν πιθανά λάθος αποτελέσματα. (π.χ. αδυναμία του προγράμματος ArcGIS να παράξει ορθά υδρογραφικά δίκτυα σε οροπέδια ή περιοχές με σχεδόν μηδενικές κλίσεις-πεδιάδες).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως είναι ιδιάζουσας σημασίας η υδρολογική λεκάνη που θα επιλεγεί να μελετηθεί και το σημείο εξόδου της. Μπορεί, δηλαδή, η παροχή αιχμής να προκύπτει μεγάλης τάξεως, αλλά το σημείο εξόδου της να μην βρίσκεται κοντά σε οικισμούς και ο πλημμυρικός κίνδυνος να είναι περιορισμένος, όπως φαίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Την ίδια στιγμή, όμως, μπορεί η συνολική στερεοαπορροή της λεκάνης να είναι αρκετά μεγάλης τάξεως. Οπότε, είναι απαραίτητο η εκάστοτε λεκάνη απορροής να μελετάται με κριτική ματιά και με βάση το ιστορικό πλημμυρών και καταστροφών λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων.

### **7.3 Ειδικά Συμπεράσματα**

Η παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος εξόδου προκύπτει με βάση και τις τρεις μεθόδους που αναλύθηκαν να είναι της τάξεως των  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής αντιστοιχεί σε 16 ώρες μετά την έναρξη του επεισοδίου. Ο χρόνος θεωρείται λογικός, καθώς πρόκειται για μία λεκάνη μεγάλης έκτασης, με μεγάλες κλίσεις στα ορεινά και μικρότερες στα μέρη της λεκάνης που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο εξόδου της.

Με βάση την υδραυλική προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS, προκύπτει ο ρους του Πηνειού ποταμού, με μέγιστο βάθος έως και τέσσερα μέτρα σε κάποια τμήματα, με σχετικά μικρό πεδίο κατάκλισης, πράγμα αναμενόμενο, καθώς εκατέρωθεν των κοιτών του ποταμού, οι κλίσεις των γειτονικών λόφων, δεν επιτρέπουν την υπερχειλίση του ποταμού. Η μέγιστη ταχύτητα ροής αγγίζει τα  $5 \text{ m/s}$  και παρατηρείται τμηματικά κατά μήκος του ποταμού.

Παρατηρείται, επίσης, με βάση του τελικούς χάρτες εδαφικής διάβρωσης, πως η περισσότερη διάβρωση υφίσταται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και στις περιοχές με τις μεγαλύτερες κλίσεις, πράγμα που δείχνει την ιδιαίτερη σημασία της τοπογραφίας μίας υδρολογικής λεκάνης. Η εδαφική διάβρωση εκτιμάται ίση με  $29.98 \text{ τόνοι/ha/έτος}$  σύμφωνα με το μοντέλο RUSLE και ίση με  $15551.15 \text{ τόνοι/km}^2/\text{έτος}$  σύμφωνα με τη μέθοδο Gavrilovic. Η τελική στερεοαπορροή με βάση το μοντέλο RUSLE, προκύπτει ίση με  $97180.13 \text{ τόνοι/έτος}$ , με βάση τη μέθοδο Gavrilovic  $215241.1 \text{ τόνοι/έτος}$ , και με βάση τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά  $92707.86 \text{ τόνοι/έτος}$ . Παρατηρείται, δηλαδή, ότι η στερεοαπορροή της μεθόδου Gavrilovic είναι αυξημένη κατά 55% σε σχέση με αυτή που προκύπτει από το μοντέλο RUSLE και κατά 57% σε σχέση με αυτή που προκύπτει από τη σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά. Τέλος, η τελευταία εκτιμά συνολική στερεοαπορροή μειωμένη κατά 4.8% σε σχέση με αυτή του μοντέλου RUSLE.

## 7.4 Μελλοντικές Προτάσεις

Η Ηλεία πρόκειται για μία περιοχή, που κάθε χρόνο πλήγεται από πλημμυρικά επεισόδια και επεισόδια κατολισθήσεων και στερεομεταφοράς. Η επιστήμη, ειδικά όταν εργάζεται για το όφελος της κοινωνίας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, πάντα μπορεί να συμβάλλει με τη μελέτη στη διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων και τρόπων προσέγγισης των ζητημάτων. Κάποιες μελλοντικές προτάσεις είναι οι εξής:

- Διερεύνηση των αιτιών και της επίδρασης των φαινομένων λασπορροών στη λεκάνη απορροής του Πηνειού.
- Διερεύνηση της επίδρασης των πυρκαγιών στη διαβρωσιμότητα του εδάφους.
- Διερεύνηση της επίδρασης του ανέμου στην εδαφική διάβρωση, καθώς η Ηλεία είναι μία περιοχή που κάθε χρόνο πλήττεται από ανεμοστρόβιλους.
- Εξέταση της συνολικής στερεοαπορροής που καταλήγει μέσω του Πηνειού ποταμού και των παραποτάμων του στο Φράγμα Πηνειού και τρόποι συγκράτησης και εναπόθεσης των φερτών.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Διεθνής Βιβλιογραφία

- Blinkov, I., & Konstadinov, S. (2010). *Applicability of various Erosion Risk Assessment Methods for Engineering Purposes*. Ohrid, North Macedonia: BALWOIS 2010 Conference.
- Boguslaw, M. (2018). Determination of sediment delivery ratio in draining systems. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*.
- Boyce, R. (1975). *Sediment routing with sediment- delivery ratios. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. U.S.Dep.Agriculture.
- Castrignanù, A., Buttafaco, G., Zucca, C., & Madran, S. (2005). Assessing spatial uncertainty of soil erodibility using joint stochastic simulation.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Depountis, N., Vidali, M., Kavoura, K., & Sabatakakis, N. (2018). Soil erosion prediction at the water reservoir's basin of Pineios dam, Western Greece, using the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE) and GIS. *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT*.
- Di Stefano, C., Ferro, V., & Porto, P. (2000). Length slope factors for applying the Revised Universal Soil Loss Equation at basin scale in Southern Italy.
- Diakakis, M. N. (2017, August). Observational evidence on the effects of mega-fires on the frequency of hydrogeomorphic hazards. The case of the Peloponnese fires of 2007 in Greece. *Science Direct*, σσ. 262-276.
- Diakakis, M., Nikolopoulos, E., Vassilakis, E., & Korakaki E. (2017). Observational evidence on the effects of mega-fires on the frequency of hydrogeomorphic hazards. *ScienceDirect*.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., & Karavitis, C. (2017). Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrological Sciences Journal*.
- European Commission, J. R. (n.d.). *European Soil Data Centre (ESDAC)*. Ανάκτηση από [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu)
- Ferro, V., Giordano, G., & Iovino, M. (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal*.
- Gavrilović, S. (1962). Proracim srednje goclisnje kolicine nanosa prema potencijalu erozije (Serbian). Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- Gavrilović, S. (1970). *Savremeni nacini proracunanvanja bujicnih nanosa i izrada karata erozije (Serbian)*. Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- Gavrilović, S. (1972). *Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji (Serbian)*. Izgradnja.

- Gavrilović, S., Stefanović, M., Cotrić, M., & Milojević, J. (2004). *Erosion Potential Method: An important support for integrated water resource management*. Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- Globevnik, L. (2003). Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. Στο *Erosion prediction in ungauged basins: integrating methods and techniques*. Wallingford, Oxfordshire: IAHS publication.
- Hudson, N. (1995). *Soil Conservation*. London: B T Batsford Limited.
- Lal, R. (1988). Erodibility and erosivity. *The Soil and Water Conservation*.
- Maniak, U. (2010). *Hydrologie und Wassewirtschaft: Eine Einfuhrung fur Ingenieure*. Berlin: Springer-Verlag.
- McCool D.K., Brown, L., Foster, G., Mutchler, C., & Meyer, L. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans*.
- Mitasova, H., & Mitas, L. (2001a). Multisacle erosion simulations for land use management. . Στο *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. New York: Springer.
- Moore, I., & Burch, G. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Societh America Journal*.
- Panagos, P., Karydas, C., Gitas, I., & Montanarella, L. (2012). Monthly soil erosion monitoring based on remotely sensed biophysical parametersQ a case study in Strymonas river basin towards a functional pan-European service. *International Journal of Digital Earth*.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., & Montanarella, L. (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, σσ. 329-338.
- Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S., Koukouvinos, A., & Kossieris, P. (2018). An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas. *Hydrology*.
- Phinzi, K., & Ngetar, N. (2019). The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing:A review. *International Soil and Water Conservation Research*, σσ. 27-41.
- Polykretis, C., Grillakis, M., & Alexakis, D. (2020). Exploring the impact of various spectral indices on land cover change detection using change vector analysis: A case study of Crete Island . *Remote Sensing*.
- Renard K.G., & Freimund J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*.
- Renard, K., Foster, G., Weesies , G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water- A Guide to conservation planning with the Revised Universal*

- Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, DC: United States Department of Agriculture.
- Renfro, G. (1972). *Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield*. USA: Pros Sainch-Yield Workshop.
- Romkens, M., Young, R., Poesen, J., McCool, D., El-Swaify, S., & Bradford, J. (1996). Soil erodibility factor. Στο *Prediction soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE)*. USA: USDA .
- Savvidou, E., Efstratiadis, A., Koussis, A., Koukouvinos, A., & Skarlatos, D. (2018). The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units. *Water*.
- Sherman, L. (1932). *Streamflow from rainfall by the unit graph method*. Eng. News Rec.
- Shirazi, M., Boersma, L., & Hart, W. (1988). A unifying analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale. *Soil Science Society of America Journal*.
- Soojun, K., Jiho, L., & Hwandon, J. (2018). A study of the Influence of the Spatial Distribution of Rain Gauge Networks on Areal Average Rainfall Calculation. *MDPI*.
- Staut, M. (2004). *Recent erosional processes in the catchment of the Dragonja River(Serbian)*. University of Ljubljana: Unpublished Thesis.
- Stefanidis, P., Sapountzis, M., & Stathis, D. (2002). Sheet erosion after fire at the urban forest of Thessaloniki (Northern Greece). *Silva Balcanica*.
- Stefanidis, S., Alexandridis, A., Chatzichristaki, C., & Stefanidis, P. (2021). Assessing Soil Loss by water erosion in a typical Mediterranean Ecosystem of Northern Greece under current and future rainfall erosivity. *MDPI*.
- Sutcliffe, J. (1978). *Methods of Flood Estimation: A Guide to Flood Studies Report*. Wallingford, UK: Institute of Hydrology.
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L. (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *CATENA*, σσ. 1-22.
- USDA-SCS. (1979). United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service. Στο *National Engineering Handbook. Hydrology*. USA.
- Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe. *JCR Scientific and Technical Report*.
- Vanoni, V. (1975). Sedimentation Engineering No.54. Στο *ASCE Manuals and Reports of Engineering Practices*.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning*. Indiana: Agricultural Research Service.

- Wischmeier, W., Johnson, C., & Cross, B. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water conservation*, σσ. 189-193.
- Yassoglou, N. (1998). *Semi-natural environments and processes. Soil: Mediterranean soil types in a desertification context*.
- Yassoglou, N., Tsadilas, C., & Kosmas, C. (2017). *The Soils of Greece*. USA: Springer.
- Zemljic, M. (1971). Calculation of sediment load. Evaluation of vegetation as anti-erosive factor. *Proceedings of the international symposium Interpraevent*. Villach, Austria.

## Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βαχαβιώλος, Θ. (2014). Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμιευτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση την επίδραση της βροχόπτωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βιδάλη, Μ. (2013). *Εκτίμηση μοντέλου διάβρωσης και στερεοπαροχής στον ταμιευτήρα του φράγματος Πηνειού Νομού Ηλείας, Μεταπτυχιακή Εργασία*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Γιαννόπουλος, Σ. (2002). *Μαθήματα Τεχνικής Υδρολογίας*. Θεσσαλονίκη: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
- ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ. (n.d.). *Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού- πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (n.d.). *Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας*. Ανάκτηση από [floods.yrpeka.gr](http://floods.yrpeka.gr).
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (n.d.). *Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων της Χώρας: Μεθοδολογία για την αξιολόγηση τρωτότητας σε μεταφερόμενα ιζήματα και διάβρωση εδαφών*.
- Ευθυμίου, Ν. (2016). *Ανάπτυξη στρατηγικών για την ποσοτική εκτίμηση της στερεοαπορροής από την υδατική διάβρωση με τη χρήση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων σε ορεινές υδρολογικές λεκάνες, Διδακτορική Διατριβή*. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Ζαρρής, Δ., Λυκούδη, Ε., & Κουτσογιάννης, Δ. (2001). Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καββαδά, Ο. (2012). *Ανάλυση μεθόδων βροχής- απορροής σε υδρολογικά μοντέλα με χρήση ΣΓΠ. Μεταπτυχιακή Εργασία*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κουκουβίνος, Α. (2014). *Προτεινόμενο Μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογίας πλημμυρών. Ημερίδα Ερευνητικού Προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ*.
- Κουτσογιάννης, Δ. (2011). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Μαμάσης, Ν. (2001). *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριασίου πεδίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (2016). *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Τυπογραφείο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ταρλά, Κ. (1987). *Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα. Τεχνικά Χρονικά*.

- Κωτούλας, Δ. (2001). *Ορεινή Υδρονομική Ι: Τα ρέοντα ύδατα*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μιμίκου, Μ., & Μπαλτάς, Ε. (2012). *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Παναγούλια, Δ., & Ζαρρής, Δ. (2008). *Διάβρωση, Μεταφορά και Απόθεση Φερτών Υλών στην Ελλάδα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπάζογλου, Π. (2009). Εκτίμηση τπυ βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη του Ανθεμούντα.
- Στεφανίδης, Σ., Χατζηχριστάκη, Χ., & Στεφανίδης, Π. (2016). Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με τη συνδυασμένη χρήση του μοντέλου RUSLE και των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. *ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΗ*.
- Τσακίρης, Γ. (2013). *Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία*. Συμμετρία.
- Φλαμπούρης, Κ. (2008). Μελέτης της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης R στο νόμο RUSLE, Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη.



## **Διαδικτυακοί Ιστότοποι**

<https://floods.ypeka.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 26/03/2022

<https://geodata.gov.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 01/04/2022

<https://www.eagme.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 15/07/2022

<https://www.fireservice.gr/el> Τελευταία Προσπέλαση: 7/09/2022

<https://www.ilialive.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 7/09/2022

<https://scholar.google.com/> Τελευταία Προσπέλαση: 28/09/2022

<https://www.researchgate.net/> Τελευταία Προσπέλαση: 28/09/2022

<https://www.copernicus.eu/el> Τελευταία Προσπέλαση: 27/03/2022

<https://www.hec.usace.army.mil/> Τελευταία Προσπέλαση: 07/07/2022

<https://earthexplorer.usgs.gov/> Τελευταία Προσπέλαση: 08/07/2022

<https://www.statistics.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 08/09/2022

<https://www.itia.ntua.gr/el/> Τελευταία Προσπέλαση: 29/09/2022

<https://www.meteo.gr/> Τελευταία Προσπέλαση: 25/08/2022

<http://www.emy.gr/emyl/el/> Τελευταία Προσπέλαση: 22/08/2022