



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

Μεταπτυχιακή Εργασία
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΛΙΜΝΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΠΑΛΤΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ανατέθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέπων Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., κ. Ευάγγελο Μπαλτά, για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη, τις συμβουλές του, την καθοδήγησή του, και ιδιαιτέρως για όλη του την συνεισφορά στις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Συμεών Μαλαμή και τον καθηγητή κ. Βασίλειο Τσιχριντζή, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., Αιμιλία-Παναγιώτα Θεοχάρη, για την πολύτιμη βοήθειά της και τις συμβουλές της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τις φίλες μου Δέσποινα και Μαριλίζα για τη συμπαράσταση και τη βοήθεια τους.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

i

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	iv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	v
LIST OF TABLES.....	vi
LIST OF FIGURES	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION	ix
MATERIALS AND METHODS.....	x
RESULTS	xxiii
CONCLUSIONS	xxxvi
GENERIC CONCLUSIONS	xxxvii
SPECIFIC CONCLUSIONS.....	xxxvii
FUTURE RESEARCH	xxxviii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	3
2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	3
2.1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ - ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	3
2.1.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	5
2.1.3 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	7
2.1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ.....	8
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	8
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ArcMap (έκδοση 10.5)	8
3.1.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ HEC-GeoHMS	9
3.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	24
3.2.1 ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ	24
3.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΥΓ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΙΣΟΧΡΟΝΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ.....	25
3.2.3 ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	28



3.2.4	ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	30
3.2.5	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ SCS-CN	32
3.2.6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΗΕC-HMS- ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΕC-HMS.....	37
3.3	ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	39
3.3.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΟΛΟΓΙΑ	39
3.3.2	ΥΔΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	39
3.3.3	ΥΔΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ: ΓΕΝΕΣΙΟΥΡΓΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ.....	40
3.3.4	ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	41
3.3.5	ΜΟΡΦΕΣ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	42
3.3.6	ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	44
3.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΑΒΡΙΛΟΒΙC (Erosion Potential Method), EPM	44
3.4.1	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ Ρ	45
3.4.2	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Τ.....	50
3.4.3	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ (Retention Coefficient), R	62
3.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ	63
3.4.1	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ (Soil Delivery Ratio), SDR.....	63
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	65
4.1	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	65
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	78
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	82
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
5.1	ΣΥΝΟΨΗ.....	85
5.2	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85
5.3	ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
5.4	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	87
	ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ / ENGLISH REFERENCES.....	88
	ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ / GREEK REFERENCES.....	90
	ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΙΣΤΙΟΤΟΠΟΙ.....	92



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων λεκανών απορροής	11
Πίνακας 3.2 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Δέμα. .	17
Πίνακας 3.3 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.	18
Πίνακας 3.4 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.....	19
Πίνακας 3.5 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.....	20
Πίνακας 3.6 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Δέμα.....	21
Πίνακας 3.7 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.....	21
Πίνακας 3.8 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.....	22
Πίνακας 3.9 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.....	22
Πίνακας 3.10 Επικρατούντες υδρολογικοί εδαφικοί τύποι των κυριότερων πετρωμάτων του Ελλαδικού χώρου (πηγή: floods.yreka.gr)	35
Πίνακας 3.11 Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής CN, ανάλογα με την ομάδα διηθητικότητας του εδάφους και την φυτοκάλυψη που υπάρχει (πηγή: floods.yreka.gr)	36
Πίνακας 3.12 Αριθμός καμπύλης απορροής, CN, για την περιοχή μελέτης.....	37
Πίνακας 3.13 Πληροφοριακά στοιχεία βροχομετρικών σταθμών, περιοχής μελέτης.....	46
Πίνακας 3.14 Μέση ετήσια βροχόπτωση και υψόμετρο επιλεγμένων σταθμών.....	46
Πίνακας 3.15 Μέση ετήσια θερμοκρασία και υψόμετρων επιλεγμένων σταθμών.....	50
Πίνακας 3.16 Τιμές συντελεστή X, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την κατάσταση της λεκάνης και το είδος της φυτοκάλυψης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001).....	54
Πίνακας 3.17 Τιμές συντελεστή Y, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την πετρολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001).....	55
Πίνακας 3.18 Τιμές συντελεστή φ, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την υπάρχουσα εδαφική διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)	55
Πίνακας 3.19 Ερμηνεία συντελεστή Z, του μοντέλου Gavrilovic, για τη διάβρωση της λεκάνης (πηγή: GavrilovicZ .etal., 2004).....	56
Πίνακας 4.1 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Μεταξάς».....	68
Πίνακας 4.2 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Αιανή».....	69
Πίνακας 4.3 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Λευκοπηγή».....	70
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα εδαφικής διάβρωσης μοντέλου EPM.....	81
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με βάση το μοντέλο EPM.....	82
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με τη μέθοδο Vanoni.....	83
Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με τη μέθοδο USDA- SCS.....	83
Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα συντελεστών συγκράτησης.....	83



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Όρια ΥΔ ΕΛ09 - Λεκάνες Απορροής και* Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα	3
Σχήμα 2.2 Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας (πηγή: geo.auth.gr).....	6
Σχήμα 3.1 Σύνθεση χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων GIS	9
Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας Ψ.Μ.Ε.....	10
Σχήμα 3.3 Εξεταζόμενες λεκάνες απορροής.	12
Σχήμα 3.4 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Δέμα.	13
Σχήμα 3.5 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.....	14
Σχήμα 3.6 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.	15
Σχήμα 3.7 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.	16
Σχήμα 3.8 Χρήσεις γης των λεκανών απορροής Δεμα και Τσάγκακη.	17
Σχήμα 3.9 Χρήσεις γης των λεκανών απορροής Καρδόλακκα και Λευκοπηγή.	19
Σχήμα 3.10 Γεωλογικός χάρτης λεκανών απορροής Δέμα και Τσάγκακη.	23
Σχήμα 3.11 Γεωλογικός χάρτης λεκανών απορροής Καρδόλακκα και Λευκοπηγής.	24
Σχήμα 3.12 Διάγραμμα ροής στο λογισμικό ArcMap.....	26
Σχήμα 3.13 Διάγραμμα ροής λογισμικού HEC-HMS που ακολουθήθηκε.	38
Σχήμα 3.14 Σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς (πηγή: Λυκούδη Ε. Ε. & Ζαρρής Δ., 2006).....	43
Σχήμα 3.15 Συσχέτιση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο του εδάφους	47
Σχήμα 3.16 Χάρτης μέσης ετήσια βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Δέμα.....	48
Σχήμα 3.17 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Τσάγκακη.	48
Σχήμα 3.18 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.	49
Σχήμα 3.19 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.	49
Σχήμα 3.20 Συσχέτιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο του εδάφους.	51
Σχήμα 3.21 Μέση ετήσια θερμοκρασία Τ λεκάνης απορροής Δέμα.	52
Σχήμα 3.22 Μέση ετήσια θερμοκρασία λεκάνης απορροής Τσάγκακη.....	52
Σχήμα 3.23 Μέση ετήσια θερμοκρασία Τ λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.	53
Σχήμα 3.24 Μέση ετήσια θερμοκρασία Τ λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.	53
Σχήμα 3.25 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Δέμα.	57
Σχήμα 3.26 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Τσάγκακη.....	58
Σχήμα 3.27 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.....	58
Σχήμα 3.28 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.	59
Σχήμα 3.29 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Δέμα.....	60
Σχήμα 3.30 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Τσάγκακη.	61
Σχήμα 3.31 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.	61
Σχήμα 3.32 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.	62
Σχήμα 4.1 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Δέμα, μέσω ισόχρονων καμπυλών	65
Σχήμα 4.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Τσάγκακη, μέσω ισόχρονων καμπυλών.....	66
Σχήμα 4.3 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Καρδόλακκα, μέσω ισόχρονων καμπυλών.	67
Σχήμα 4.4 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Λευκοπηγής, μέσω ισόχρονων καμπυλών.....	67



Σχήμα 4.5 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Δέμα.	68
Σχήμα 4.6 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.	69
Σχήμα 4.7 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.....	70
Σχήμα 4.8 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.	71
Σχήμα 4.9 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.	72
Σχήμα 4.10 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.....	72
Σχήμα 4.11 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.....	73
Σχήμα 4.12 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.	73
Σχήμα 4.13 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.....	74
Σχήμα 4.14 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.....	74
Σχήμα 4.15 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.	75
Σχήμα 4.16 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.....	75
Σχήμα 4.17 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.	76
Σχήμα 4.18 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.	76
Σχήμα 4.19 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.....	77
Σχήμα 4.20 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.....	77
Σχήμα 4.21 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Δέμα.	78
Σχήμα 4.22 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.	79
Σχήμα 4.23 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.	80
Σχήμα 4.24 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.....	81

LIST OF TABLES

Table 1 Characteristics of chosen river basins.	xi
Table 2 Land use of the Dema river basin xiv	xiv
Table 3 Land use of Tsagakaki river basin. xiv	xiv
Table 4 Land use of Kardolakkas river basin. xv	xv
Table 5 Land use of Leukopigi river basin. xv	xv
Table 7 Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: floods.ypeka.gr)..... xx	xx
Table 8 Results of soil erosion for the studied areas.xxxvi	xxxvi
Table 9 Results of sediment yield for the studied areas estimated by Vanoni's equation.xxxvi	xxxvi
Table 10 Results of sediment yield for the studied areas estimated by USDA-SCS method.xxxvi	xxxvi

LIST OF FIGURES

Figure 1 Chart flow of DEM.	x
Figure 2 Examined river basins.....	xi



Figure 3 Dem of river basin Dema.	xii
Figure 4 Dem of river basin Tsagkaki.	xii
Figure 5 Dem of Kardolakkas river basin.	xiii
Figure 6 Dem of Leukopigi river basin.	xiii
Figure 7 Land use map of Dema and Tsagkaki river basins.	xvi
Figure 8 Land use map of Kardolakkas and Leukopigi river basin.	xvii
Figure 9 Geological map of Dema & Tsagkaki river basins.	xviii
Figure 10 Geological Map of Kardolakkas & Leukopigi river basins.	xix
Figure 11 Unit Hydrograph of river basin Dema using Time Area Diagram.	xxiv
Figure 12 Unit Hydrograph of river basin Tsagkaki using Time Area Diagram.....	xxiv
Figure 13 Unit Hydrograph of river basin Kardolakkas using Time Area Diagram.....	xxv
Figure 14 Unit Hydrograph of river basin Leukopigi using Time Area Diagram.....	xxv
Figure 15 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Dema river basin.....	xxvi
Figure 16 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Tsagkaki river basin.	xxvi
Figure 17 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Kardolakkas river basin.	xxvii
Figure 18 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Leukopigi river basin. .	xxvii
Figure 19 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for dry conditions	xxviii
Figure 20 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for normal conditions.....	xxviii
Figure 21 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for wet conditions	xxix
Figure 22 Flow hydrograph at the outlet of Tsagkaki subbasin for dry conditions	xxix
Figure 23 Flow hydrograph at the outlet of Tsagkaki subbasin for normal conditions	xxx
Figure 24 Flow hydrograph at the outlet of Lilas subbasin for wet conditions	xxx
Figure 25 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for dry conditions	xxxi
Figure 26 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for normal conditions	xxxi
Figure 27 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for wet conditions.....	xxxii
Figure 28 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for dry conditions	xxxii
Figure 29 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for normal conditions	xxxiii
Figure 30 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for wet conditions.....	xxxiii
Figure 31 Soil Erosion of Dema river basin estimated by EPM model.....	xxxiv
Figure 32 Soil Erosion of Tsagkaki river basin estimated by EPM model.....	xxxiv
Figure 33 Soil Erosion of Kardolakkas river basin estimated by EPM model.....	xxxv
Figure 34 Soil Erosion of Leukopigi river basin estimated by EPM model.....	xxxv



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται υδρολογική ανάλυση τεσσάρων λεκανών απορροής που ανήκουν στην ΛΑΠ Αλιάκμονα, στην παραλίμνια περιοχή της Πολυφύτου, και διερευνάται η εδαφική διάβρωση ανά μονάδα επιφάνειας, με βάση τη μέθοδο Gavrilovic και εν τέλη εκτιμάται η στερεοαπορροή για τις τέσσερις λεκάνες. Η γεωμορφολογική ανάλυση των εξεταζόμενων λεκανών πραγματοποιείται σε περιβάλλον του προγράμματος ArcGIS, και στη συνέχεια υπολογίζεται το μοναδιαίο υδρογράφημα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών. Επίσης, γίνεται υπολογισμός των υετογραφημάτων σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη χρήση του λογισμικού HEC-HMS, από το οποίο και εξάγονται τα τελικά πλημμυρογραφήματα για τις λεκάνες αυτές. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η μεθοδολογία και εφαρμόζεται σε περιβάλλον συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, η μέθοδος Gavrilovic, με την οποία γίνεται η εκτίμηση του συνολικού ετήσιου ρυθμού διάβρωσης για τις επιλεγμένες λεκάνες. Η μέθοδος Gavrilovic εξετάζει τη γεωλογία, τις χρήσεις γης, τη μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των λεκανών, τα οποία ασκούν επιρροή στην διαδικασία της εδαφικής διάβρωσης. Τέλος, υπολογίζεται η στερεοαπορροή σε τόνους ανά έτος με βάση τους συντελεστές στερεοαπορροής για τη μέθοδο Gavrilovic και τις εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του Vanoni και της SCS.

Λέξεις - κλειδιά : υδρολογική ανάλυση, διάβρωση, Gavrilovic, στερεοαπορροή.



ABSTRACT

In this thesis, a hydrological analysis of four runoff basins belonging to the Aliakmona LAP, in the lakeside area of Polyfytos, is carried out, and the soil erosion per unit area is investigated, based on the Gavrilovic method (Erosion Potential Method, EPM), and finally the sediment yield is estimated for these four basins. The geomorphological analysis of the examined river basins is carried out in the environment of the ArcGis program, and then the unit hydrograph is calculated using the Time Area method. Also, the hyetographs are calculated using the alternating block method. These hyetographs are then converted into flood hydrographs via HEC-HMS software. Consequently, the Gavrilovic method is presented and applied in Geographical Information System (GIS), where the mean annual soil erosion is being estimated for the chosen river basins. The Gavrilovic method examines the geology, the land use, the annual rainfall and temperature and the topographic characteristics of the basins, which affect the process of soil erosion. At last, the sediment yield is estimated using the retention coefficient for Gavrilovic method and the empirical equations of Vanoni and SCS.

INTRODUCTION

The purpose of this thesis is the hydrological analysis of 4 river basins in the area of lake Polyfytos as well as the integrated approach of soil erosion estimation. More particularly, the preparation of a methodological framework for the integrated approach to the problem of soil erosion is carried out.

Soil erosion is a very important environmental issue worldwide, as it is one of the most important threats to the environment and natural resources and greatly increases the risk of flooding. The reduction in soil quality and productivity caused by erosion results in land degradation. Also, siltation of watercourses is caused and a number of structures related to water systems are affected (reservoir siltation, deposits of portable materials in harbors and estuaries, undermining of bridge foundations) (Pandey et al, 2016).

In the hydrological analysis, the Unit Hydrographs are estimated, based on the method of transformation of rain into runoff through the Time Area Diagram.

In order to estimate sediment yield, the Gavrilovic Method was used. The difficulty of determining the parameters and the uncertainty accompanying its final calculation were taken into account. Finally, through the ArcGIS environment, the total amount of sediment yield of EPM model is being estimated by valuing the Sediment Delivery Ratio and the Retention Coefficient from bibliographical equations.



MATERIALS AND METHODS

In this thesis, the river basin of Aliakmon was chosen, which belongs to the water district of western Macedonia. It has a catchment of 13615.56 km² and is located in the northwestern area of Greece.

In order to determine the necessary data for the hydrological simulation, the process of the digital elevation model of the area. The Digital Elevation Model (DEM) has a pixel size of 5.00 m. With the use of Geospatial Hydrologic Modeling Extension by the Hydrologic Engineering Center, also known as HEC-GeoHMS, the selected basins were defined. For the purpose of this thesis, the following figure (Figure1) was used:

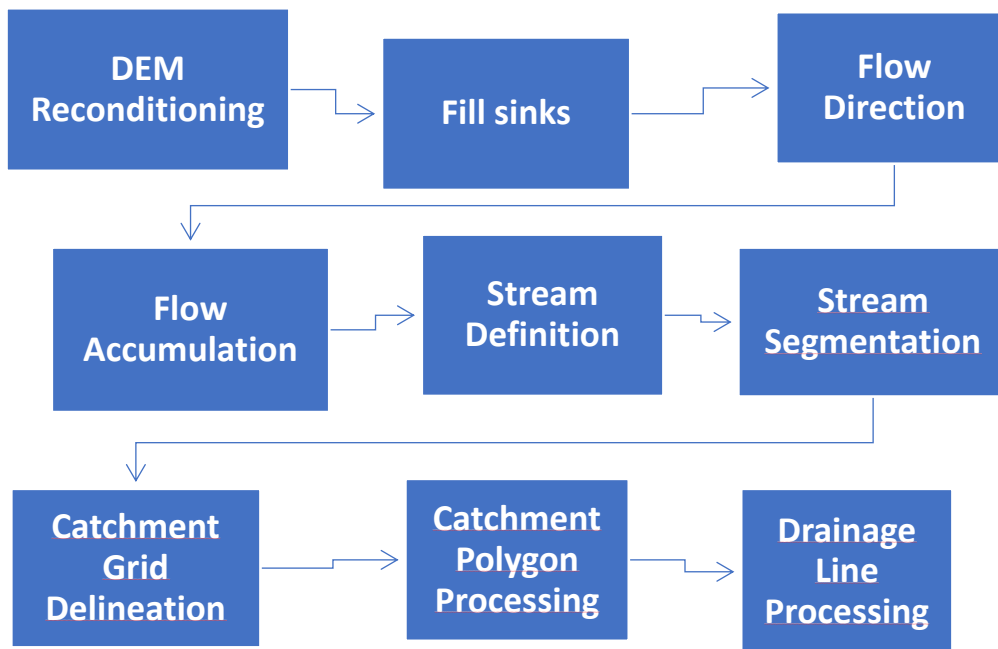


Figure 1 Chart flow of DEM.

As an outcome of these steps, the 4 river basins occurred, which are presented in the Table 1.



Table 1 Characteristics of chosen river basins.

Basin	Area (km ²)	Main river length (m)	Mean elevation Hmean (m)	Slope (%)
DEMA	31	9.2	778	31.03
TSAGKAKI	45	12	846.35	30.71
KARDOLAKKAS	43	12.4	673.6	24.18
LEUKOPIGI	113	25.15	756.14	20.67

The following figures (Figures 2,3,4,5 and 6) contain the digital elevation models of the basins.

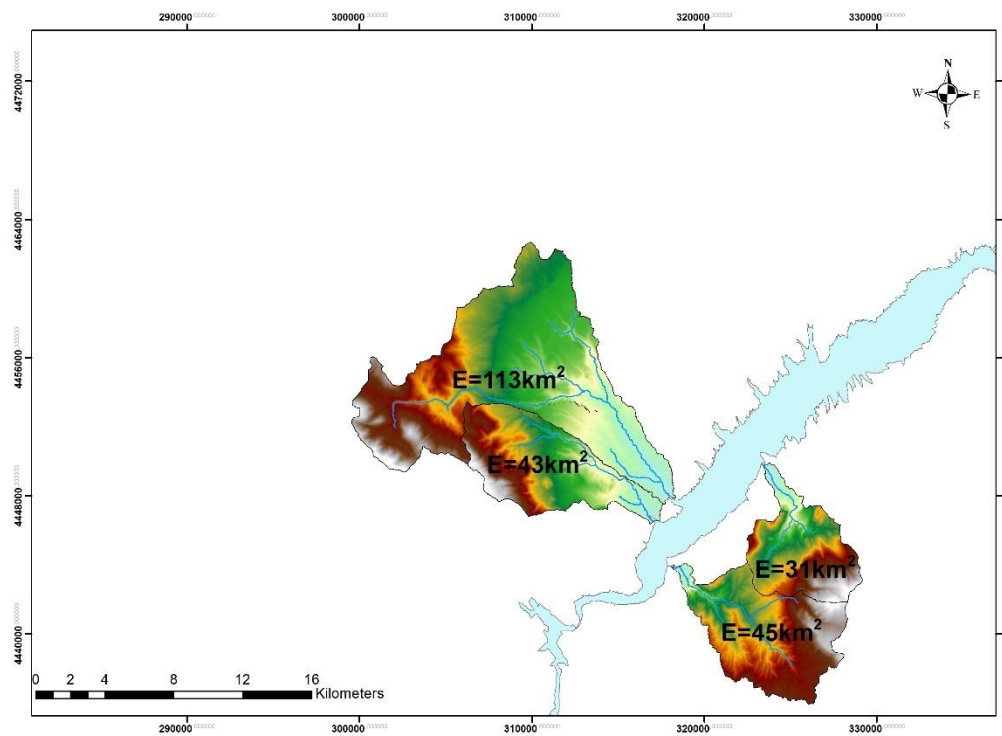


Figure 2 Examined river basins.

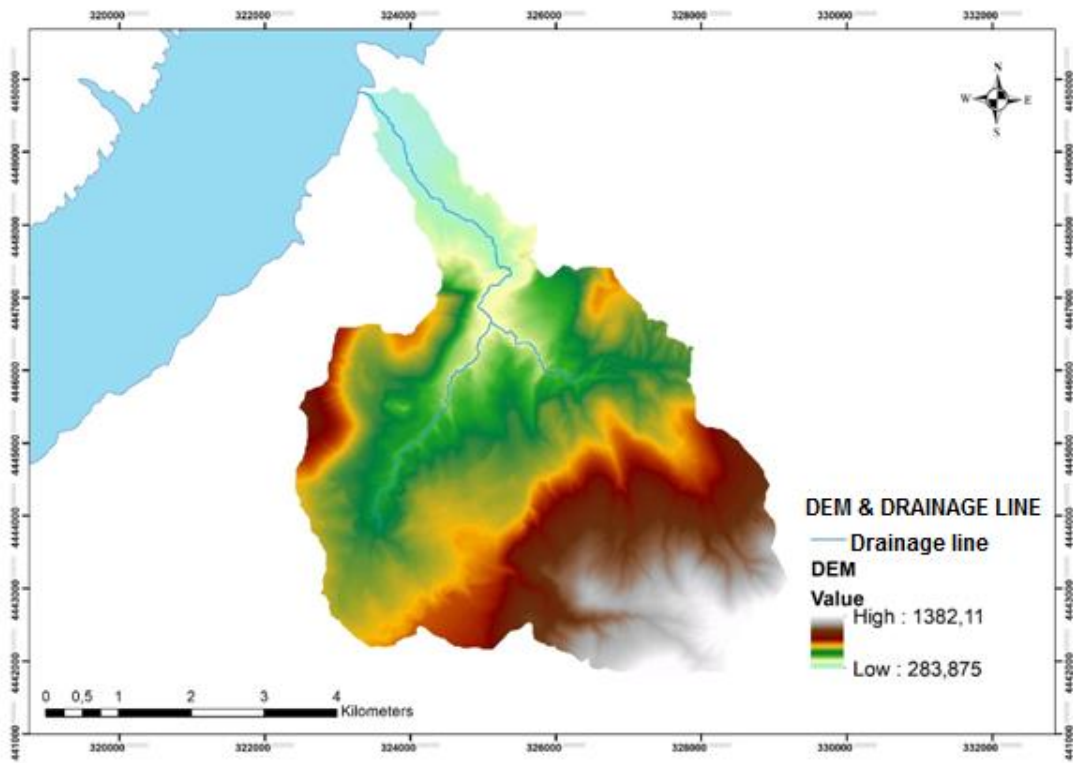


Figure 3 Dem of river basin Dema.

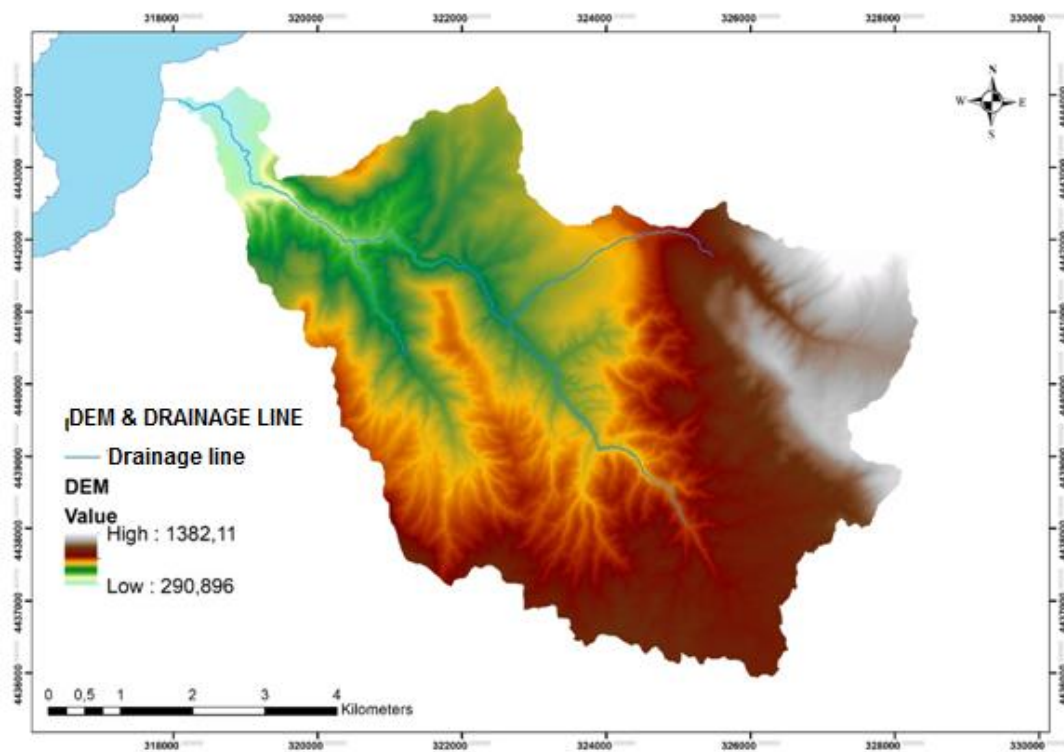


Figure 4 Dem of river basin Tsagakki.

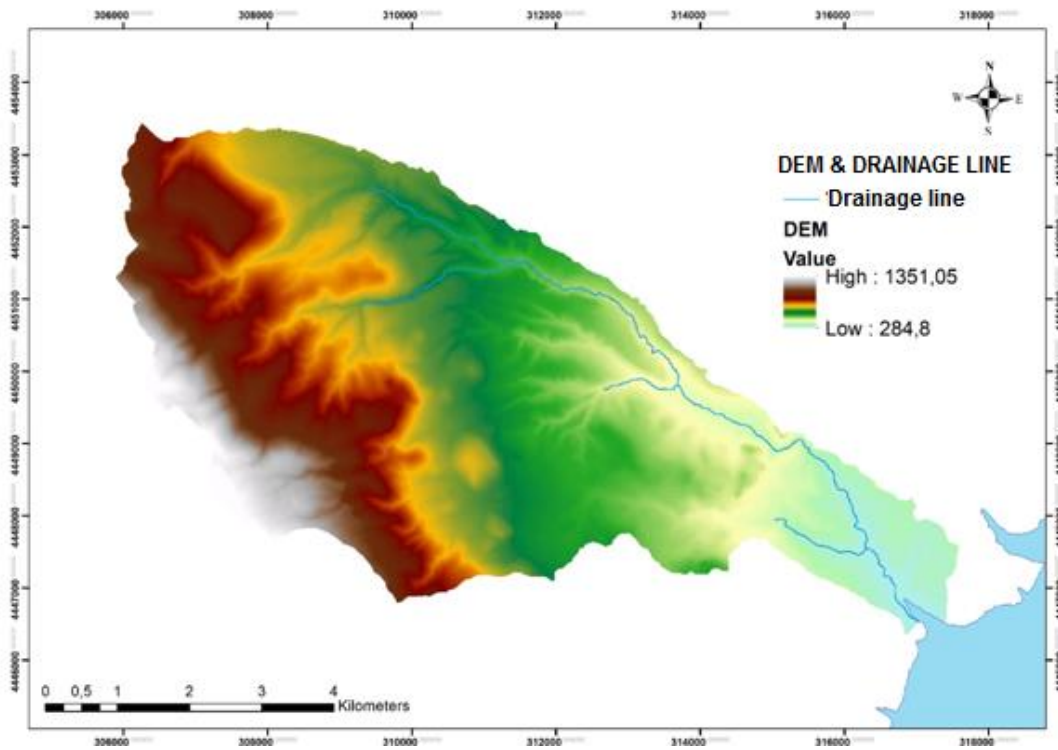


Figure 5 Dem of Kardolakkas river basin.

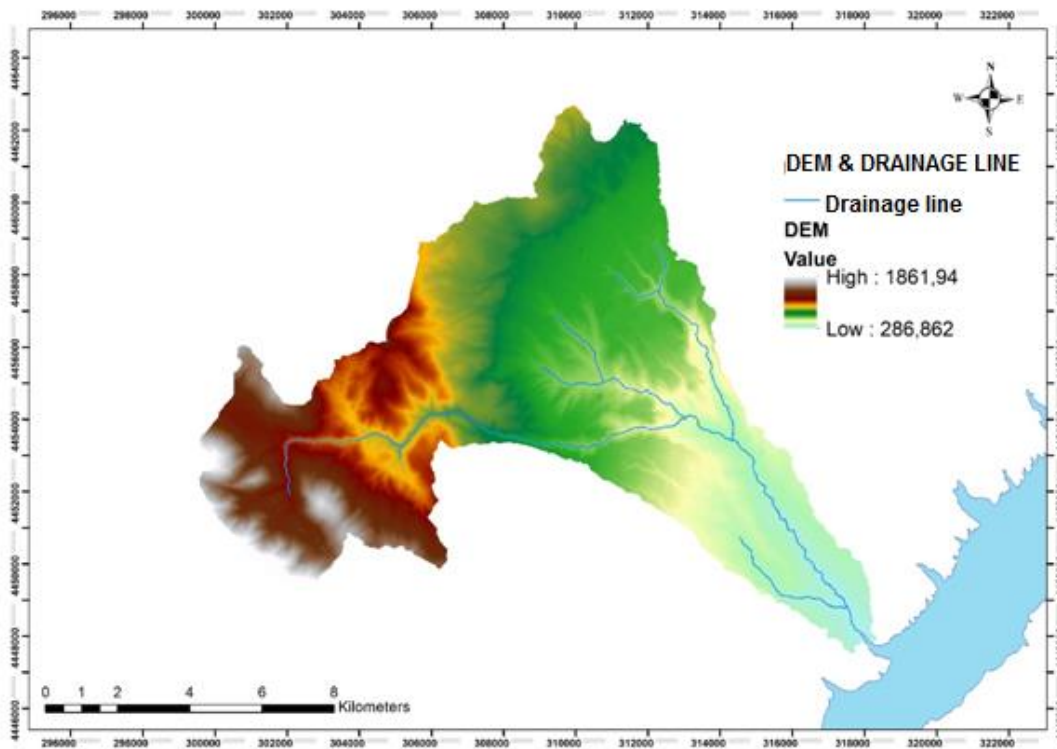


Figure 6 Dem of Leukopigi river basin.



The “Corine Land Cover (2018)” land cover maps from Copernicus website were used to determine the coefficients related to the type of land use.

In the next tables (Table 2,3,4 and 5) and Figures 7 & 8, the land use that was detected in the basins, are described:

Table 2 Land use of the Dema river basin

α/α	Corine code	Description	Area	
			[km ²]	[%]
1	112	Discontinuous urban fabric	0.01	0.01
2	131	Mineral extraction sites	1.22	3.99
3	211	Non-irrigated arable land	4.87	15.89
4	243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	7.22	23.56
5	311	Broad-leaved forest	6.67	21.77
6	312	Coniferous forest	0.36	1.17
7	321	Natural grasslands	4.30	14.04
8	323	Sclerophyllous vegetation	6.00	19.57
		Total	30.64	100

Table 3 Land use of Tsagkaki river basin.

α/α	Corine code	Description	Area	
			[km ²]	[%]
1	112	Discontinuous urban fabric	0.66	1.45
3	211	Non-irrigated arable land	7.93	17.47
4	243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	2.38	5.24
5	311	Broad-leaved forest	12.07	26.58
6	312	Coniferous forest	0.13	0.30
7	321	Natural grasslands	9.04	19.91
8	323	Sclerophyllous vegetation	12.53	27.60
9	324	Transitional woodland-shrub	0.66	1.45
		Total	45.40	100



Table 4 Land use of Kardolakkas river basin.

α/α	Corine code	Description	Area	
			[km ²]	[%]
1	112	Discontinuous urban fabric	0.99	2.29
2	211	Non-irrigated arable land	17.61	40.71
3	231	Pastures	0.14	0.33
4	243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	5.26	12.14
5	312	Coniferous forest	2.27	5.25
6	313	Mixed forest	0.5	1.16
7	321	Natural grasslands	1.93	4.45
8	323	Sclerophyllous vegetation	8.99	20.77
9	324	Transitional woodland-shrub	0.13	0.31
10	333	Sparsely vegetated areas	5.44	12.59
Total			43.26	100

Table 5 Land use of Leukopigi river basin.

α/α	Corine code	Description	Area	
			[km ²]	[%]
1	112	Discontinuous urban fabric	2.80	2.47
2	121	Industrial or commercial units	0.86	0.76
3	133	Construction sites	0.50	0.45
4	211	Non-irrigated arable land	47.72	42.09
5	221	Vineyards	0.63	0.55
6	231	Pastures	3.07	2.71
7	242	Complex cultivation patterns	7.00	6.17
8	243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	6.56	5.78
9	311	Broad-leaved forest	3.26	2.88
10	312	Coniferous forest	3.08	2.72
11	313	Mixed forest	0.58	0.51
12	321	Natural grasslands	6.93	6.11
13	323	Sclerophyllous vegetation	14.45	12.74



14	324	Transitional woodland-shrub	12.85	11.34
15	333	Sparsely vegetated areas	3.07	2.72
		Total	113.36	100

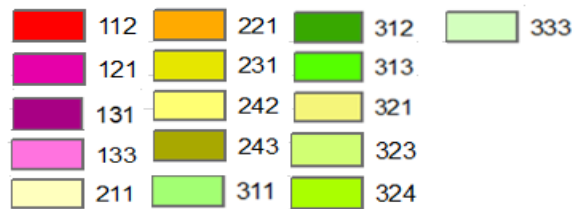
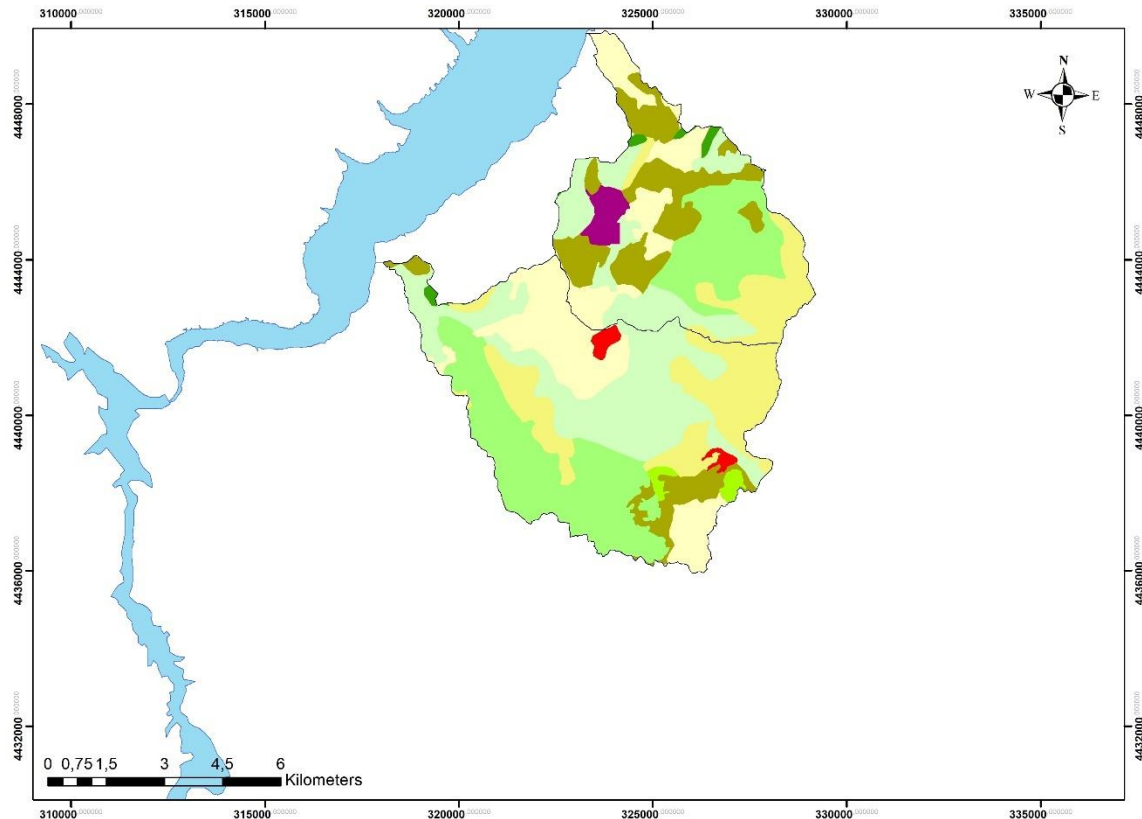


Figure 7 Land use map of Dema and Tsagkaki river basins.

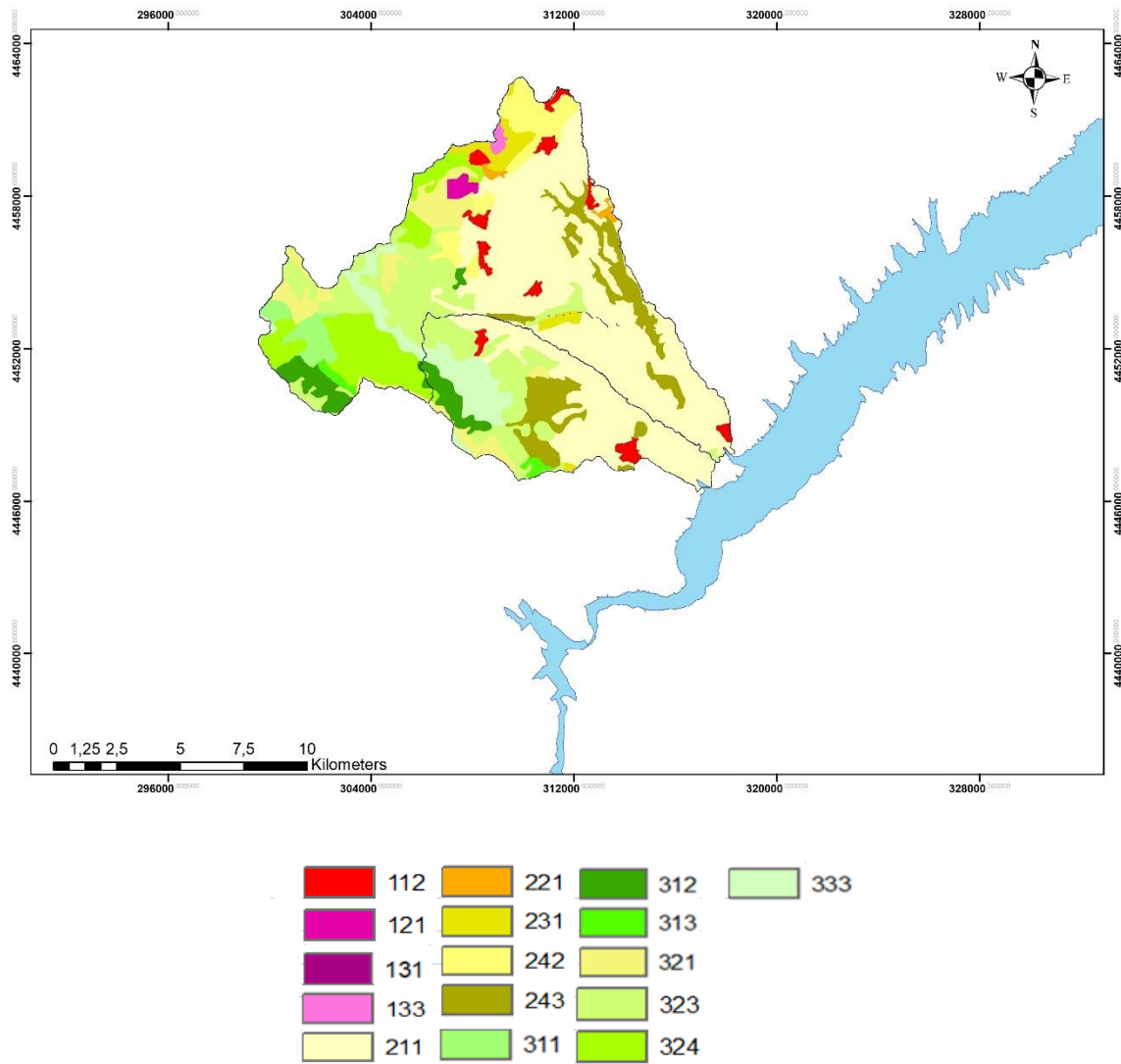


Figure 8 Land use map of Kardolakkas and Leukopigi river basin.

The geological map of the region was provided by IGME, and in the Figures 9 and 10 the perspective geologic formations are shown:

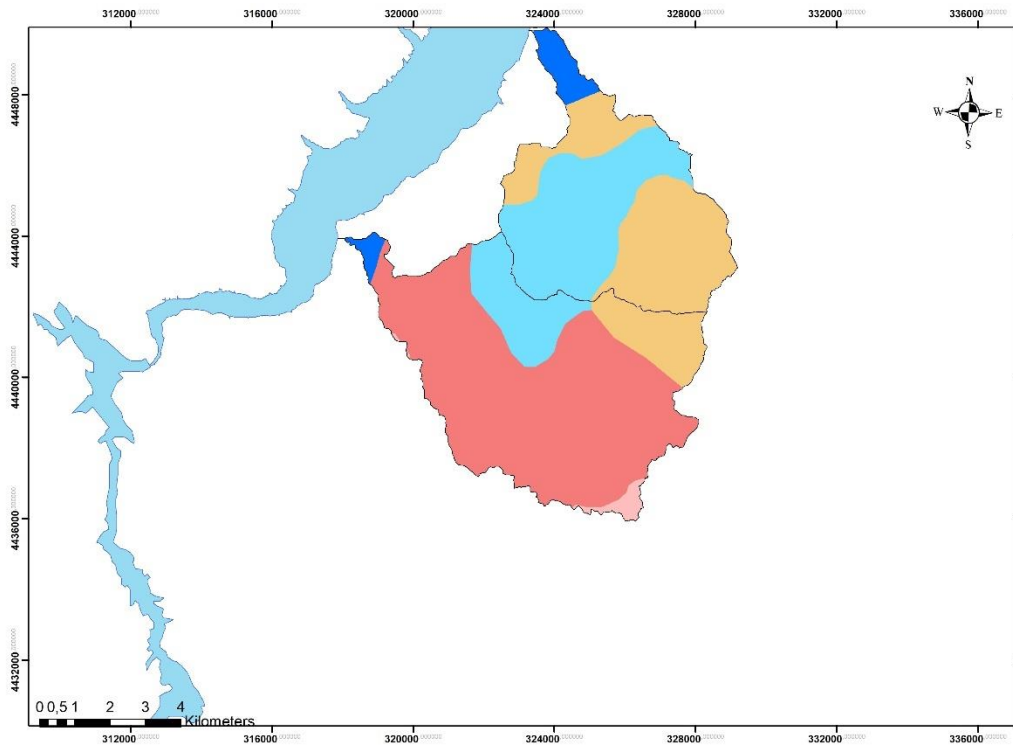
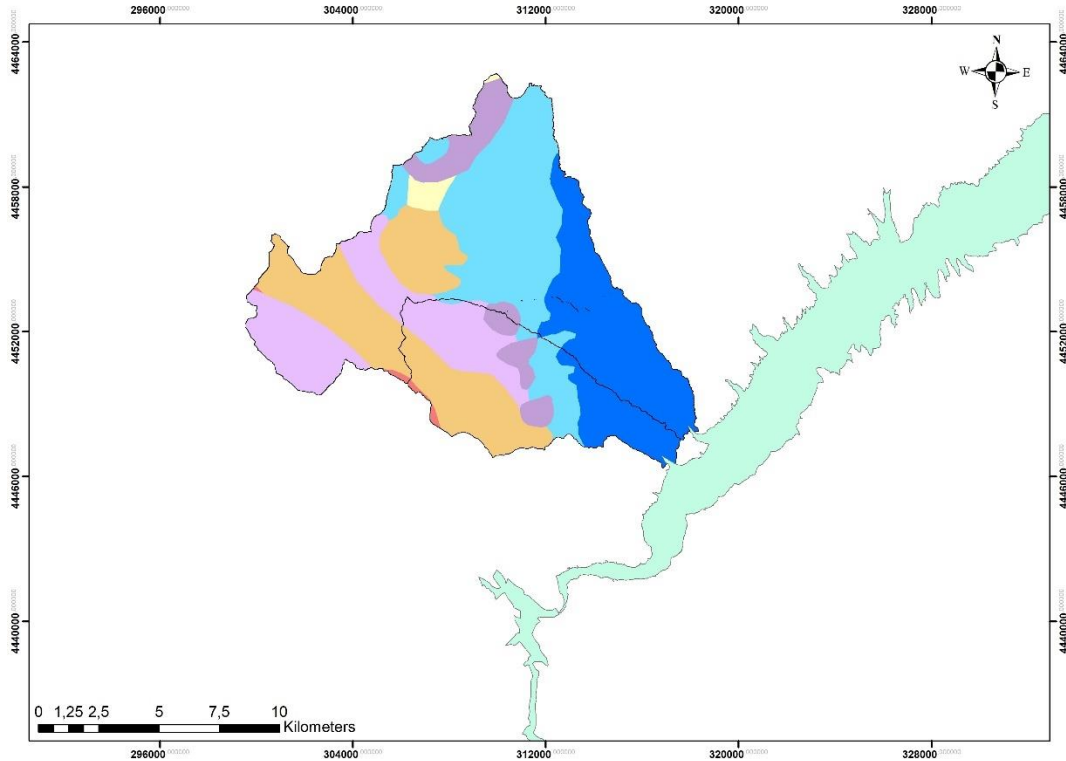


Figure 9 Geological map of Dema & Tsagkaki river basins.





- Lake deposits: sand, gravels, clays, marls, marly limestones and often layers of lignite
- Flysch
- Limestones (mostly biosparoudites)
- Limestones (mostly biosparoudites) and dolomites
- Ophiolites, gneisses, schists, amphibolites
- Ophiolites
- Lake and land deposits
- Modern alluvium of valleys, plains and coastal deposits

Figure 10 Geological Map of Kardolakkas & Leukopigi river basins.

INTENSITY DURATION FREQUENCY CURVES

Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves are a mathematical expression between the rainfall intensity i , the rainfall duration d and the return period T . Their generic form is described via Equation 1

$$i(d, T) = \frac{\lambda' \cdot (T^\kappa + \psi')}{(d + \theta)^\eta}, \quad \kappa \neq 0 \quad (1)$$

Where d is the rainfall duration [hr], T is the return period (years), λ , κ , ψ , θ , η are parameters for each rain station.

ALTERNATING BLOCK METHOD

The alternating block method is used in order to create a more realistic version of the rainfall event. The rainfall intensities are calculated by the IDF curves. The maximum value is placed at the center, the next largest value is placed alternately to the right and left of the rainfall peak in turn. The method was proposed by Chow et al in 1988.

SERVICE CURVE NUMBER (SCS-CN) METHOD

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

$$h_e = \begin{cases} 0, & h \leq I\alpha \\ \frac{(h - I\alpha)^2}{(h - I\alpha) + S}, & h > I\alpha \end{cases} \quad (2)$$

Where h_e the depth of runoff (mm), h the depth of rainfall [mm], $I\alpha$ the initial abstraction and S the potential maximum retention [mm]. The S parameter for each soil condition is calculated through CN number via the equation 3

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$



CURVE NUMBER METHOD

The Curve Number Method expresses runoff volume as a function of rainfall volume, hydrological storage and initial abstraction. Rainfall losses depend on factors such as soil type, vegetation type and density, land use, percent of impervious area, and antecedent runoff conditions, a measure of how dry or wet a watershed is at the beginning of a storm.

In order to take all these parameters into consideration, the Natural Resource Conservation Service, has categorized soils based on their runoff potential into four groups

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

Group D: Clay soils that swell significantly when wet, heavy plastic and soils with a permanent high-water table

Then the Ministry of Environment and Energy gave values to CORINE codes based on what type of soil they are on (Table 6), known as Curve Number (CN).

Table 6 Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: floods.ypeka.gr)

Code	Description	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
111	Continuous urban fabric	69	80	87	90
112	Discontinuous urban fabric	66	77	83	86
121	Industrial or commercial units	85	90	93	94
122	Road and rail networks and associated land	87	92	94	95
123	Port areas	85	90	93	94
124	Airports	85	90	93	94
131	Mineral extraction sites	69	80	87	90
132	Dump sites				
133	Construction sites	69	80	87	90
141	Green urban areas	44	65	62	82
142	Sport and leisure facilities	50	70	80	85
211	Non-irrigated arable land	67	76	83	86
212	Permanently irrigated land	67	76	83	86
213	Rice fields	59	72	81	85
221	Vineyards	63	72	79	82
222	Fruit trees and berry plantations	44	66	77	83



223	Olive groves	49	59	72	82
231	Pastures	54	70	80	85
241	Annual crops associated with permanent crops	67	76	83	86
242	Complex cultivation patterns	67	76	83	86
243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	67	76	83	86
244	Agro-forestry areas				
311	Broad-leaved forest	35	61	74	80
312	Coniferous forest	35	61	74	80
313	Mixed forest	35	61	74	80
321	Natural grasslands	49	69	79	84
322	Moors and heathland	42	62	74	80
323	Sclerophyllous vegetation	42	62	74	80
324	Transitional woodland-shrub	42	62	74	80
331	Beaches, dunes, sands	42	62	74	80
332	Bare rocks	76	86	90	92
333	Sparsely vegetated areas	42	62	74	80
334	Burnt areas				
335	Glaciers and perpetual snow				
411	Inland marshes	95	95	95	95
412	Peat bogs				
421	Salt marshes	95	95	95	95
422	Salines	95	95	95	95
423	Intertidal flats				
511	Water courses	100	100	100	100
512	Water bodies	100	100	100	100
521	Coastal lagoons	100	100	100	100
522	Estuaries				
523	Sea and ocean	100	100	100	100

Then the CN value of the catchment is given by equation (4)

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} \cdot CN_i \right) \quad (4)$$

Where CN_{II} the curve number under normal conditions, A_i the area of the subsurface i with a curve number of CN_i and A the basin's area. The complete approach of the study of a flood event requires the investigation of dry and wet soil conditions as well. Therefore, the following equations (5,6) are used:

$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}} \quad (5)$$



$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}} \quad (6)$$

SOIL EROSION

Soil erosion is a natural process that occurs when the impact of water or wind detaches and removes soil particles, causing the soil to deteriorate. The most important terms for the subject of soil erosion, according to Zarris (2001) are described below:

- Sediment yield, S_v , is the amount of sediment reaching or passing a point of interest in a given period time
- Sediment discharge, Q_s , is the amount of sediment moved by a stream in a given time
- Gross erosion is the total mass of sediment effectively blown away from a surface
- Sediment Delivery Ratio, SDR, is defined as “the sediment yield from an area divided by the gross erosion of the same area.

GAVRILOVIC MODEL

Gavrilović S. (1962, 1970, 1972) developed what is now known as Gavrilovic Method or Erosion Potential Method (EPM):

$$w = \pi \cdot T \cdot P \cdot \sqrt{Z^3} \quad (7)$$

where w the mean annual soil erosion in the catchment [$m^3 \cdot (km^2)^{-1} \cdot y^{-1}$], T the temperature coefficient, P the mean annual precipitation [mm] and Z the erosion coefficient.

The temperature coefficient is given by equation (8):

$$T = \sqrt{\left(0.1 + \frac{T_o}{10}\right)} \quad (8)$$

where T_o the mean annual temperature of the studied area [$^{\circ}C$].

The erosion coefficient is given by equation (9):

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + \sqrt{J}) \quad (9)$$



where Z the erosion coefficient (ranging from 0 to 1), X the soil protection coefficient (ranging from 0 to 1), Y the soil erodibility coefficient (ranging from 0 to 2), ϕ the erosion and stream network development coefficient (ranging from 0 to 1) and J the average slope of the studied area [%].

The X , Y and ϕ coefficients are estimated by using the proposed values from bibliography. The X coefficient depends on state of basin and the type of vegetation, the Y coefficient depends from the geologic conditions and the type of the subsoil and the ϕ coefficient depends on the current type and extend of erosion. For the purpose of this paper the values proposed by Kotoulas (2001).

The estimation of ϕ coefficient requires field measurements, which were not available for the study areas. Therefore, for the purpose of this paper the coefficient was estimated by making the assumption that is an equation from X and Y coefficients:

$$\phi = 0.7 \cdot X + 0.3 \cdot Y \quad (10)$$

The Retention Coefficient (R) is used in order to calculate the sediment yield at the outlet of the study areas, and the equation is:

$$R_{Gavrilo\text{vic}} = \frac{4 \cdot \sqrt{O \cdot D}}{L + 10} \quad (11)$$

Where R the retention coefficient (ranging from 0 to 1), O the perimeter of the catchment [km], D is the difference between the mean basin elevation and the outlet elevation [km], L the length of the main river bed [km].

SEDIMENT YIELD

The product of erosion is transferred through the drainage network. In order to estimate the percentage of erosion that is finally converted into sediment yield, many empirical equations have been formulated. In this thesis, the empirical relations of Gavrilovic, SCS and Vanoni are applied to calculate the sediment delivery ratio in order to apply the sediment yield relation.

RESULTS

In this study case Time Area Diagram was used to calculate runoff resulting from catchment net rainfall (Figures 11, 12, 13 and 14):

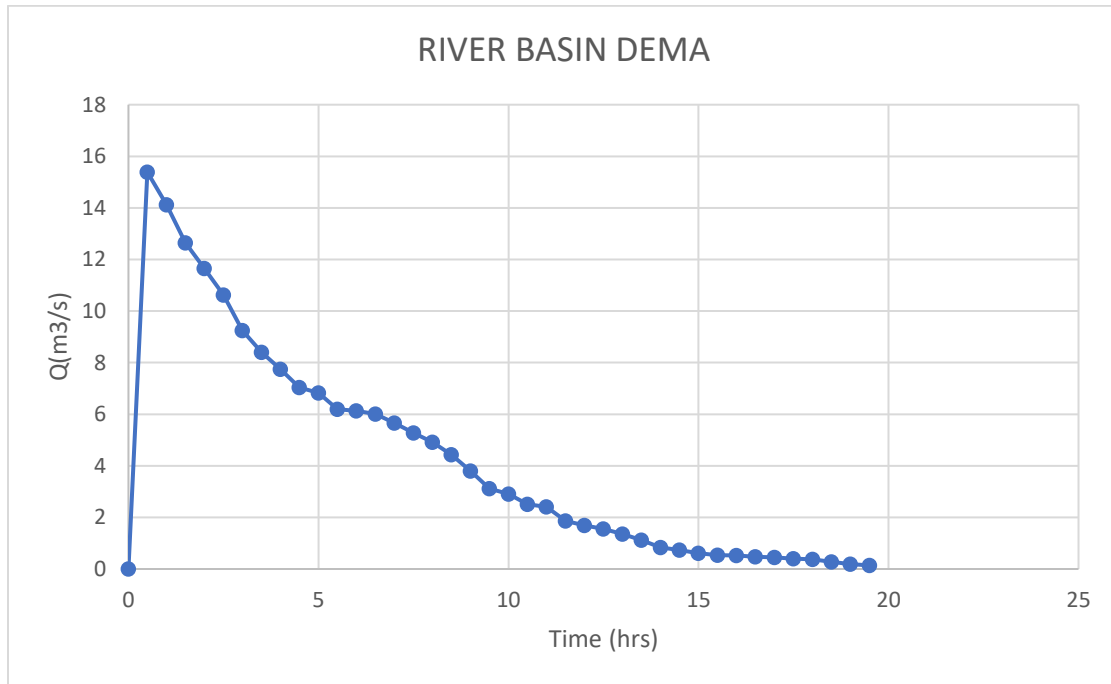


Figure 11 Unit Hydrograph of river basin Dema using Time Area Diagram.

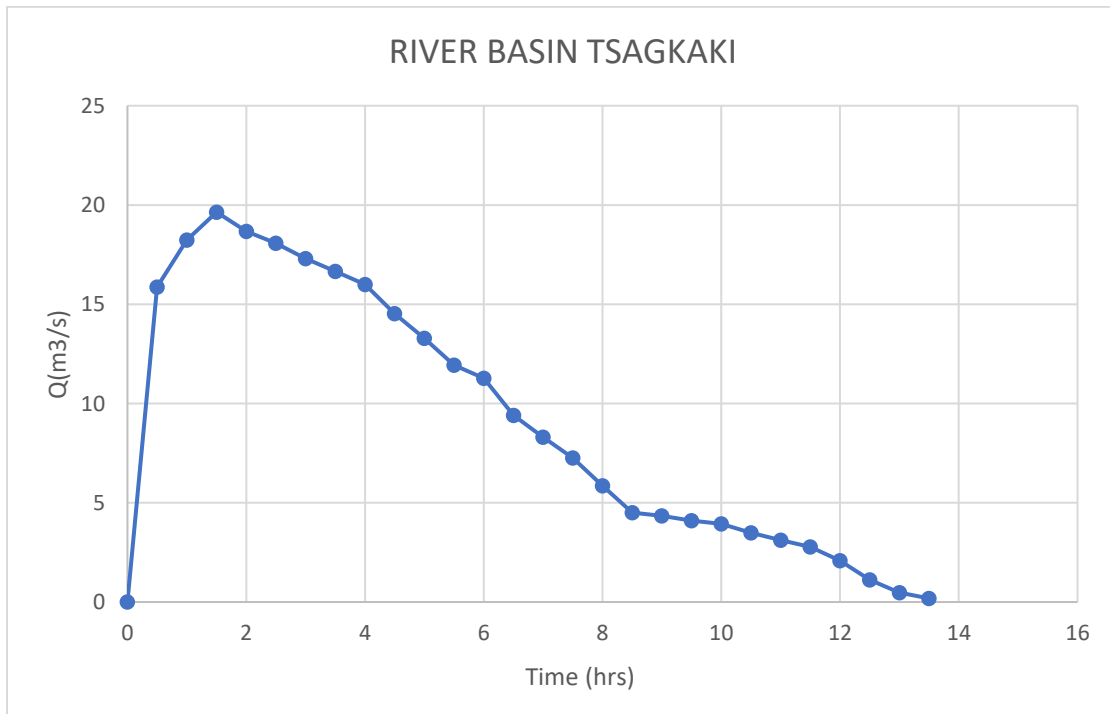


Figure 12 Unit Hydrograph of river basin Tsagkaki using Time Area Diagram.

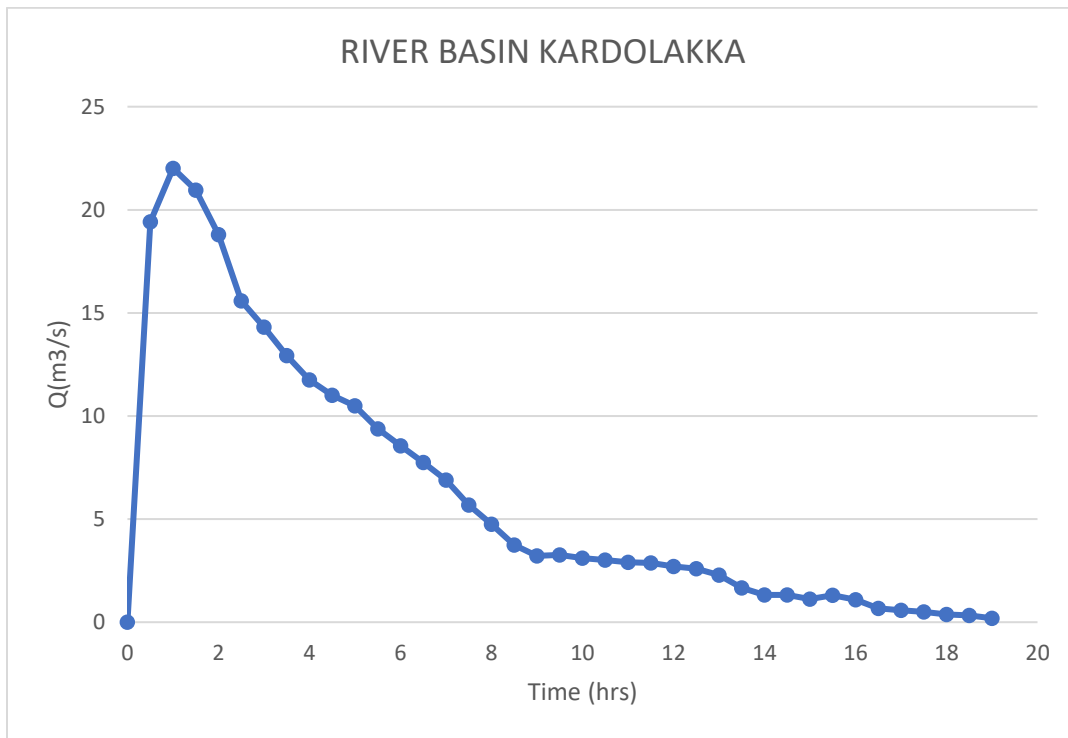


Figure 13 Unit Hydrograph of river basin Kardolakkas using Time Area Diagram.

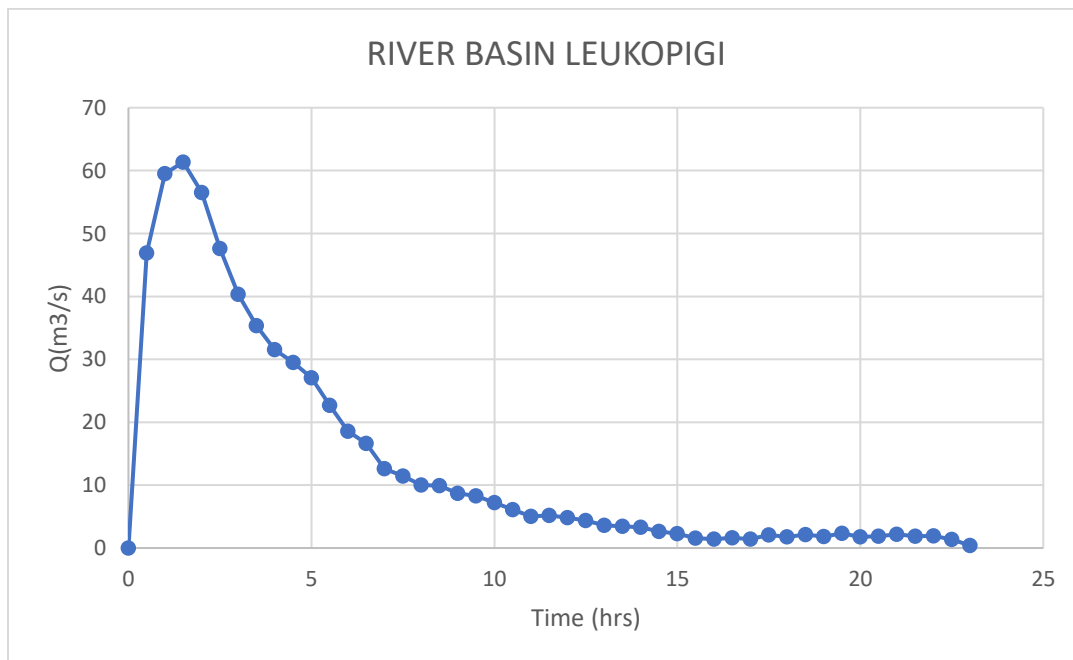


Figure 14 Unit Hydrograph of river basin Leukopigi using Time Area Diagram.

Also, using the alternating block method the hyetographs were calculated (Figures 15,16, 17 and 18)

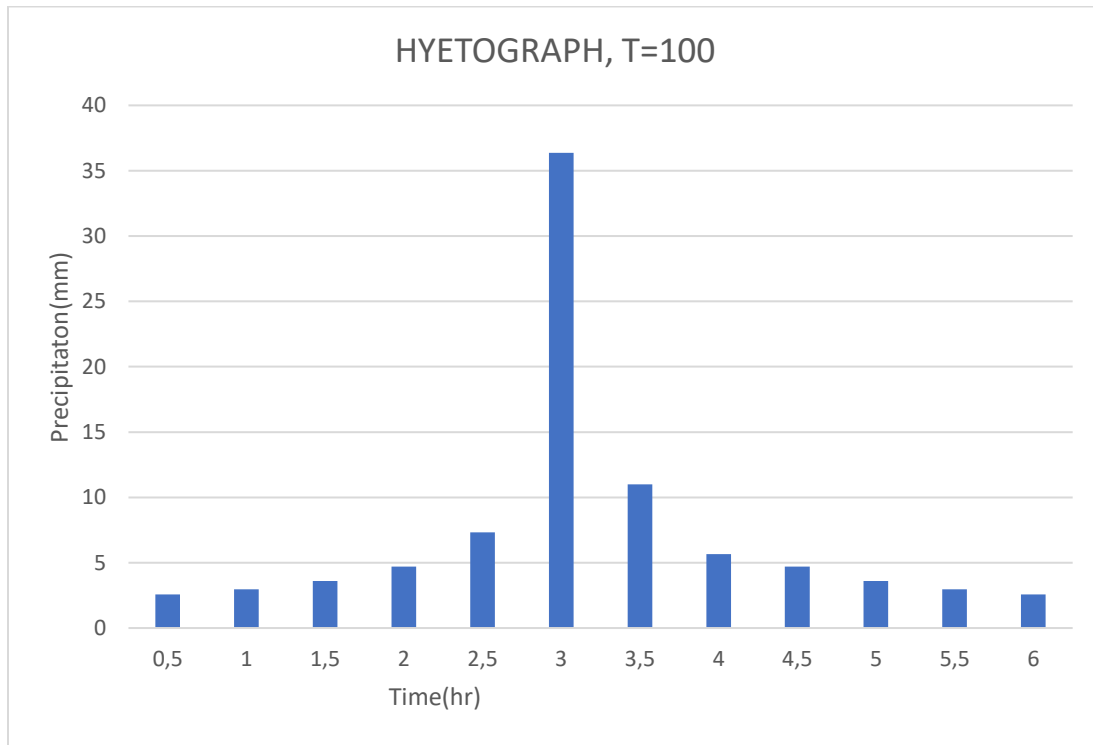


Figure 15 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Dema river basin.

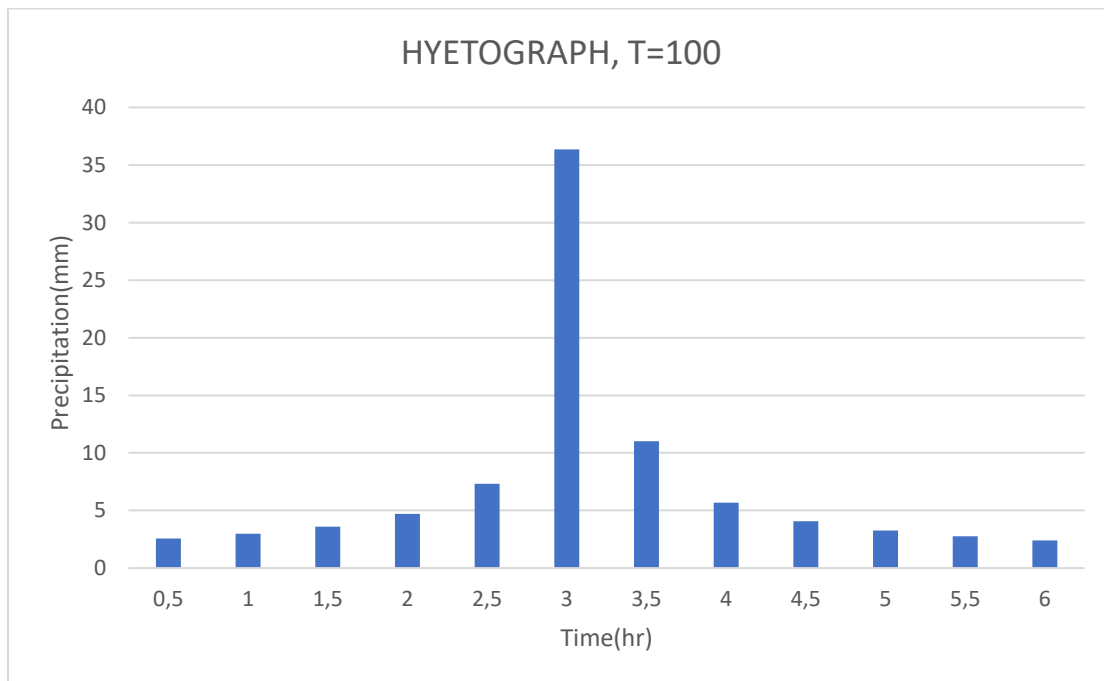


Figure 16 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Tsagkaki river basin.

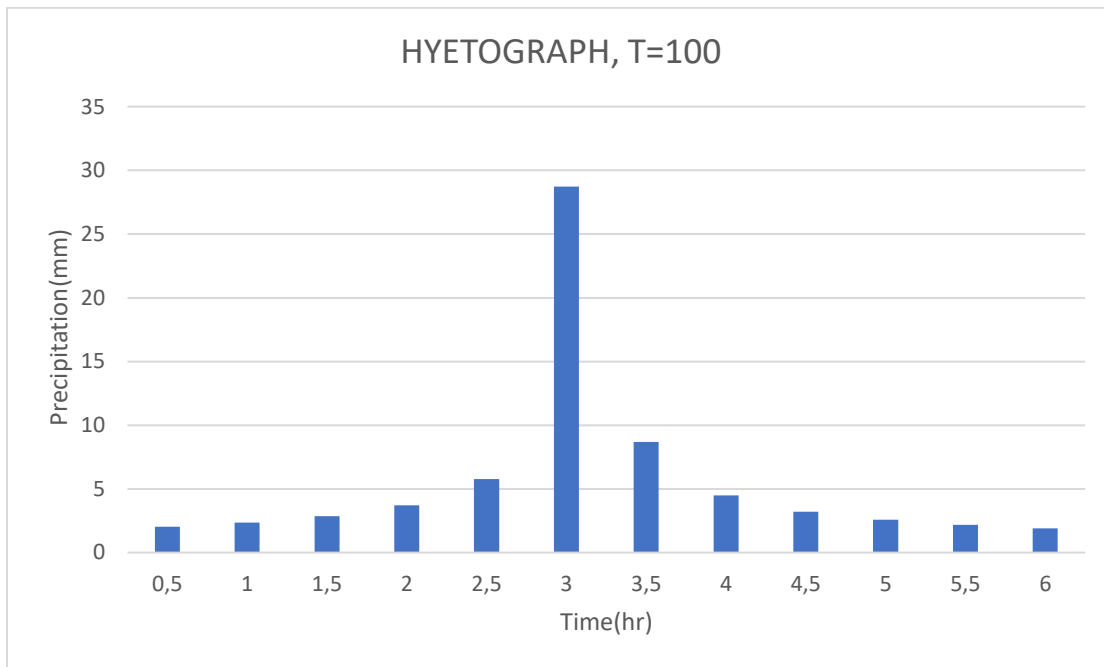


Figure 17 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Kardolakkas river basin.

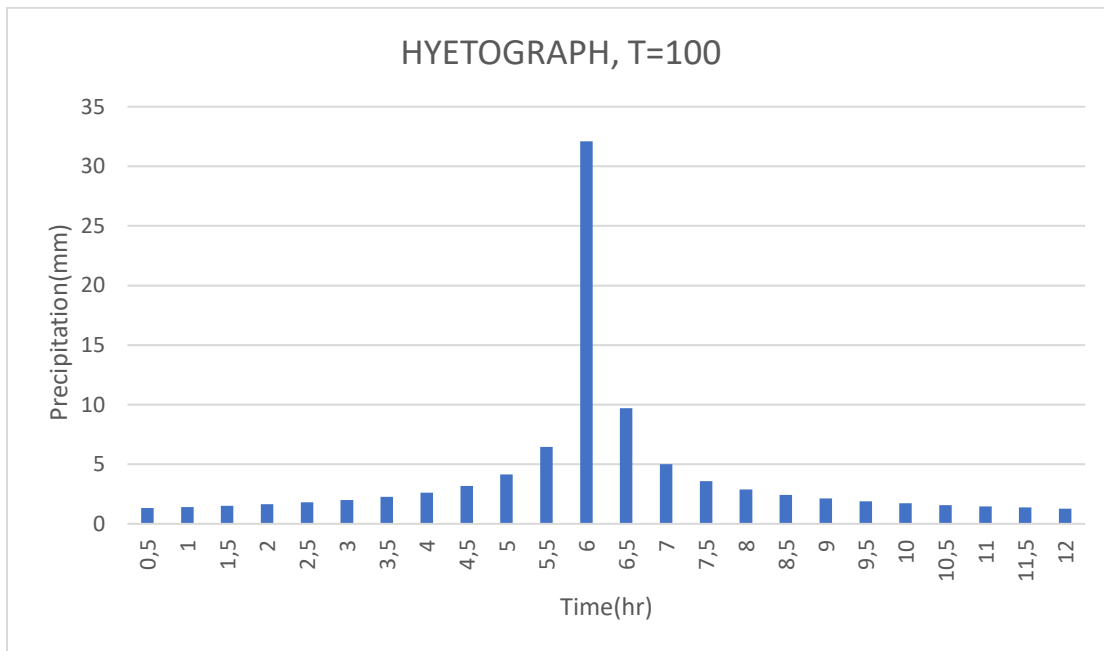


Figure 18 Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years for Leukopigi river basin.

FLOW HYDROGRAPH

The hyetographs above were transmuted into the following flow hydrographs (Figures 19 to 30), via The Hydrologic Modeling System by the Hydrologic Engineering Center, also known as HEC-HMS, software:



Dema river basin:

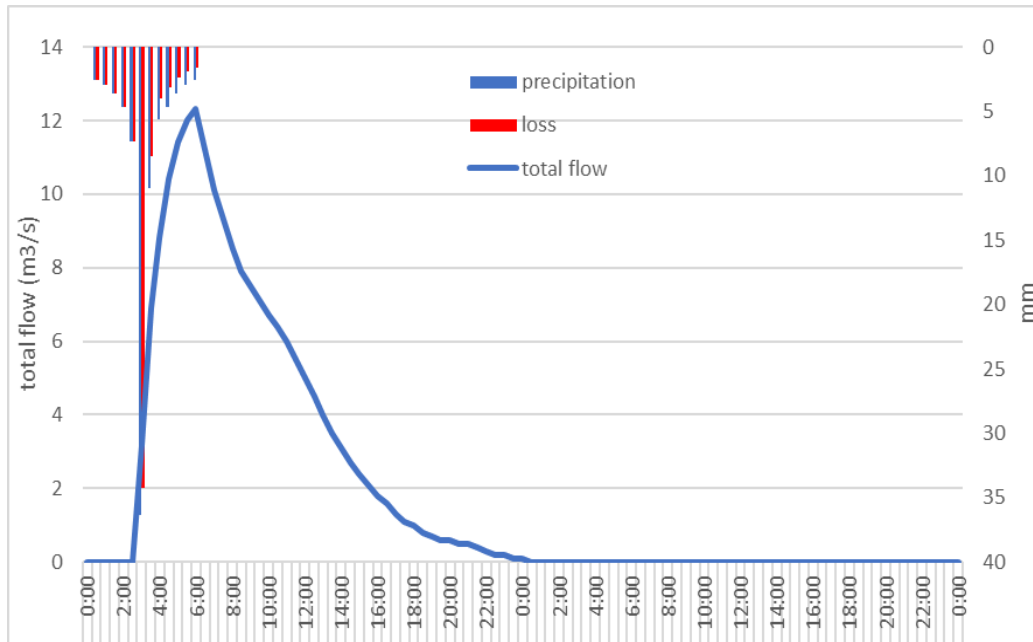


Figure 19 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for dry conditions

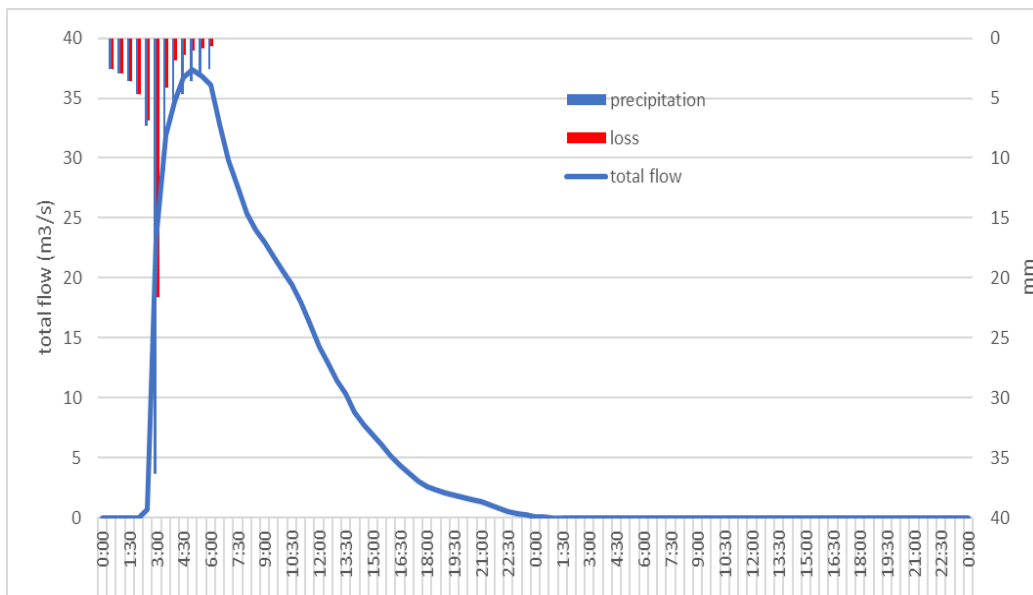


Figure 20 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for normal conditions

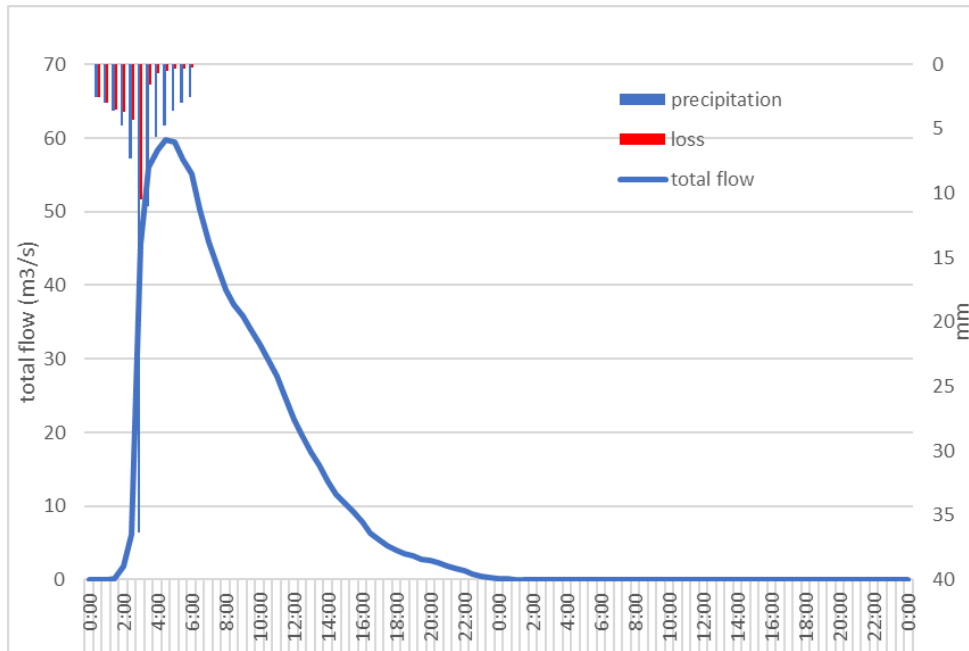


Figure 21 Flow hydrograph at the outlet of Dema subbasin for wet conditions

Tsagkaki river basin:

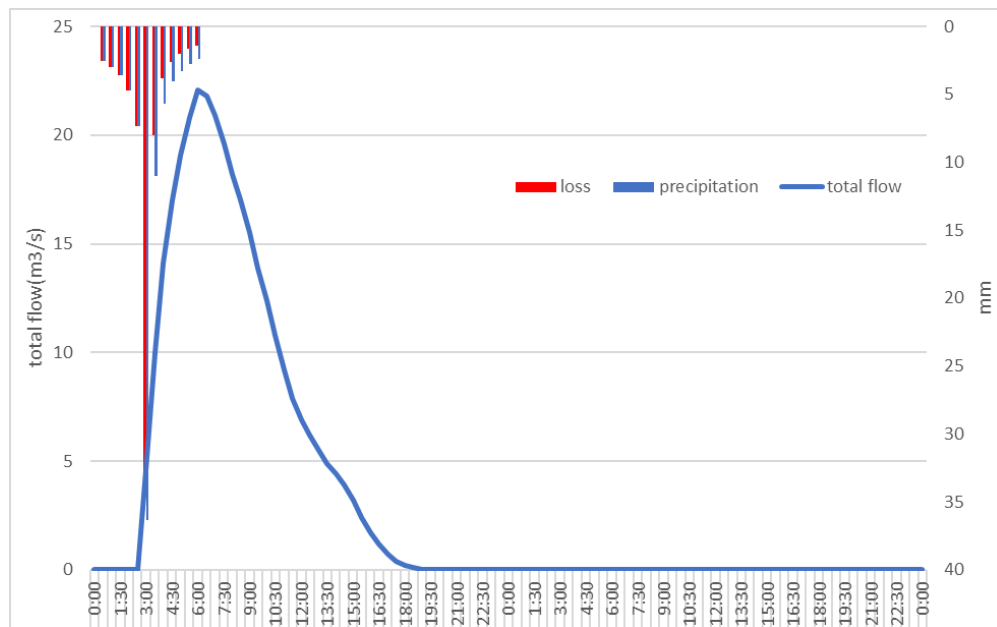


Figure 22 Flow hydrograph at the outlet of Tsagkaki subbasin for dry conditions

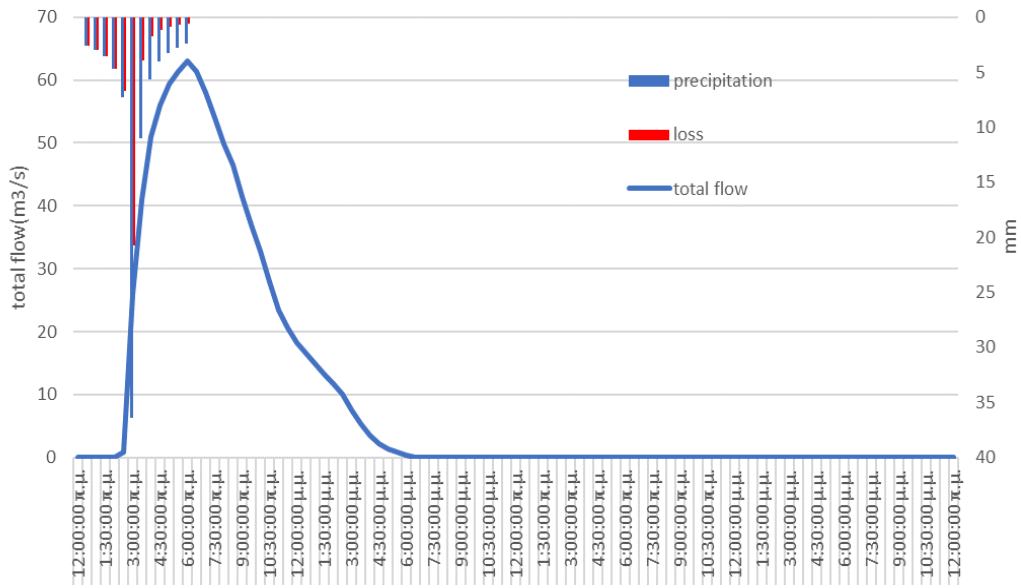


Figure 23 Flow hydrograph at the outlet of Tsagkaki subbasin for normal conditions

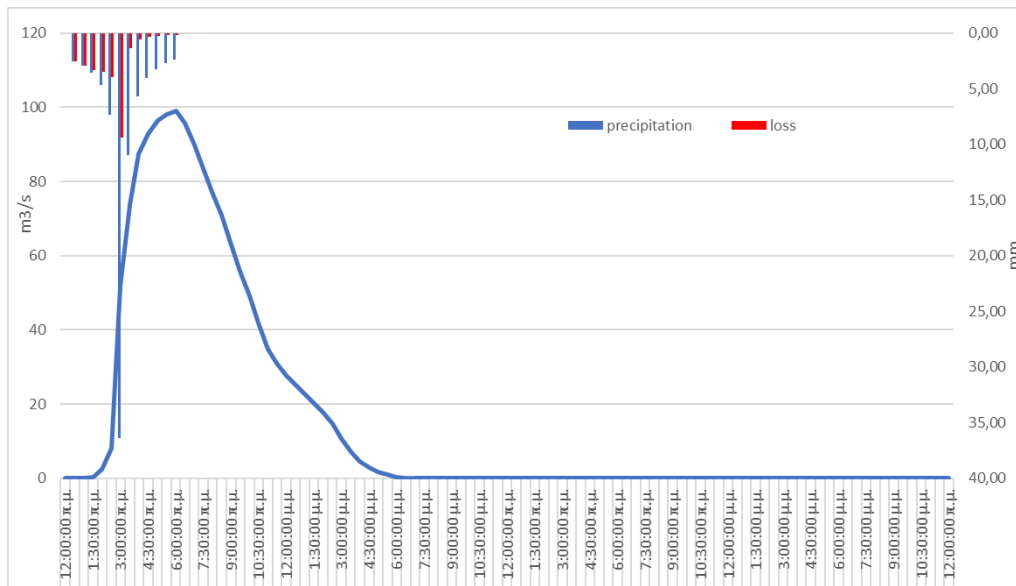


Figure 24 Flow hydrograph at the outlet of Lilas subbasin for wet conditions

Kardolakkas river basin:

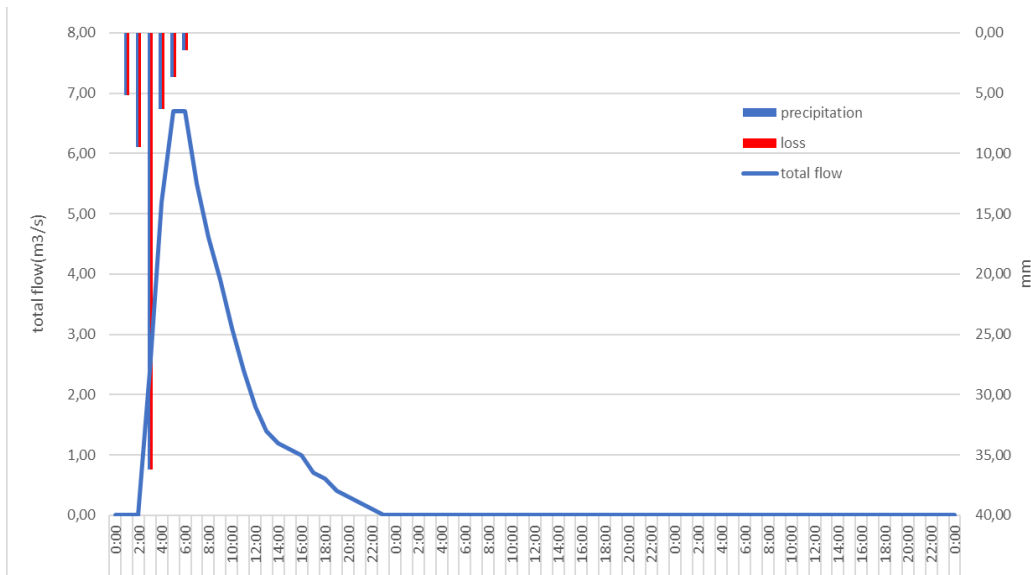


Figure 25 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for dry conditions

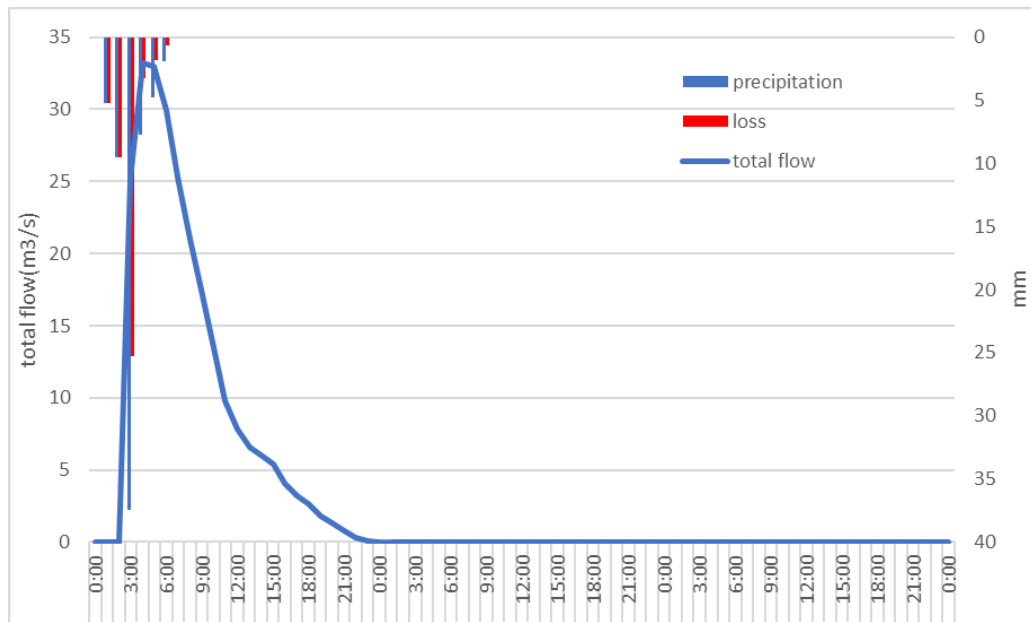


Figure 26 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for normal conditions

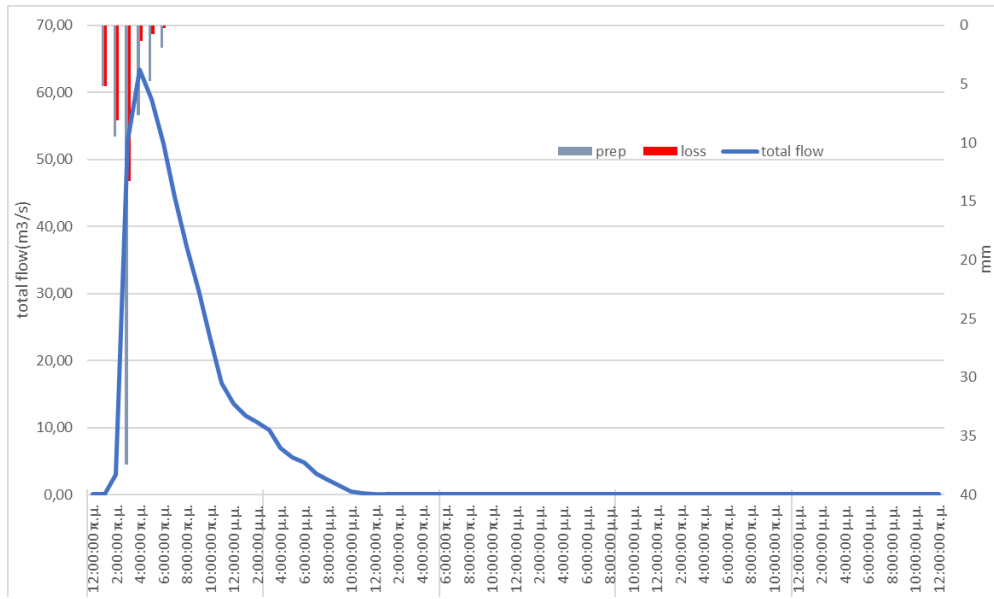


Figure 27 Flow hydrograph at the outlet of Kardolakkas subbasin for wet conditions

Leukopigi river basin:

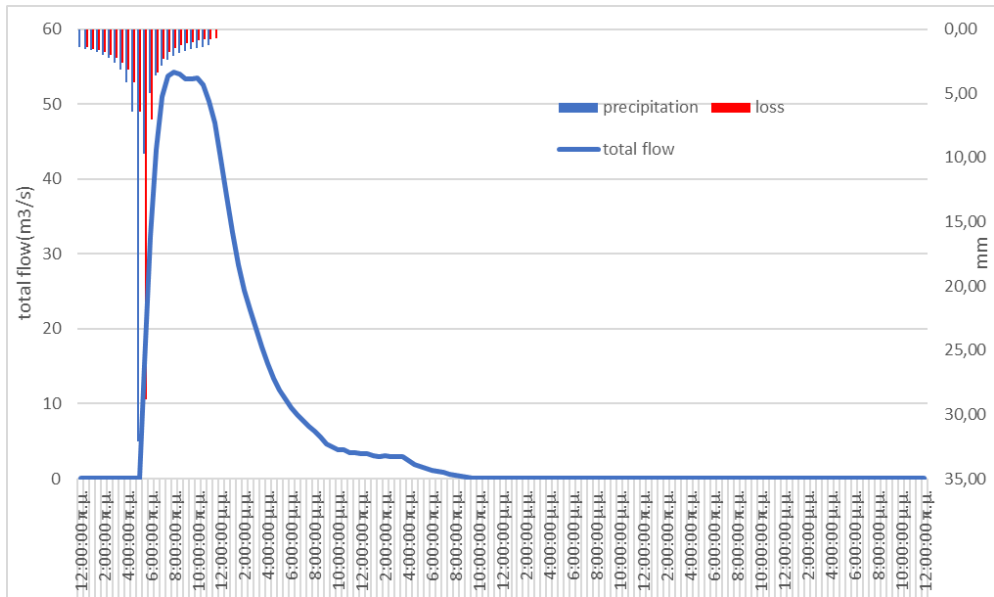


Figure 28 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for dry conditions

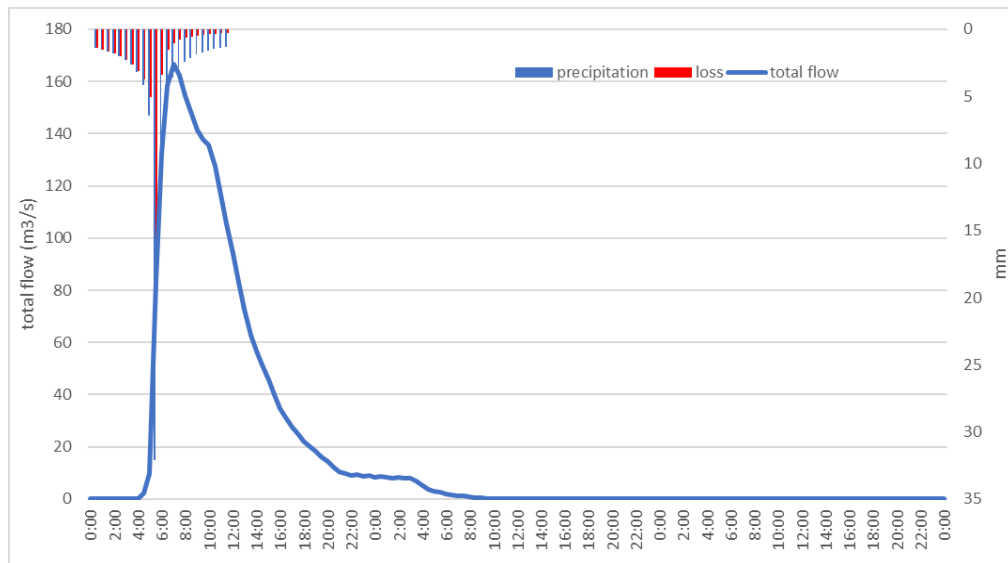


Figure 29 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for normal conditions

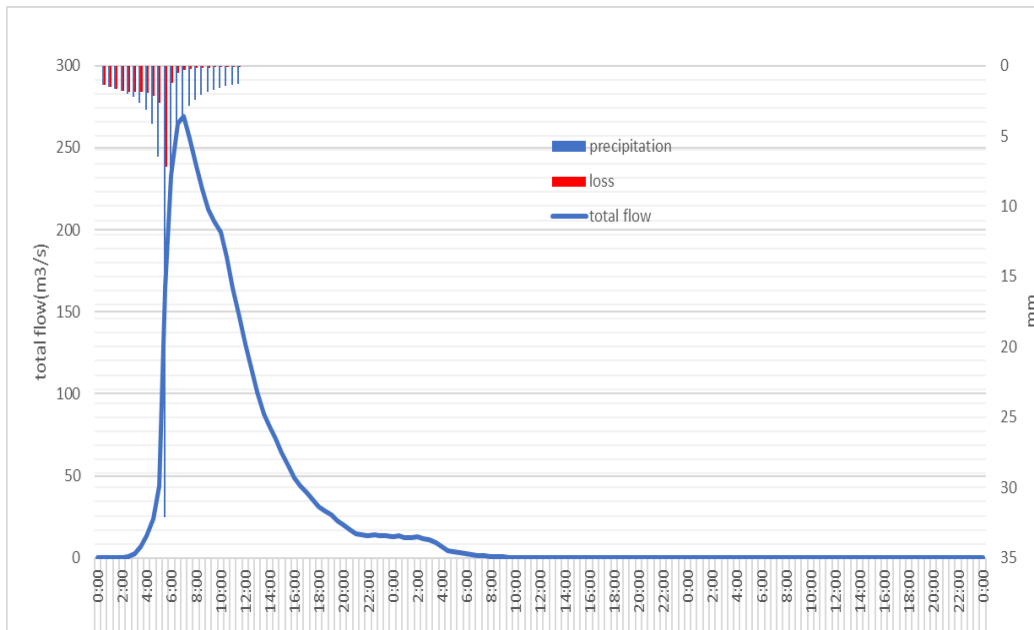


Figure 30 Flow hydrograph at the outlet of Leukopigi subbasin for wet conditions

The methodology was applied for dry, normal and wet conditions, though more information is given in the paper's results. As it was expected, the discharge peak increases as the soil moisture level increases.

GAVRILOVIC MODEL

The application of the equation 7 in the ArcMap environment, resulted in the following map (Figures 31, 32, 33 and 34):

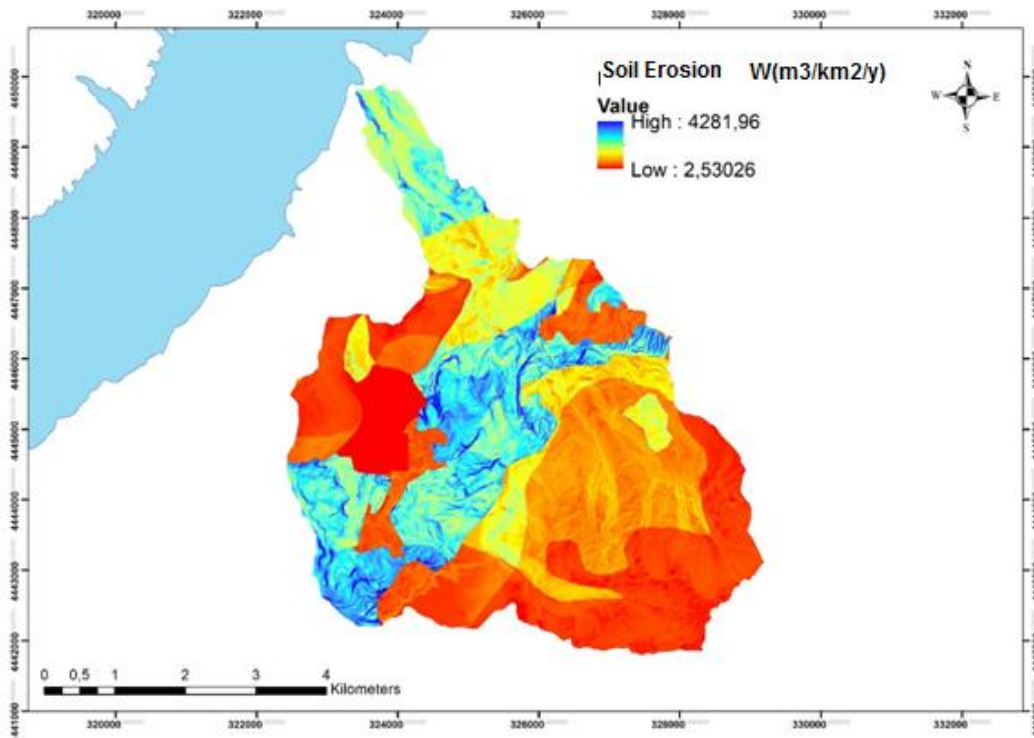


Figure 31 Soil Erosion of Dema river basin estimated by EPM model.

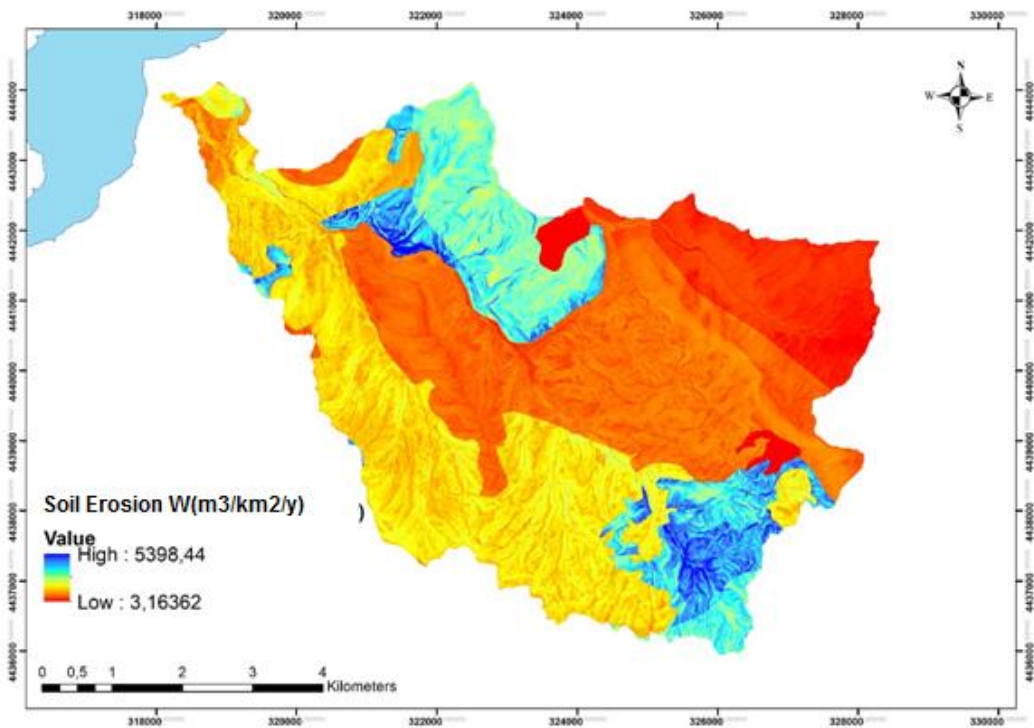


Figure 32 Soil Erosion of Tsagkaki river basin estimated by EPM model.

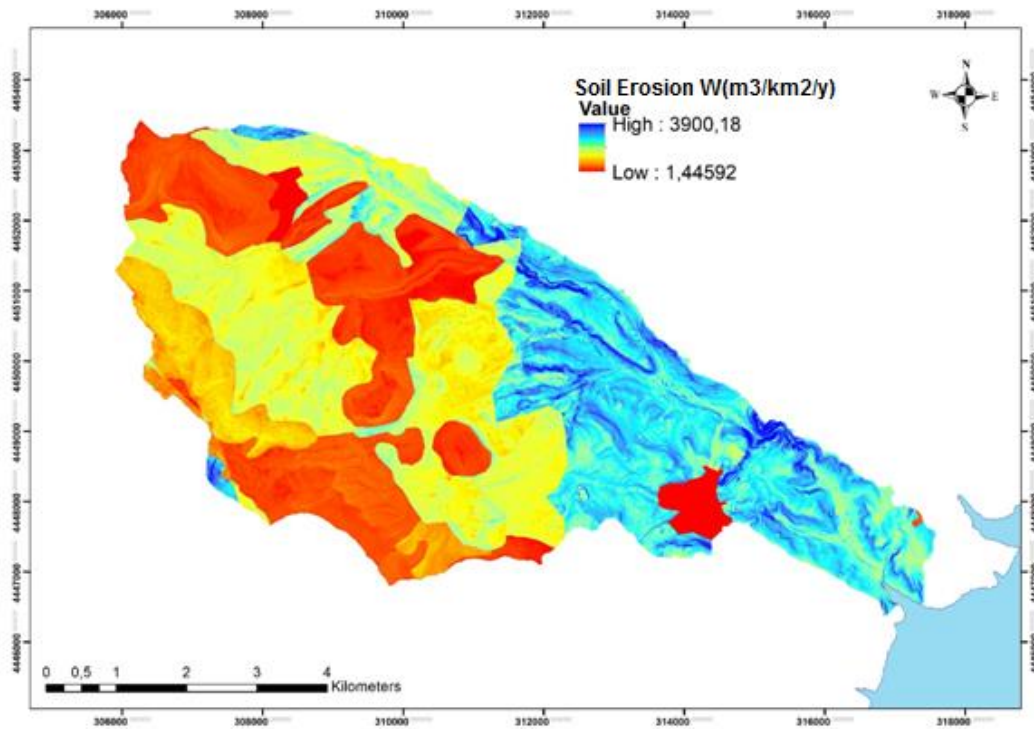


Figure 33 Soil Erosion of Kardolakkas river basin estimated by EPM model.

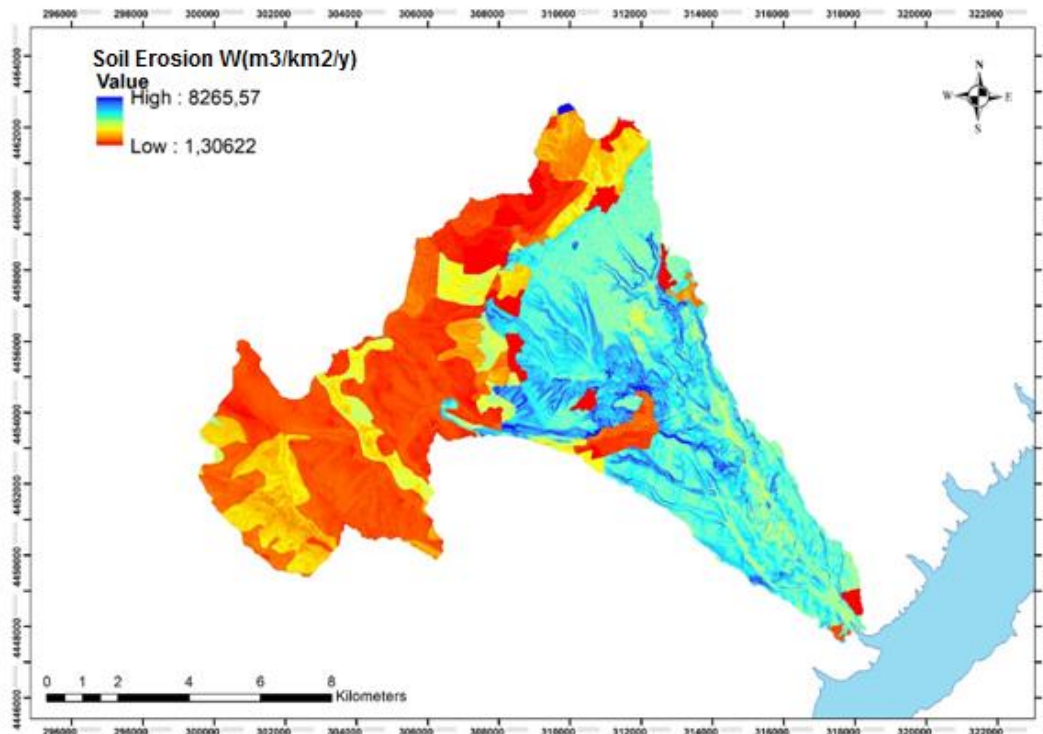


Figure 34 Soil Erosion of Leukopigi river basin estimated by EPM model.



Then, with the use of equation (11) for the Retention coefficient, the sediment discharge at the outlet of the study areas is shown below in Table 7:

Table 7 Results of soil erosion for the studied areas.

EPM MODEL			
Basin	Retention coefficient, R	Soil Erosion (m ³ /y/km ²)	Soil Erosion [t · y ⁻¹]
Dema	0.80	283	23136.78
Tsagkaki	0.85	181	21954.96
Kardolakkas	0.66	399	46107.48
Leukopigi	0.77	448	135656.51

Afterwards, using the Vanoni's equation (1975) the Soil Delivery Ration (SDR) is calculated, therefore the sediment discharge at the outlet of the study areas is shown at Table 8.

Table 8 Results of sediment yield for the studied areas estimated by Vanoni's equation.

Vanoni			
Basin	Soil Delivery Ration (SDR)	Soil Erosion [t · y ⁻¹]	Sediment Yield [t · y ⁻¹]
Dema	0.308	23136.78	7126.13
Tsagkaki	0.294	21954.96	6454.76
Kardolakkas	0.295	46107.48	13601.71
Leukopigi	0.262	135656.51	35542.01

At last, using SCS method the Soil Delivery Ration (SDR) is calculated, and consequently the sediment yield of the study areas is shown at Table 9.

Table 9 Results of sediment yield for the studied areas estimated by USDA-SCS method.

USDA- SCS			
Basin	Soil Delivery Ration(SDR)	Soil Erosion [t · y ⁻¹]	Sediment Yield [t · y ⁻¹]
Dema	0.389	23136.78	9000.21
Tsagkaki	0.372	21954.96	8167.25
Kardolakkas	0.374	46107.48	17244.20
Leukopigi	0.337	135656.51	45716.24

CONCLUSIONS

The river basin of Leukopigi is the one with the biggest annual soil erosion (448 m³/km²/y), while the river basin of Tsagkaki presents the smallest soil erosion (181 m³/km²/y). The



reason that Tsagkaki river basin has the smallest soil erosion is the high percentage of forests and Sclerophyllous vegetation that presents, which inhibit the phenomenon. The river basin of Leukopigi has a high percentage of lake and land deposits, which along with its large amount of agriculture have low resistance in soil erosion. The river basin of Kardolakkas has the second biggest soil erosion ($399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$). It has large amounts of land occupied by agriculture. This land use is not able to inhibit the soil erosion. At last, the river basin of Dema has annual soil erosion $283 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$. This basin presents high lake and land deposits, which cause big rate of soil erosion, despite the presence of forests in the area.

GENERIC CONCLUSIONS

The generic conclusions that emerged from this thesis are the following:

- Soil moisturized levels contribute greatly in the flood discharges,
- The parameters that affect the most the soil erosion are the land use and the geology of the area. The reason for that is that plant cover inhibits the rate of erosion and the rainfall, which are the powerful motivator of erosion.
- Regarding the sediment yield coefficients, it is evident that the Gavrilovic coefficient gives a much higher value of the sediment yield, because it takes into account only the morphological characteristics of the catchment area (perimeter, mean altitude of the basin, main stream length). The SCS and Vanoni coefficient increase with the reduction of the Area of river basins.
- Compared to SCS and Vanoni coefficients, it is concluded that the values of retention coefficient obtained from the empirical equation of SCS are greater than the values obtained from the empirical equation of Vanoni.

SPECIFIC CONCLUSIONS

The specific conclusions of this thesis are the following:

- The excess rainfall of Dema basin for normal conditions is equivalent to 40.5% of the total rainfall. For dry conditions it equals to 5.8% (decrease by 85.7%), where in wet conditions it equals to 71% (increase by 75.8%).
- In Tsagkaki basin, the excess rainfall for normal conditions is equivalent to 43% of total rainfall. The percentages for dry and wet conditions are 8% (decrease by 81.4%) and 74% (increase 72.5%)
- In Kardolakkas basin, the excess rainfall for normal conditions is equivalent to 32% of total rainfall. The percentages for dry and wet conditions are 3.2% (decrease by 90%) and 64.6% (increase 49.9%)



- The excess rainfall of Leukopigi basin for normal conditions is equivalent to 48% of the total rainfall. For dry conditions it equals to 10.3% (decrease by 78.5%), where in wet conditions it equals to 78% (increase by 62%).
- The flow hydrograph for normal conditions peaks at $Q=37.4 \text{ m}^3/\text{s}$. The increase of excess rainfall by 62% in wet conditions causes the peak to increase by 59.7%. As far as the dry conditions the decrease of excess rainfall leads to peak $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$, reduction of 67%.
- In Tsagakki basin, the peak of flow hydrograph for normal conditions is $63 \text{ m}^3/\text{s}$. For dry conditions it peaks at $22.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (reduction of 64.9%), where in wet conditions peaks at $92.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (increase by 47.5%).
- The flow hydrograph for normal conditions in Kardolakkas basin peaks at $33.2 \text{ m}^3/\text{s}$. the reduction of excess rainfall by 90% in wet conditions causes a peak at $6.70 \text{ m}^3/\text{s}$ (decrease by 79.8%). In wet conditions the discharge increases by 90.9% and peaks at $63.4 \text{ m}^3/\text{s}$.
- The peak in flow hydrograph in Leukopigi basin is $166.7 \text{ m}^3/\text{s}$ for normal conditions. In dry conditions peaks at $54.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (decrease by 67.4%), where in wet conditions the decrease of losses which causes increase of 75.8% of excess rainfall, gives a peak at $269.1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- The biggest annual soil erosion has the river basin of Leukopigi ($448 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), the river basin of Kardolakkas has the second place with annual soil erosion of $399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$, third is the basin of Dema $283 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$ and the river basin of Tsagakki is the last one with annual soil erosion $181 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$. The Leukopigi basin has high percentage of land and lake covers together with high percentages of agriculture have slow resistance in erosion.
- Soil erosion is intense in river basin of Kardolakkas ($399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), as the presence of cultivated areas of land and sparse vegetation intensify the rate of the phenomenon.
- The percentages of lake deposits are also high in river basin of Dema. Despite the presence of dolomites in the area, it occurs medium soil erosion.
- Smaller average annual sediment production occurs in the Tsagakki river basin, in which the existence of forests and the geology of the area, dominated by limestone, help inhibit erosion.

FUTURE RESEARCH

Some proposals for future research are:

- In this thesis, the Gavrilovic method was applied for the estimation of soil erosion in the lakeside area of Polyfytos, where the meteorological data are similar for all



four river basins. It is therefore proposed to apply and compare the method between river basins that belong to different water districts where the rainfall and the temperature vary.

- Assessment of soil erosion with a different method and comparing the results.
- Repetition of the hydrological analysis using hydrographs resulting from the worst profile method and comparison of the results of the two methods.



1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην υδρολογική ανάλυση τεσσάρων λεκανών απορροής της παραλίμνιας περιοχής Πολυφύτου και στη διερεύνηση της στερεομεταφοράς στην έκταση των λεκανών. Πραγματοποιείται δηλαδή η κατάρτιση ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος της εδαφικής διάβρωσης.

Η εδαφική διάβρωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα παγκοσμίως, καθώς είναι μια από τις σημαντικότερες απειλές για το περιβάλλον και τις φυσικές πηγές και αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τον κίνδυνο πλημμυρών. Η μείωση της ποιότητας και της παραγωγικότητας των εδαφών που προκαλείται από τη διάβρωση έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της γης. Επίσης, προκαλούνται προσχώσεις υδατορευμάτων και επηρεάζεται πλήθος κατασκευών που σχετίζονται με τα υδάτινα συστήματα (προσχώσεις ταμιευτήρων, αποθέσεις φερτών υλικών σε λιμάνια και εκβολές ποταμών, υποσκαφές σε θεμέλια γεφυρών) (Pandey et al, 2016).

Κατά την υδρολογική ανάλυση, υπολογίζονται τα τελικά πλημμυρογραφήματα εξόδου με βάση τη μέθοδο μετασχηματισμού βροχής σε απορροή του Μοναδιαίου Υδρογράφηματος μέσω των Ισόχρονων Καμπυλών.

Για την διερεύνηση της στερεομεταφοράς, χρησιμοποιείται η μέθοδος Gavrilovic. Συνεκτιμάται η δυσκολία προσδιορισμού των παραμέτρων και η αβεβαιότητα που συνοδεύει τον τελικό υπολογισμό της. Μέσω του περιβάλλοντος ArcGIS, γίνεται διερεύνηση της συνολικής στερεοαπορροής στην έξοδο της λεκάνης του μοντέλου Gavrilovic, εκτιμώντας τους συντελεστές στερεοαπορροής και κατακράτησης αντίστοιχα από εξισώσεις της βιβλιογραφίας.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και η διάρθρωσή της.

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στο υδατικό διαμέρισμα που ανήκει η περιοχή, περιγράφονται τα τοπογραφικά, γεωλογικά, κλιματολογικά χαρακτηριστικά και οι χρήσεις γης, και αναλύονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.



Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα λογισμικά και τα προγράμματα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, μέσω των οποίων υπολογίστηκαν και εκτιμήθηκαν τα τελικά αποτελέσματα. Γίνεται ανάλυση της μεθόδου εξαγωγής των επιλεγμένων λεκανών απορροής σε περιβάλλον ArcGIS, στη συνέχεια 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. Παρουσιάζονται επίσης, η μεθοδολογία αλλά και τα μοναδιαία υδρογραφήματα που προκύπτουν με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών καθώς και ανάλυση της έννοιας του αριθμού καμπύλης απορροής CN και στη συνεισφορά του στην εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων. Τέλος, παρουσιάζεται το λογισμικό HEC-HMS και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των πλημμυρογραφήματων. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες του φαινομένου της διάβρωσης, τα μοντέλα προσομοίωσης της διάβρωσης και η μέθοδος Gavrilovic, η οποία και επιλέχθηκε για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής ανάλυσης και της εδαφικής διάβρωσης και στην συνέχεια υπολογίζεται η στερεοαπορροή χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συγκράτησης Gavrilovic, SCS και Vanoni και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση τόσο των ειδικών συμπερασμάτων, αναφορικά με τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής που επιλέχθηκαν στην παρούσα διπλωματική, αλλά και των γενικών συμπερασμάτων που εξάγονται και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

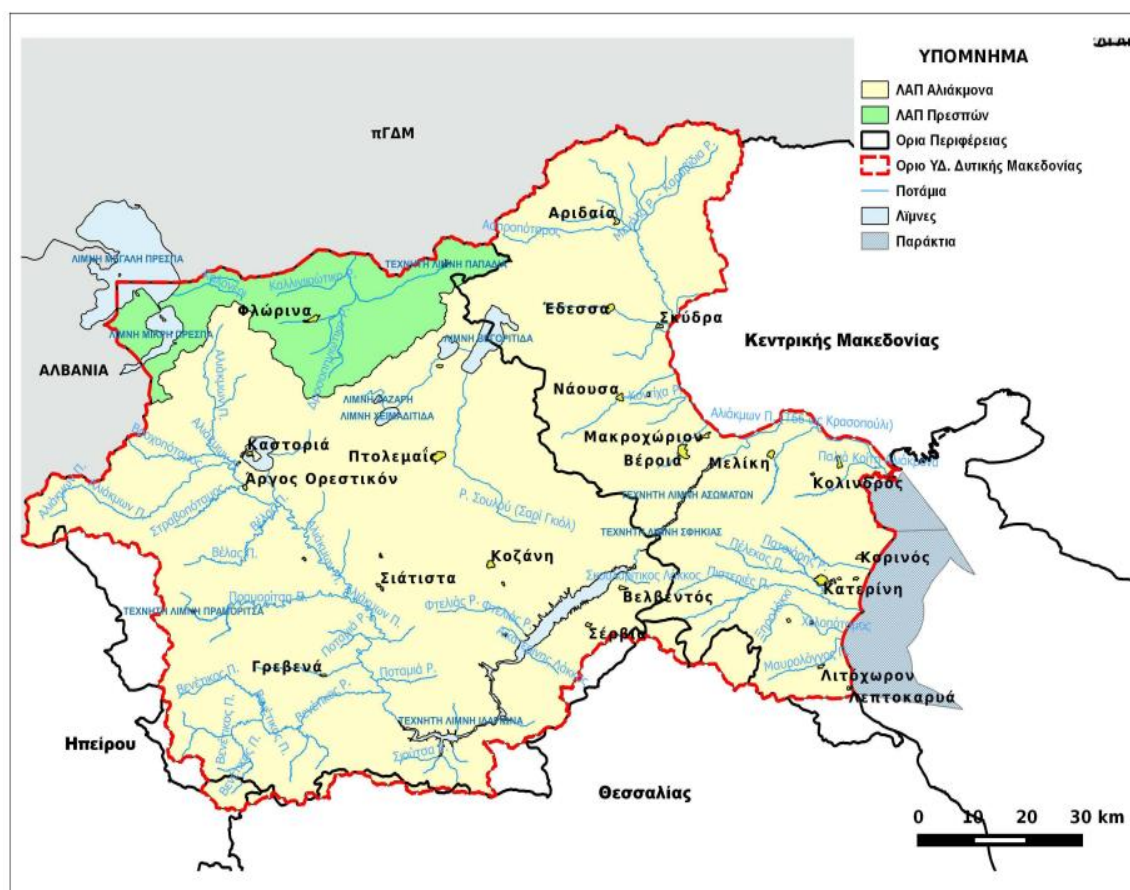
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ- ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η λεκάνη απορροής του Αλιάκμονα, η οποία ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Μακεδονίας. Το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας, (Σχήμα 2.1) έχει έκταση 13615.56 km², και αποτελείται από δύο (2) Λεκάνες Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ):

- Πρεσπών (ΕΛ0901), με έκταση 1209.43 km²
- Αλιάκμονα (ΕΛ0902), με έκταση 12406.13 km².



Σχήμα 2.1 Όρια ΥΔ ΕΛ09 - Λεκάνες Απορροής και * Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα

Το ΥΔ δυτικής Μακεδονίας εντοπίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα της χώρας. Η οριοθέτησή του είναι στα βόρεια από τα σύνορα Ελλάδας – πΓΔΜ, ενώ στα ανατολικά, με κατεύθυνση από βορρά προς νότο, από το όρος Πάικο, την Περιφερειακή Τάφρο και το



Θερμαϊκό Κόλπο. Στα νότια, με κατεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά, από τα όρη Όλυμπος, Καμβούνια και Χάσια και τέλος στα δυτικά, με κατεύθυνση από νότο προς βορρά, από τα όρη Λύγκος, Βόϊο και τα σύνορα Ελλάδας – Αλβανίας. Ανατολικά του ΥΔ βρίσκεται το Υδατικό Διαμέρισμα της Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΔ EL10), στα νότια το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας (ΥΔ EL08) και στα δυτικά το ΥΔ Ηπείρου (ΥΔ EL05).

Κύριες υδρολογικές λεκάνες του διαμερίσματος είναι αυτές του π. Αλιάκμονα (8813 km²), της κλειστής λεκάνης Πτολεμαΐδας (2133 km²), της λεκάνης του π. Αξιού (π. Λύγκος) στο Νομό Φλώρινας (863 km²), και της λεκάνης του ποταμού Αίσωνα ή Μαυρονερίου (815 km²).

Στη ΛΑΠ Αλιάκμονα (EL0902), διακρίνονται τέσσερις επιμέρους υδρολογικές υπολεκάνες. Αυτές είναι οι υπολεκάνες του Αλιάκμονα, της Κλειστής Λεκάνης Πτολεμαΐδας, της Περιφερειακής Τάφρου και της Πεδιάδας Κατερίνης. Η πρώτη, του Αλιάκμονα, και μεγαλύτερη ακολουθεί τα όρια της φυσικής υδρολογικής λεκάνης του ομώνυμου ποταμού (όπου περιλαμβάνεται και η υδρολογική λεκάνη της λίμνης Καστοριάς). Η κλειστή λεκάνη Πτολεμαΐδας οριοθετείται από το ομώνυμο οροπέδιο, που αποστραγγίζεται επιφανειακά στο σύστημα φυσικών λιμνών Βεγορίτιδας, Πετρών, Ζάζαρης και Χειμαδίτιδας, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω τεχνητών καναλιών. Η υπολεκάνη της Περιφερειακής Τάφρου αποστραγγίζει τα νερά των ορεινών όγκων Βερμίου και Βόρα μέσω των κύριων ποταμών Αλμωπαίου, Εδεσσαίου, Αράπιτσα και Τριπόταμου στην Περιφερειακή Τάφρο (Τ66) που αποτελεί και το όριο με το Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΔ EL10). Τέλος, η Πεδιάδα Κατερίνης αναπτύσσεται στο ΝΑ άκρο του Υδατικού Διαμερίσματος και αποτελείται από πολλές σχετικά μικρές υδρολογικές λεκάνες με κυριότερη αυτή του ρέματος Μαυρονέρι, που απορρέουν στο Θερμαϊκό Κόλπο (ΥΠΕΝ, 2017).

Οι κύριες υπολεκάνες του π. Αλιάκμονα, εκτός της υπολεκάνης της Περιφερειακής Τάφρου, είναι αυτές του Βενέτικου (871 km²), Προμόρτσα (386 km²), Εδεσσαίου (292 km²), Τριπόταμου (252 km²), Αραπίτσα (178 km²) και του Γρεβενίτικου (117 km²). Επίσης, περιλαμβάνει και την υπολεκάνη της λίμνης Καστοριάς με μικρότερη έκταση (352 km²), εξίσου αξιόλογη.

Στο ΥΔ09 «Δυτική Μακεδονία» υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός λιμνών, τόσο φυσικών όσο και τεχνητών. Αυτές, ανήκουν στις σπουδαιότερες της χώρας, από περιβαλλοντική – οικολογική αλλά και από ενεργειακή άποψη.

Πιο συγκεκριμένα, εντός της περιοχής του ΥΔ καταγράφεται και η τεχνητή λίμνη Πολύφυτου στον π. Αλιάκμονα. Η λίμνη δημιουργήθηκε το 1975 από τη ΔΕΗ με κύριο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λεκάνη απορροής της λίμνης έχει έκταση



5630 km², περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα των επαρχιών Κοζάνης και Βοΐου της Π.Ε. Κοζάνης, καθώς και των Π.Ε. Γρεβενών και Καστοριάς και περικλείεται από τα όρη Βόιο, Β. Πίνδο, Καμβούνια, Πιέρια, Άσκιο, Βέρνο και Τρικλάριο. Η λίμνη έχει στενόμακρο σχήμα, με μέγιστο πλάτος 2.5 km, ενώ ανάλογα με το ισοζύγιο εισροών–εκροών το μήκος της λίμνης μεταβάλλεται από 22 km έως 31 km. Η ωφέλιμη χωρητικότητα της λίμνης ανέρχεται σε 1.220x10⁶ m³ και η επιφάνειά της στα 74 km², ενώ η μέγιστη στάθμη λειτουργίας της βρίσκεται στο +291m (ΥΠΕΝ, 2018).

2.1.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

“Τα πετρώματα που καλύπτουν τον Ελλαδικό χώρο μπορούν να διακριθούν από πλευράς ηλικίας και τεκτονικής, σε τρία μεγάλα συγκροτήματα: Προαλπικά (Παλαιοζωικός ή παλαιότερος αιώνας), Αλπικά (Τριαδική περίοδος του Μεσοζωικού αιώνα έως κάτω Μειόκαινου εποχή της Νεογενούς περιόδου του Καινοζωικού αιώνα) και Μεταλπικά (νεότερα της κάτω Μειόκαινου εποχής).” (Δερμιτζάκης Μ. Δ. & Λέκκας Σ. Π., 2010).

Το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας, στο οποίο περιλαμβάνεται η ΛΑΠ Αλιάκμονα και η ΛΑΠ Πρεσπών, παρουσιάζει μία ιδιαίτερα σύνθετη γεωλογική, τεκτονική και υδρογεωλογική δομή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έκτασή του καταλαμβάνει μία σειρά ζωνών, οι οποίες - από τα ανατολικά προς τα δυτικά - είναι: η ζώνη της Αλμωπίας (υποζώνη της ζώνης Αξιού), η Πελαγονική και υποπελαγονική ζώνη, καθώς και η ζώνη της Πίνδου. Η στρωματογραφική εικόνα της περιοχής συμπληρώνεται από τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας, τις αποθέσεις του Νεογενούς και τις νεώτερες Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Γεωτεκτονικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, όλη η Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας ανήκει στην Πελαγονική Ζώνη, η οποία καλύπτει το μισό περίπου τμήμα της, και στη Ζώνη της Πίνδου.



Rh	Μάζα της Ροδόπης	Al	Ζώνη Αλμωπίας	P	Ζώνη Πίνδου
Stp	Σερβομακεδονική Μάζα	Pl	Πελαγονική Ζώνη	G	Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης
CR	Περιοδοπική Ζώνη	AC	Αττικο-Κυκλαδική Ζώνη	I	Ιόνιος Ζώνη
Pe	Ζώνη Παιανίας	Sp	Υποπελαγονική Ζώνη	Px	Ζώνη Παξών ή Προσπούλιος Ζώνη
Pa	Ζώνη Πάικου	Pk	Ζώνη Παρασσού - Γκιώνας	Au	Ενότητα Ταλέα Όρη - Πλακώδες ασβεστόλιθοι

Σχήμα 2.2 Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας (πηγή: geo.auth.gr)

Η Πελαγονική Ζώνη ανήκει σε μια ευρύτερη ομάδα ζωνών που ονομάζονται «Εσωτερικές Ελληνίδες» και η Ζώνη της Πίνδου στην ομάδα ζωνών γνωστές ως «Εξωτερικές Ελληνίδες». Οι σχηματισμοί της ζώνης αυτής αποτέθηκαν μετά την τελική πτύχωση των αλπικών σχηματισμών που είχε ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των Ελληνίδων οροσειρών και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως μεταλπικοί σχηματισμοί. Οι σχηματισμοί



αυτοί αποτελούνται κυρίως από κλαστικά ιζήματα, θαλάσσιας, λιμναίας ή χερσαίας φάσης και βρίσκονται πάντα ασύμφωνα πάνω στους υποκείμενους σχηματισμούς.

Πιο αναλυτικά, η Ζώνη Πίνδου αναπτύσσεται στο όρος Γράμμος και περιλαμβάνει μία αλληλουχία σχηματισμών, οι οποίοι από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους – είναι: Οριζοντας Τριαδικών σχηματισμών, Ασβεστόλιθοι Δρυμού, Ραδιολαρίτες. Πρώτος φλύσσης, Άνω κρητιδικοί ασβεστόλιθοι, Ζώνη μετάβασης, αποτελούμενη από μία σειρά σχηματισμών μετάβασης από τον υπερκείμενο ασβεστόλιθο στον υποκείμενο φλύσχη και Δεύτερος φλύσσης. Η Πελαγονική Ζώνη διακρίνεται στις παρακάτω ακολουθίες: Το παλαιοζωικό κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, τους σχηματισμούς του Νεοπαλαιοζωικού, το Τριαδικο-Ιουρασικό ανθρακικό κάλυμμα, τους οφιόλιθους και τα συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας, τους άνω κρητιδικούς σχηματισμούς και το φλύσχη (ΥΠΕΝ, 2018).

Όσον αφορά το ανάγλυφο του υδατικού διαμερίσματος, επειδή μόνο το 30% της έκτασης του ΥΔ βρίσκεται κάτω από τα 600 m, χαρακτηρίζεται κατά βάση ως ορεινό-ημιορεινό. Υπάρχουν εννέα κορυφές με υψόμετρο άνω των 2000 m, με χαρακτηριστικότερη αυτή του Ολύμπου (Μύτικας, 2917m). Στο δυτικό και κεντρικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος διακρίνονται δύο μεγάλοι ορεινοί όγκοι με διεύθυνση Β–Ν. Ανάμεσα σε αυτούς τους ορεινούς όγκους διακρίνονται οι επίπεδες εκτάσεις της Καστοριάς, Φλώρινας, Πτολεμαΐδας και Γρεβενών. Στο ανατολικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος το ανάγλυφο γίνεται ομαλό και κυριαρχούν οι πεδινές εκτάσεις της Έδεσσας, της Νάουσας, της Βέροιας και της Πιερίας. Η ακτογραμμή του ΥΔ είναι σχεδόν ευθεία, με ήπιο ανάγλυφο και συνολικό μήκος 80 km. Χαρακτηριστικά της ακτογραμμής είναι η ύπαρξη της λιμνοθάλασσας των αλυκών του Κίτρος και του δέλτα της εκβολής του Αλιάκμονα. (ΥΠΕΝ, 2017)

2.1.3 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το υδατικό διαμέρισμα χαρακτηρίζεται από αρκετά μεγάλη κλιματική ποικιλία. Σε αυτό συμβάλλουν η γεωγραφική του θέση και το έντονο ανάγλυφό του. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του έχει ηπειρωτικό κλίμα. Τα ορεινά του τμήματα έχουν ορεινό κλίμα καθώς επίσης τα παράκτια τμήματά του χαρακτηρίζονται από θαλάσσιο κλίμα.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 14.5 και 17°C, με ψυχρότερο μήνα τον Ιανουάριο και θερμότερο τον Ιούλιο. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 600 μέχρι 1000 mm, ενώ στα ορεινά τμήματα ξεπερνάει και τα 1200 mm. Οι χιονοπτώσεις είναι αρκετά συνηθισμένες κατά το διάστημα Σεπτεμβρίου – Απριλίου. Σύμφωνα με επεξεργασμένα στοιχεία της περιόδου 1980 – 2001 (ΥΠΑΝ, 2008), η μέση ετήσια βροχόπτωση για όλη την έκταση του ΥΔ09 ανέρχεται σε 729 mm.



2.1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τον προσδιορισμό των συντελεστών που σχετίζονται με τη χρήση γης, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο γεωχωρικών δεδομένων Corine Land Cover (CLC) για το έτος 2018, από την ιστοσελίδα του ελεύθερου για χρήση, Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service (land.copernicus.eu). Το Corine Land Cover αποτελεί μία ταξινόμηση των χρήσεων γης σε 44 κατηγορίες. Στο πρόγραμμα αυτό, πραγματοποιείται η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από κατάλληλους δορυφόρους και επίγεια συστήματα μετρήσεων για την επιφάνεια της Γης. Με τη χρήση του shapefile που διατίθεται στην ιστοσελίδα, γίνεται η εισαγωγή του στο ArcGIS και συνδέεται μέσω της εντολής symbology με το αρχείο word .lyr από το site: <http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover-legend-layer-file/view>, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η χρωματική παλέτα με βάση τα πρότυπα του CORINE (Θεοχάρη Α., 2018).

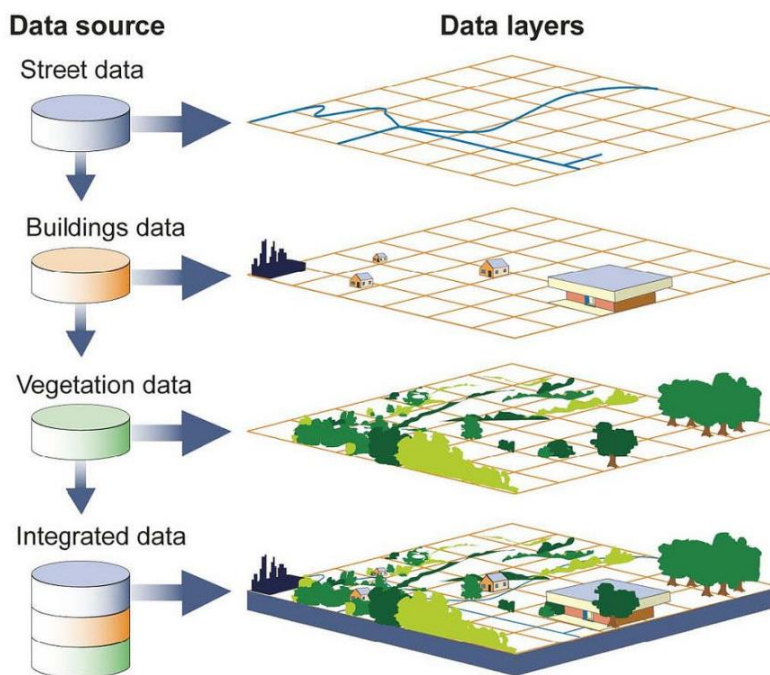
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ArcMap (έκδοση 10.5)



ArcGIS

Με σκοπό την υδρολογική προσομοίωση των επιλεγμένων λεκανών απορροής, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός γεωμορφολογικών και υδρολογικών στοιχείων της περιοχής μελέτης. Η προσομοίωση γίνεται με τη χρήση ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS-Geographical Information System).



Σχήμα 3.1 Σύνθεση χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων GIS

(πηγή: nationalgeographic.org)

“Τα Συστήματα Γεωχωρικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), γνωστά και ως Geographical Information Systems (G.I.S.) διαφέρουν από άλλα συστήματα πληροφοριών, στο ότι διαχειρίζονται σύνθετες πληροφορίες και σχέσεις του χώρου και χρησιμοποιούνται για να λύσουν χωρικά προβλήματα ή προβλήματα που έχουν κάποια χωρική διάσταση”. (Κάβουρας Μ., Δάρρα Α., Κονταξάκη Σ., & Τομαή Ε., 2016).

Μέρος του λογισμικού του προγράμματος ArcGIS, που παρέχει το Environmental Systems Research Institute (ESRI), με έδρα στις Ηνωμένες Πολιτείες, είναι το ArcMap, στο περιβάλλον του οποίου εισήχθησαν τα διάφορα δεδομένα. Επίσης, έγινε η χρήση και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension), επέκταση του προγράμματος ArcGIS (USACE, 2013).

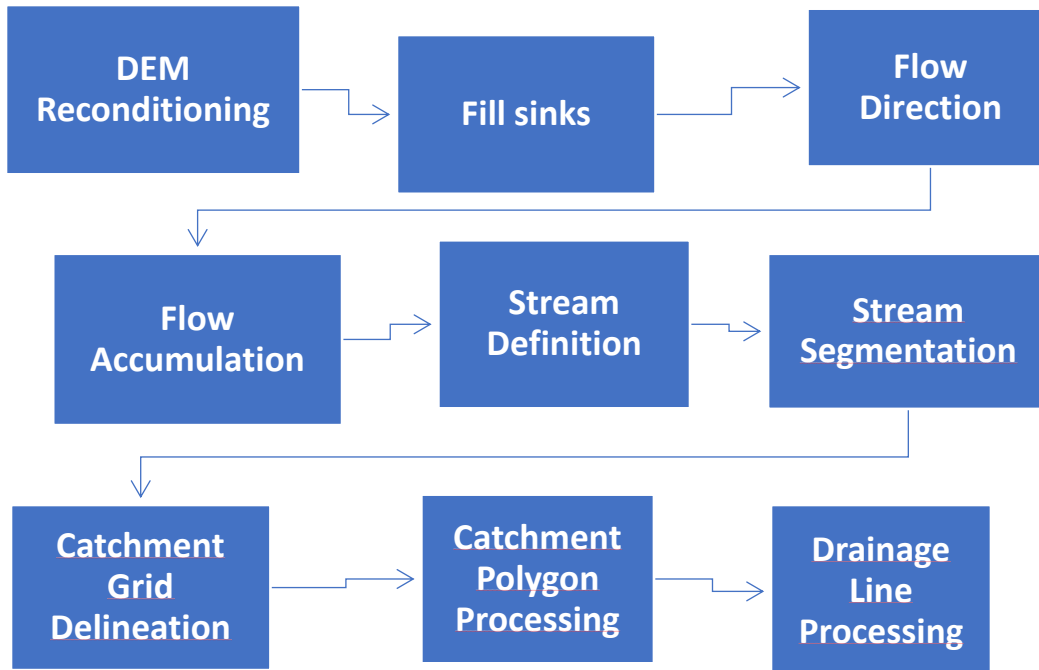
3.1.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ HEC-GeoHMS

Με στόχο τον ορισμό των λεκανών απορροής που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται η γεωμορφολογική ανάλυση της περιοχής. Για την παραγωγή των απαραίτητων στοιχείων για την υδρολογική προσομοίωση της περιοχής μελέτης,



απαιτείται η επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χορηγήθηκε σε αρχείο raster και με ανάλυση 5 m x 5 m (Ε.Κ.Χ.Α. Α.Ε.).

Η προσομοίωση πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας δενδρικού τύπου διαδικασίας, με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC–GeoHMS και το πακέτο εντολών του Preprocessing, και περιγράφεται σχηματικά στο επόμενο Σχήμα 3.2, (Fleming & Doan, 2013).



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας Ψ.Μ.Ε.

Πιο αναλυτικά :

- DEM Reconditioning: Τα κελιά του ψηφιακού μοντέλου εδάφους επεξεργάζονται και τροποποιούνται κατάλληλα με σκοπό τη διόρθωση των ενδεχομένων λανθασμένων υψομέτρων κατά την υψομετρική αποτύπωση.
- Fill Sinks: Οι διάφορες ασυνέχειες που υπάρχουν στο DEM, δηλαδή περιοχές στις οποίες το υψόμετρο έχει καταγραφεί εσφαλμένα ως μηδενικό ή δεν υπάρχει καθόλου πληροφορία, διορθώνονται αυξάνοντας τοπικά το υψόμετρο των φατνίων στο επίπεδο της περιβάλλουσας περιοχής.

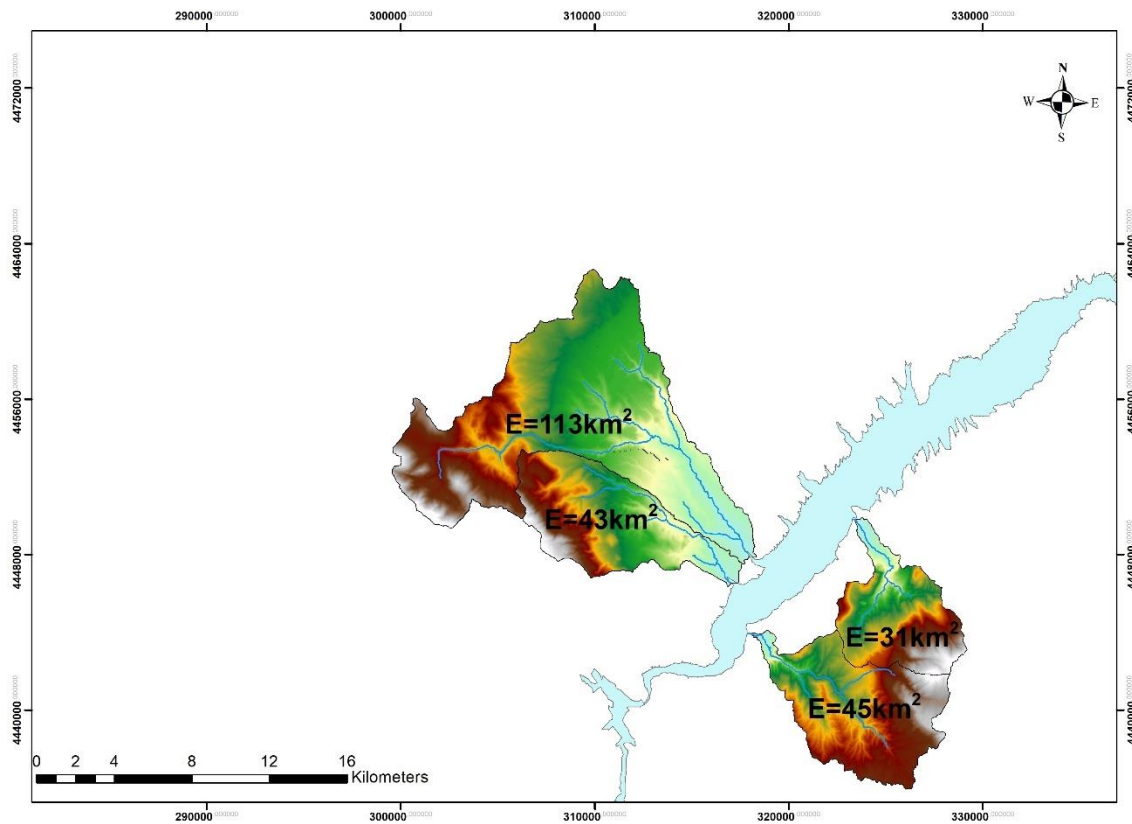


- **Flow Direction:** Με το εργαλείο δημιουργείται ο κানাβος διεύθυνσης απορροής, ο οποίος μας δείχνει τη διεύθυνση της ροής σε κάθε φατνίο. Για την παραγωγή του κανάβου κατευθύνσεων απορροής, χρησιμοποιείται το Μοντέλο Απορροής 8 Διευθύνσεων (Jenson & Domingue, 1988).
- **Flow Accumulation:** εξάγεται ο κানাβος συγκεντρωτικής ροής. Υπολογίζεται δηλαδή, ο αριθμός των ανάντη φατνίων που απορρέει σε ένα συγκεκριμένο φατνίο. Η περιοχή που απορρέει στο εν λόγω φατνίο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη τιμή της συγκέντρωσης ροής με το εμβαδόν του φατνίου.
- **Stream Definition:** Με την εντολή ταξινομούνται όλα τα φατνία με συγκέντρωση ροής μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή που επιλέγει ο χρήστης ως φατνία που ανήκουν σε ένα υδατόρευμα. Τα φατνία που επιλέγονται αποτελούν και το δίκτυο ροής.
- **Stream Segmentation:** Με το συγκεκριμένο εργαλείο το δίκτυο υδατορεύματος διαιρείται και διαχωρίζεται σε μικρότερα τμήματα. Τμήματα του υδατορεύματος είναι τα σημεία εκείνα που συνδέουν επιτυχώς δύο κόμβους.
- **Catchment Grid Delineation:** Με την εντολή αυτή οριοθετούνται και σχεδιάζονται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα υδατορέματος που προέκυψε στην προηγούμενη εντολή.
- **Catchmen Polygon Processing:** Ο κানাβος των υπολεκανών του προηγούμενου βήματος μετατρέπεται σε διανυσματική μορφή (vector).
- **Drainage Line Processing:** Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή κανάβου σε διανυσματική μορφή.

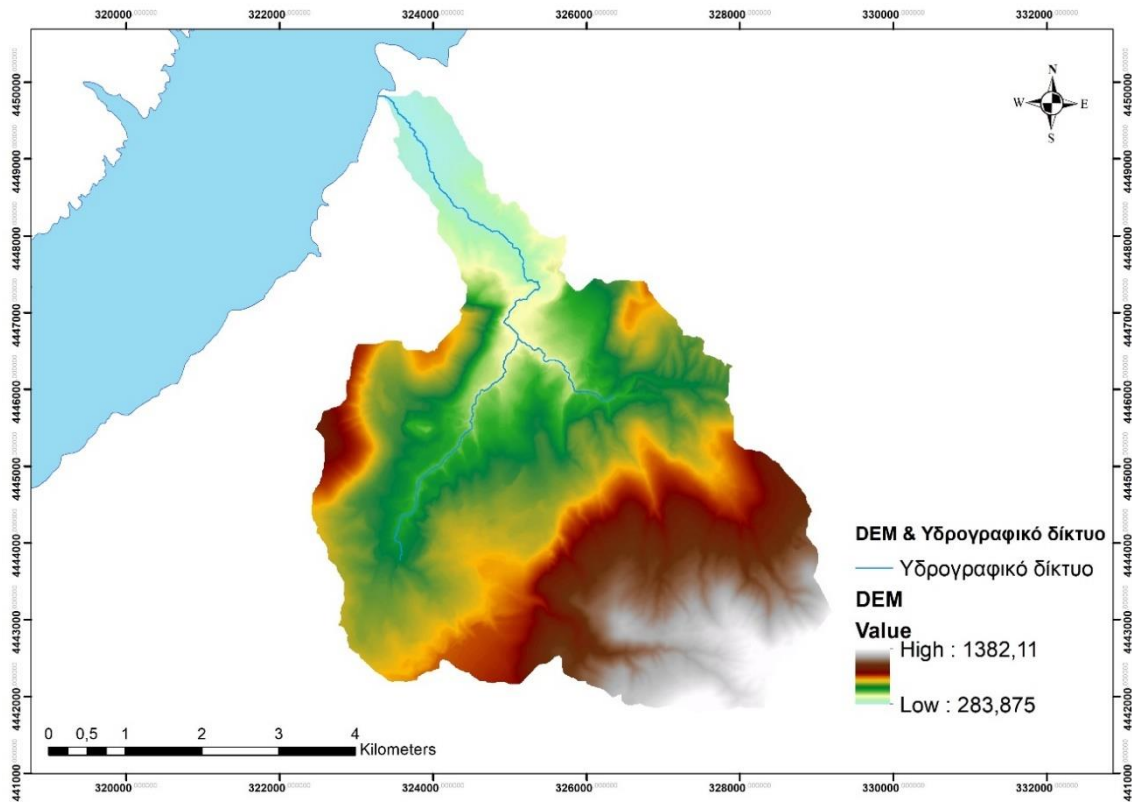
Με βάση την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν οι 4 λεκάνες απορροής, που απεικονίζονται στους παρακάτω χάρτες (Σχήμα 3.3 έως 3.7) και οι οποίες και ανήκουν στη ΛΑΠ Αλιάκμονα. Ακόμη, παρουσιάζονται τα κυριότερα στοιχεία τους στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

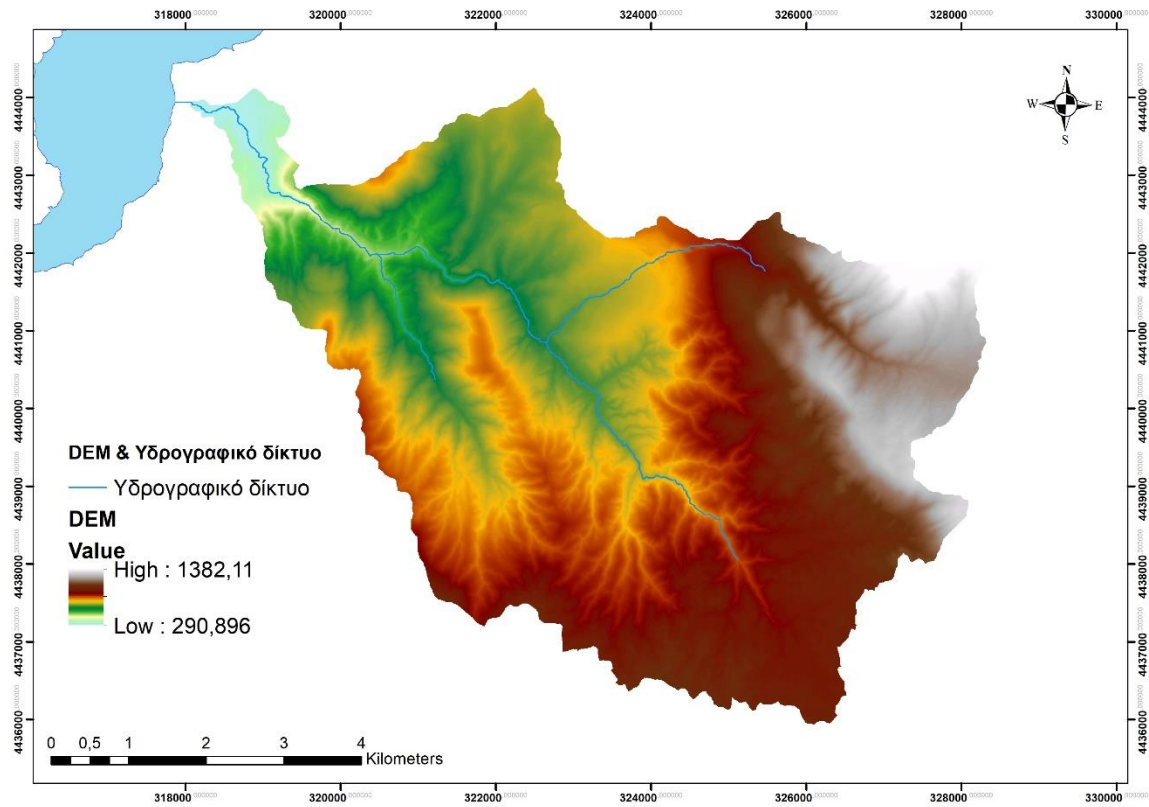
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ (km ²)	ΜΗΚΟΣ ΚΥΡΙΟΥ ΥΔΑΤΟΡΕΜΑΤΟΣ (m)	ΜΕΣΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ H _{mean} (m)	Μέση κλίση (%)
Δέμα	31	9.2	778	31.03
Τσάγκακη	45	12	846.35	30.71
Καρδόλακκα	43	12.4	673.6	24.18
Λευκοπηγή	113	25.15	756.14	20.67



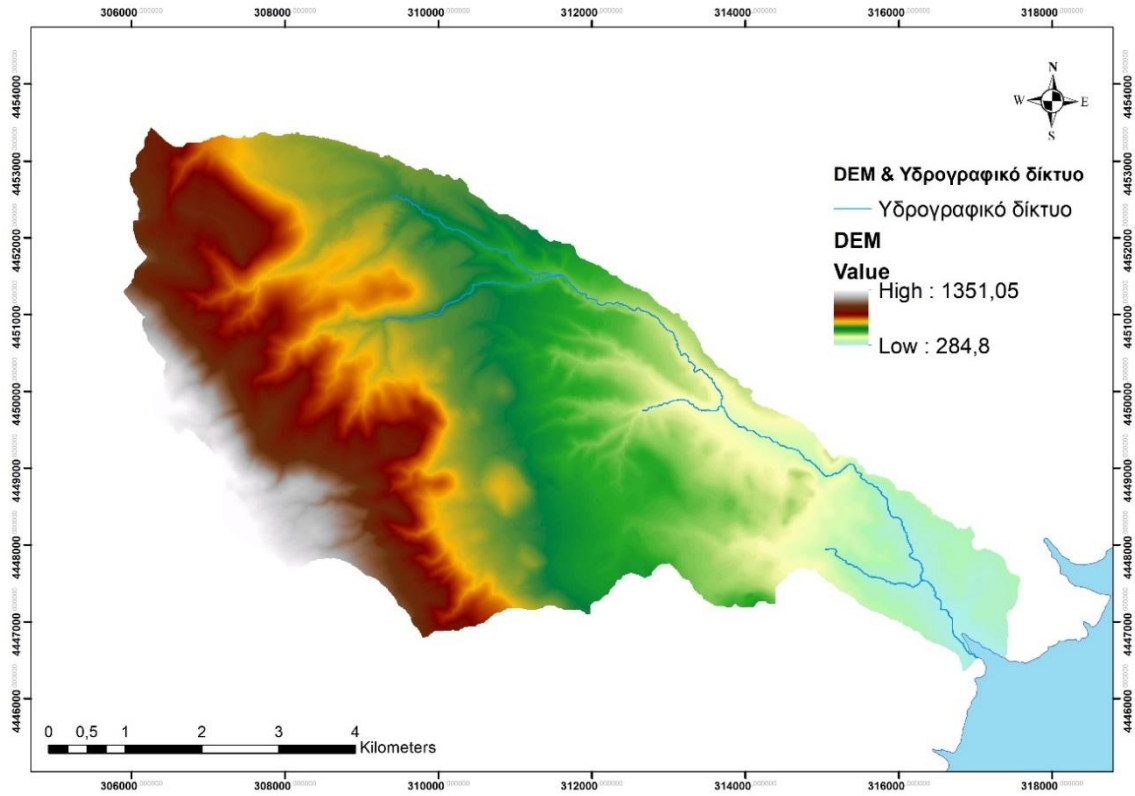
Σχήμα 3.3 Εξεταζόμενες λεκάνες απορροής.



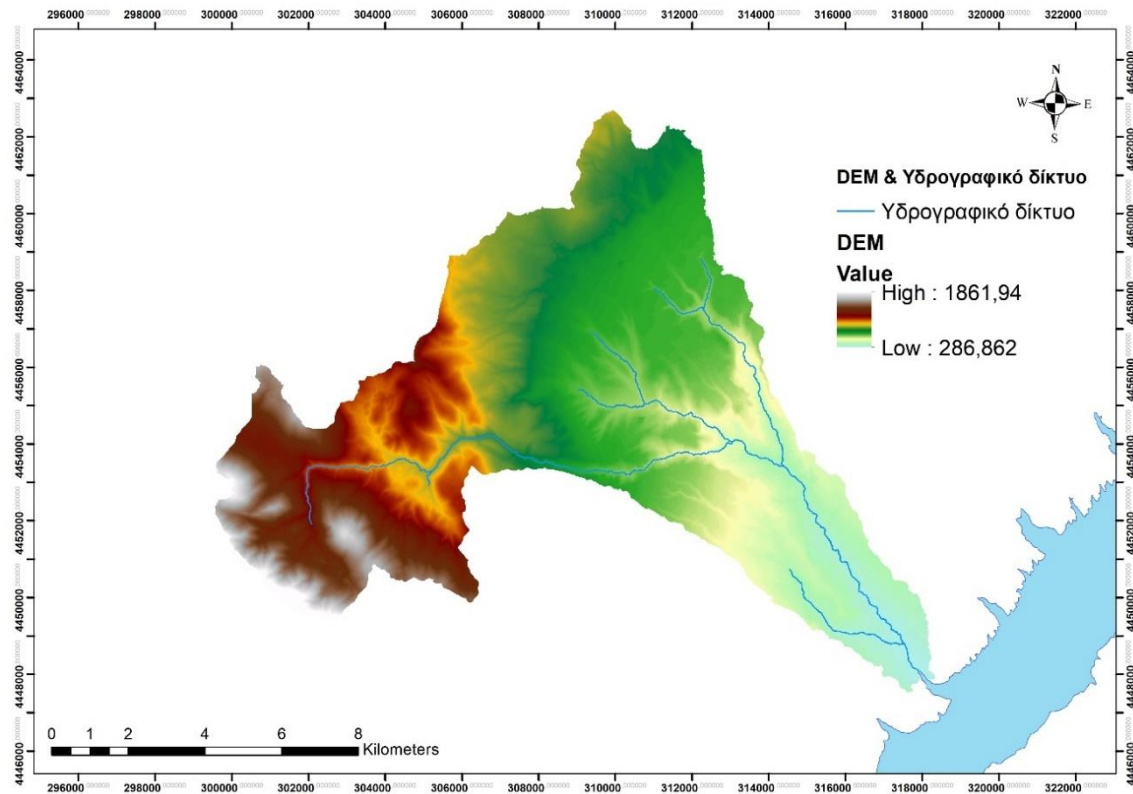
Σχήμα 3.4 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Δέμα.



Σχήμα 3.5 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης ρέματος Τσαγκακή.

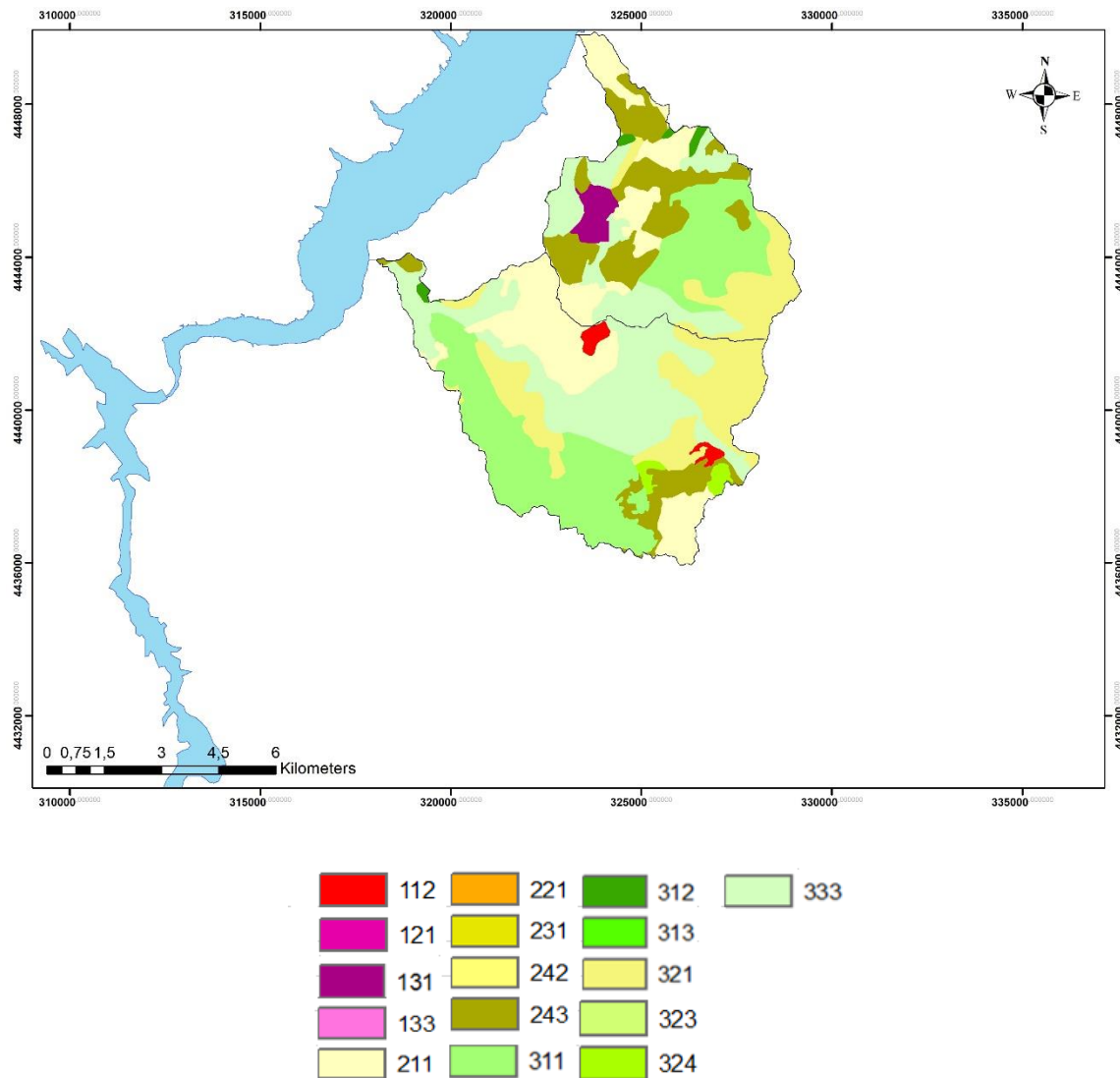


Σχήμα 3.6 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.



Σχήμα 3.7 Ψηφιακό μοντέλου εδάφους λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.

Στις παραπάνω λεκάνες απορροής που προέκυψαν, εντοπίζονται σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.1.4 οι χρήσεις γης όπως παρουσιάζονται για τις λεκάνες ρέματος Δέμα και Τσαγκακή στον επόμενο ψηφιακό χάρτη (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Χρήσεις γης των λεκανών απορροής Δεμα και Τσάγκακη.

Επίσης, οι Πίνακες 3.2 και 3.3 περιλαμβάνουν τα αναλυτικά στοιχεία του ψηφιακού αυτού χάρτη.

Πίνακας 3.2 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Δέμα.

αα	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Έκταση	
			[km ²]	[%]
1	112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.01	0.01
2	131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	1.22	3.99
3	211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	4.87	15.89

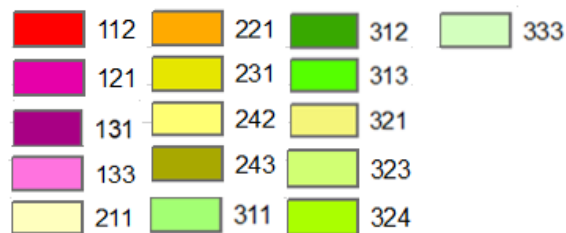
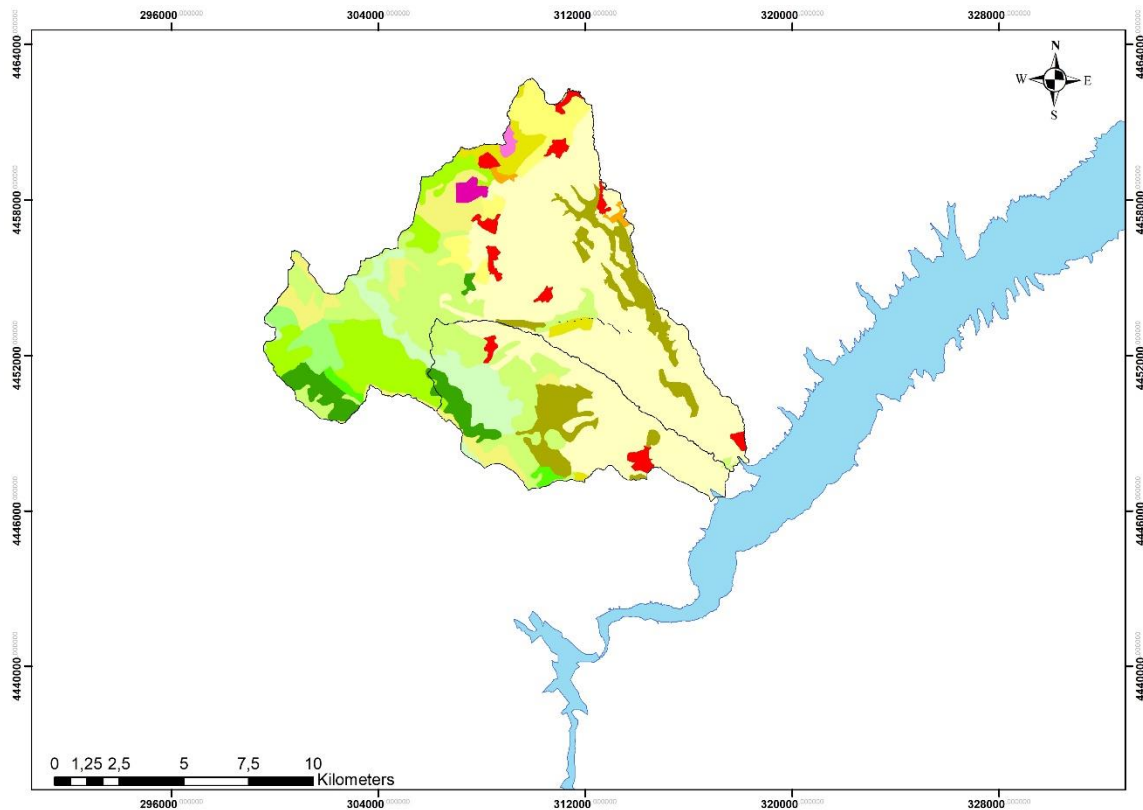


4	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	7.22	23.56
5	311	Δάσος πλατύφυλλων	6.67	21.77
6	312	Δάσος κωνοφόρων	0.36	1.17
7	321	Φυσικοί βοσκότοποι	4.30	14.04
8	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	6.00	19.57
Σύνολο			30.64	100

Πίνακας 3.3 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Τσαγκακή.

α/α	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Έκταση	
			[km ²]	[%]
1	112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.66	1.45
3	211	Μη αρδύσιμη αρόσιμη γη	7.93	17.47
4	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	2.38	5.24
5	311	Δάσος πλατύφυλλων	12.07	26.58
6	312	Δάσος κωνοφόρων	0.13	0.30
7	321	Φυσικοί βοσκότοποι	9.04	19.91
8	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	12.53	27.60
9	324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	0.66	1.45
Σύνολο			45.40	100

Αντιστοίχως, για τις λεκάνες απορροής ρέματος Καρδόλακκα και Λευκοπηγής ο ψηφιακός χάρτης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9 και τα αναλυτικά στοιχεία του χάρτη αναλύονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5.



Σχήμα 3.9 Χρήσεις γης των λεκανών απορροής Καρδόλακκα και Λευκοπηγή.

Πίνακας 3.4 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.

α/α	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Έκταση	
			[km ²]	[%]
1	112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.99	2.29
2	211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	17.61	40.71
3	231	Λιβάδια	0.14	0.33



4	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	5.26	12.14
5	312	Δάσος κωνοφόρων	2.27	5.25
6	313	Μικτό δάσος	0.5	1.16
7	321	Φυσικοί βοσκότοποι	1.93	4.45
8	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	8.99	20.77
9	324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	0.13	0.31
10	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	5.44	12.59
			Σύνολο	43.26
				100

Πίνακας 3.5 Χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης της λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.

α/α	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Έκταση	
			[km ²]	[%]
1	112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	2.80	2.47
2	121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	0.86	0.76
3	133	Χώροι οικοδόμησης	0.50	0.45
4	211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	47.72	42.09
5	221	Αμπελώνες	0.63	0.55
6	231	Λιβάδια	3.07	2.71
7	242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	7.00	6.17
8	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	6.56	5.78
9	311	Δάσος πλατύφυλλων	3.26	2.88
10	312	Δάσος κωνοφόρων	3.08	2.72
11	313	Μικτό δάσος	0.58	0.51
12	321	Φυσικοί βοσκότοποι	6.93	6.11
13	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	14.45	12.74
14	324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	12.85	11.34
15	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	3.07	2.72
			Σύνολο	113.36
				100



Η γεωλογία της περιοχής μελέτης σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.1.2, κατά τους ψηφιοποιημένους χάρτες του ΙΓΜΕ παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.6, 3.7, 3.8 και 3.9:

Πίνακας 3.6 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Δέμα.

Γεωλογικός σχηματισμός κατά ΙΓΜΕ	Έκταση (km ²)	Ποσοστό κάλυψης (%)
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες	14.94	48.73
Λιμναίες αποθέσεις: άμμοι, καροκαλοπαγή, άργιλοι, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και συχνά στρώματα λιγνίτη	13.87	45.28
Εμφάνισεις με λιμναίες, χαρσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.	1.83	5.99
Σύνολο	30.64	100

Πίνακας 3.7 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.

Γεωλογικός σχηματισμός κατά ΙΓΜΕ	Έκταση (km ²)	Ποσοστό κάλυψης (%)
Σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις	0.81	1.79
Λιμναίες αποθέσεις: άμμοι, καροκαλοπαγή, άργιλοι, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και συχνά στρώματα λιγνίτη	5.67	12.48
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες	4.56	10.04
Οφθαλμογενέυσιοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες. Στην Πελαγονική.	33.73	74.27
Εμφάνισεις με λιμναίες, χαρσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.	0.64	1.42
Σύνολο	45.41	100



Πίνακας 3.8 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.

Γεωλογικός σχηματισμός κατά ΙΓΜΕ	Έκταση (km ²)	Ποσοστό κάλυψης (%)
Λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις, άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π. στην περιοχή Βέροιας, Έδεσσα	5.8	13.4
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες)	4.37	10.11
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες	13.41	31
Οφθαλμογνεύσιοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες. Στην Πελαγονική.	0.41	0.95
Οφιόλιθοι γενικά	10.35	20.61
Εμφανίσεις με λιμναίες, χαρσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.	8.92	23.93
Σύνολο	43.26	100

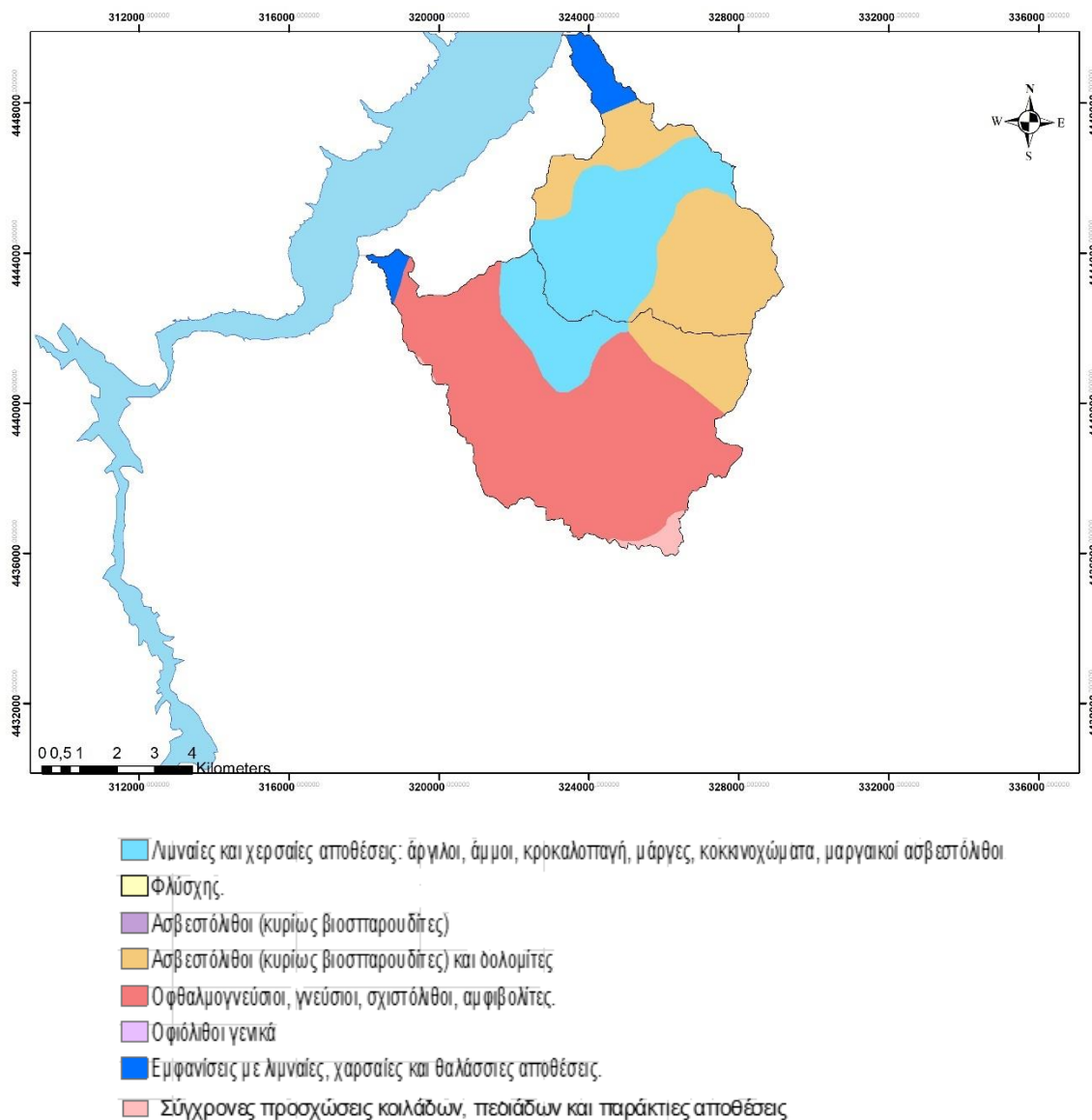
Πίνακας 3.9 Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.

Γεωλογικός σχηματισμός κατά ΙΓΜΕ	Έκταση (km ²)	Ποσοστό κάλυψης (%)
Λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις, άργιλοι, πηλοί, άμμοι, κροκαλοπαγή, κοκκινοχώματα κ.λ.π. στην περιοχή Βέροιας, Έδεσσα	35.97	31.72
Φλύσσης.	1.99	1.75
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες)	7.21	6.37
Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες	23.94	21.11
Οφθαλμογνεύσιοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες. Στην Πελαγονική.	0.26	0.24
Οφιόλιθοι γενικά	17.07	15.05

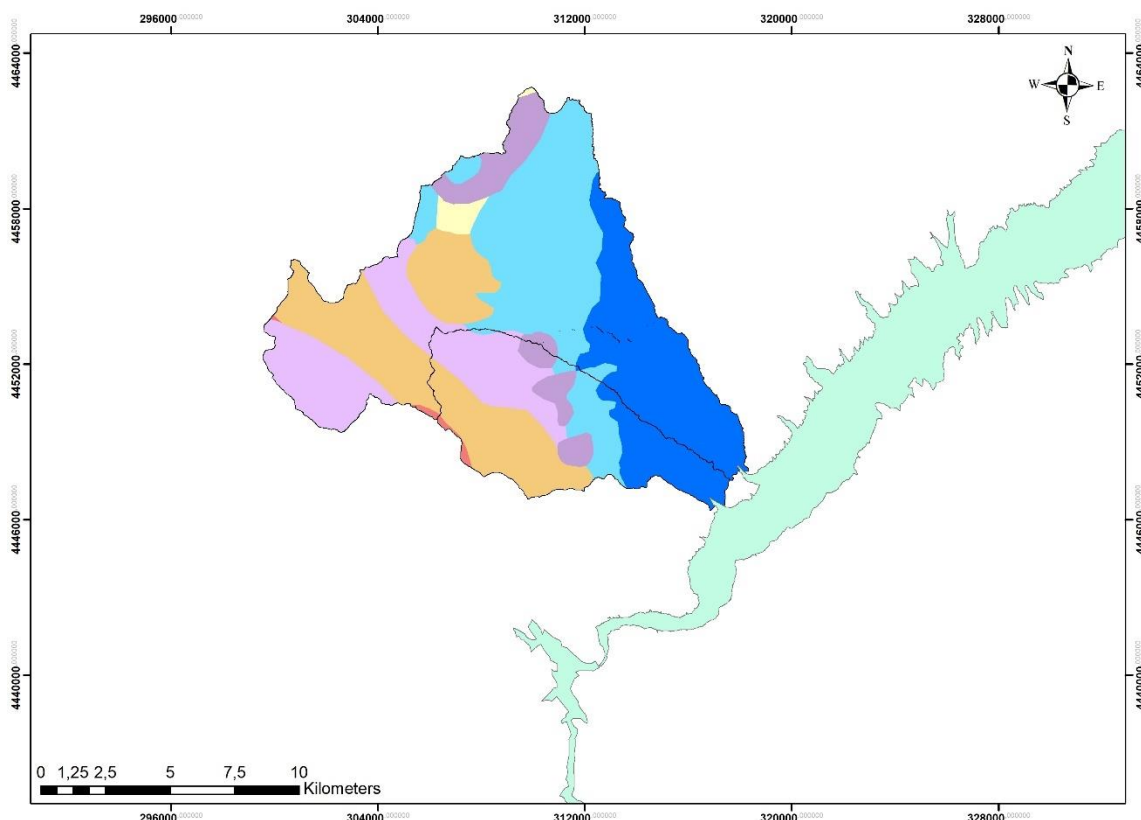


Εμφανίσεις με λιμναίες, χαρσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.	26.94	23.76
Σύνολο	113.38	100

Επιπλέον στα Σχήματα 3.10 και 3.11 απεικονίζονται οι ψηφιακοί χάρτες της γεωλογίας των λεκανών απορροής.



Σχήμα 3.10 Γεωλογικός χάρτης λεκανών απορροής Δέμα και Τσάγκακη.



- Λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις: άργιλοι, άμμοι, κροκαλοπαγή, μάργες, κοκκινωμάτα, μαργαικοί ασβεστόλιθοι
- Φλύσχης
- Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες)
- Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες
- Οφθαλμογενέσιοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες.
- Οφιόλιθοι γενικά
- Εμφανίσεις με λιμναίες, χερσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.
- Σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις

Σχήμα 3.11 Γεωλογικός χάρτης λεκανών απορροής Καρδόλακκα και Λευκοπηγής.

3.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.2.1 ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ

Ο Sherman (1932) εισήγαγε το μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥΓ) στην υδρολογική ανάλυση. Κατ' αυτόν, μοναδιαίο υδρογράφημα καλείται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής, που προκαλείται από ενεργό βροχόπτωση ύψους 10 mm, που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:



1. Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
2. Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις επόμενες και τις προηγούμενες βροχές.
3. Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο. Οι παραπάνω προϋποθέσεις μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται από τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες (Wilson, 1990; Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012). Οι θεμελιώδεις αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι εξής δύο :
Α) Αρχή της αναλογίας: Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση, αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων.
Β) Αρχή της επαλληλίας: Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.
Η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντίστοιχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

3.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΥΓ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΙΣΟΧΡΟΝΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

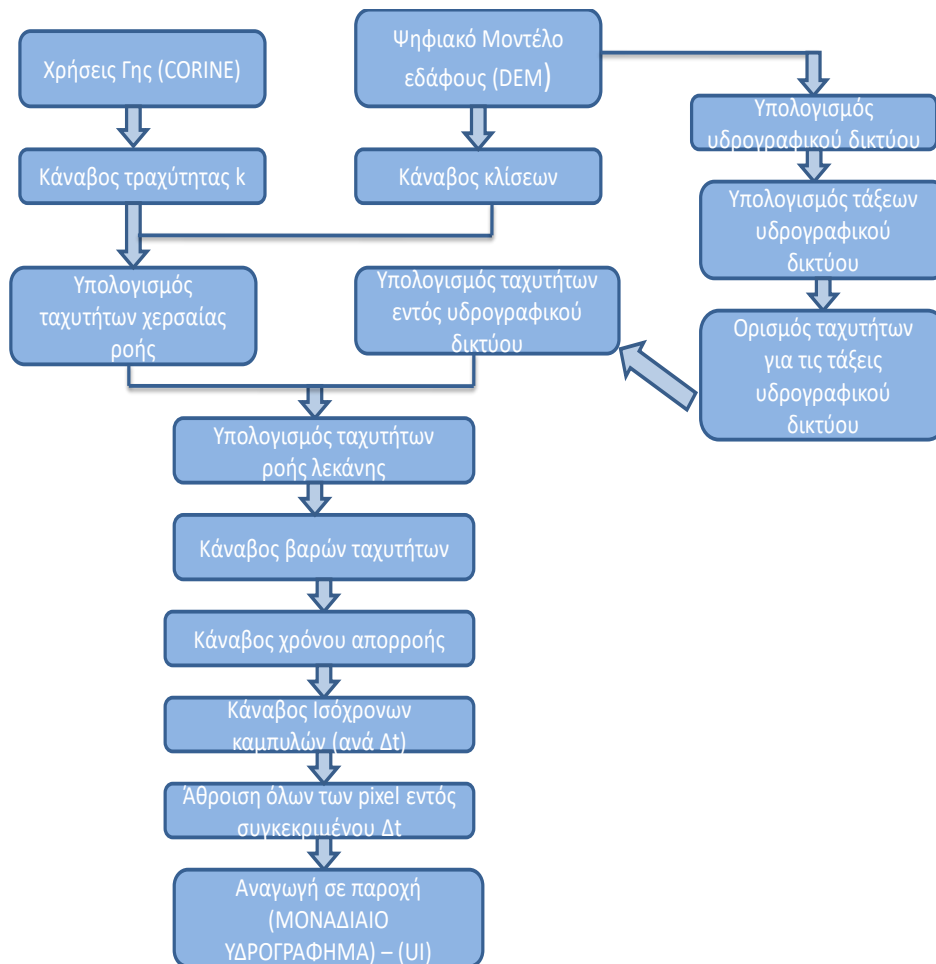
Η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών βασίζεται στη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (McCuen, 1989). Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες (Χριστοφίδης, 2008).

Ο όρος ισόχρονες καμπύλες περιγράφει τον γεωμετρικό τόπο των σημείων από τα οποία η απορροή ισαπέχει χρονικά μέχρι την έξοδο της λεκάνης (Καββαδά, 2012). Οι καμπύλες αυτές δεν είναι δυνατό να διασταυρωθούν μεταξύ τους, για τον λόγο ότι η καθεμία περιλαμβάνει σημεία διαφορετικής χρονικής απόστασης από την έξοδο της λεκάνης, καθώς και δύναται να εκτείνονται μόνο εντός των ορίων της λεκάνης απορροής (Dooge, 1959).

Το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών δύναται να αξιοποιηθεί για το μετασχηματισμό της ενεργού βροχόπτωσης σε απορροή λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που απαιτείται για να καταλήξει το νερό από κάθε σημείο της λεκάνης στην έξοδό της.

Στην παρούσα εργασία, για την παραγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος γίνεται η χρήση της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS, με τη βοήθεια των λογισμικών ArcGIS και HEC-GeoHMS.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει συνοπτικά τα εξής στάδια που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια:



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα ροής στο λογισμικό ArcMap

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), η κατανομή του υδρογραφικού δικτύου όπως προέκυψε από την γεωμορφολογική ανάλυση προηγουμένως και ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2018). Αυτή η διαδικασία εφαρμόστηκε σε τέσσερις λεκάνες που προέκυψαν στην περιοχή μελέτης.

Σε κάθε κατηγορία χρήσης γης κατά Corine αποδίδεται μια τιμή για το συντελεστή τραχύτητας εδάφους k και παράγεται το αντίστοιχο αρχείο δομής raster. Το μέγεθος του κάθε φατνίου ορίζεται να είναι $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ για να συνάδει με το μέγεθος των φατνίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους προκύπτει μέσω του εργαλείου Slope του ArcGIS, ο κλίση της περιοχής μελέτης. Αυτός



χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των ταχυτήτων χερσαίας ροής. Η ταχύτητα ροής διακρίνεται σε χερσαία (V_{overland}) και σε ταχύτητα ροής εντός Υδρογραφικού Δικτύου ($V_{\text{Inchannel}}$). Η ταχύτητα χερσαίας ροής εξαρτάται από την κλίση του εδάφους καθώς και τις χρήσεις γης της περιοχής, ενώ η ταχύτητα εντός του υδρογραφικού δικτύου υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψιν την τάξη των υδατορρευμάτων.

Οι ταχύτητες χερσαίας ροής υπολογίζονται από την Εξίσωση 3.1 (Μαμάσης, 2007):

$$V(\text{m/s}) = k \cdot vS(\text{m/m}) \quad (3.1)$$

Όπου k ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους και S η κλίση του εδάφους.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας χερσαίας ροής βέβαια, σε περιβάλλον ΣΓΠ, γίνεται με χρήση του εργαλείου Raster Calculator του λογισμικού ArcGIS. Το εργαλείο αυτό υλοποιεί αριθμητικές πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας δομής raster και αριθμών, και με αυτό τον τρόπο κατασκευάζεται ο κάρναβος χερσαίας ροής.

Αρχικά, με τη βοήθεια του εργαλείου Flow Direction δημιουργείται ο κάρναβος κατεύθυνσης ροής που απεικονίζει την κατεύθυνση του νερού κάθε φατνίου προς το φατνίο με τη μέγιστη κλίση σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του. Στην συνέχεια, κατασκευάζεται με το εργαλείο Flow Accumulation ο κάρναβος συγκεντρωτικής ροής, που υπολογίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν σε κάθε φατνίο. Προσδιορίζεται στη συνέχεια το κατώφλι στο πλήθος των κελιών που απορρέουν στο εξεταζόμενο φατνίο, πάνω από το οποίο το συγκεκριμένο κελί ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο. Οι μεγάλες τιμές κατωφλίου συνεπάγονται πιο αραιό υδρογραφικό δίκτυο, ενώ οι μικρές πιο πυκνή μορφή.

Η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου που προκύπτει γίνεται σε τάξεις με τη μέθοδο Strahler. Στο ArcGIS, η ταξινόμηση υλοποιείται με το εργαλείο Stream Order.

Η ταξινόμηση κατά Strahler χαρακτηρίζει ως 1ης τάξης τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, οι οποίοι δε δέχονται απορροή από άλλα μικρότερα υδατορεύματα. Η συμβολή δύο κλάδων 1ης τάξης δημιουργεί κλάδο 2ης τάξης, και η ένωση δύο κλάδων 2ης τάξης δημιουργεί κλάδο 3ης τάξης κ.ο.κ. Εάν υπάρχει σημείο σύνδεσης δύο κλάδων διαφορετικής μεταξύ τους τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει διατηρεί την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συμβαλλόμενους κλάδους (Strahler, 1957).

Για τον υπολογισμό της συνολικής ταχύτητας, χρησιμοποιείται το εργαλείο Mosaic to New Raster, το οποίο προσθέτει τα δύο raster των προηγούμενων ταχυτήτων. Έτσι προκύπτει ο κάρναβος της ταχύτητας ροής της εξεταζόμενης λεκάνης.



Στη συνέχεια δημιουργείται ο κάναβος βαρών μέσω του Raster Calculator, που αντιστοιχεί στο αντίστροφο της αθροιστικής ταχύτητας ροής, και ο οποίος απαιτείται να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα (Flow Length), ώστε το αποτέλεσμα, να είναι Χρόνος (αντί για Μήκος). Υπολογίζεται εν συνεχεία, ο κάναβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής, δηλαδή το μήκος που διανύει η κάθε σταγόνα έως την έξοδο της λεκάνης. Τέλος, γίνεται η αναγωγή του συγκεντρωτικού χρόνου ροής σε ώρες μέσω του Raster Calculator και με το διαχωρισμό των τιμών σε κλάσεις με τη χρήση του εργαλείου Reclassify, προέκυψαν οι ισόχρονες καμπύλες διάρκειας μισής ώρας (30 min), καθώς οι εξεταζόμενες λεκάνες έχουν μικρό μέγεθος.

Έπειτα, γίνεται η εξαγωγή των ιστογραμμάτων που προέκυψαν για κάθε λεκάνη σε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel, όπου γίνεται η μετατροπή του αριθμού των pixel ανά χρονικό βήμα σε εμβαδό λεκάνης απορροής ($A=30*30=900m^2$) και η μετατροπή της επιφάνειας σε παροχή θεωρώντας βροχή ίση με 10mm ($Q=P*A$). Τέλος διαιρώντας τα αποτελέσματα με τα 1800 sec (μετατροπή σε ώρες) συντέθηκε το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της μισής ώρας.

3.2.3 ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών συνίσταται στη στατιστική ανάλυση των ισχυρών βροχοπτώσεων μιας συγκεκριμένης περιοχής. Οι καμπύλες αυτές ουσιαστικά αποτελούν αναλυτικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης i συναρτήσει της διάρκειας καταιγίδας d και της περιόδου επαναφοράς T .

Από καταγεγραμμένα επεισόδια βροχόπτωσης γίνονται μέσω βροχόμετρων και βροχογράφων οι απαραίτητες μετρήσεις (καταγραφές).

Για κάθε τέτοια αναλυτική έκφραση απαιτούνται ιστορικές χρονοσειρές μέγιστων εντάσεων βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες που (επιθυμητά) ξεκινούν από τα 5 min και καταλήγουν στη μέγιστη διάρκεια βροχής που αφορά τη διαστασιολόγηση και τον υδραυλικό έλεγχο τεχνικών έργων (2 έως 4 ημέρες) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).

Συνεπώς, η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών προϋποθέτει την ύπαρξη μετρήσεων υψηλής χρονικής ευκρίνειας, η οποία υφίσταται συνήθως σε καταγραφές βροχογράφων ή σύγχρονων ψηφιακών αισθητήρων (Κουτσογιάννης, 1997).

Στην παρούσα μελέτη υιοθετείται η γενική μεθοδολογία για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών, η οποία αναπτύχθηκε πρόσφατα και έχει εφαρμοστεί σε πολλές μελέτες και ερευνητικές εργασίες με επιτυχία (Koutsoyiannis et al, 1998).



Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε χρήση των όμβριων καμπυλών, στοιχεία που αντλήθηκαν από το Σχέδιο διαχείρισης κίνδυνων πλημμύρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, από την ιστοσελίδα: https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=174&Itemid=604.

Η γενική συναρτησιακή εξίσωση όμβριων καμπυλών είναι της μορφής

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (3.2)$$

Όπου,

i : η μέγιστη ένταση βροχόπτωσης διάρκειας d για περίοδο επαναφοράς T

$a(T)$: κατάλληλη συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς

$b(d)$: κατάλληλη συνάρτηση της διάρκειας βροχόπτωσης

η κατάλληλη συνάρτηση της χρονικής κλίμακας d δίδεται από την εμπειρικά διαπιστωμένη σχέση:

$$b(d) = \left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^\eta \quad (3.3)$$

Όπου,

d : η διάρκεια της βροχόπτωσης

θ : παράμετρος προς εκτίμηση, ($\theta > 0$)

η : αδιάστατη παράμετρος προς εκτίμηση, ($\eta > 0$)

Η κατάλληλη συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς T , προκύπτει αναλυτικά από τη συνάρτηση κατανομής που ισχύει για τη μέγιστη ένταση βροχής της υπό εξέταση περιοχής, όπως αυτή προκύπτει από την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων. Κατάλληλη συνάρτηση κατανομής για τη μέγιστη ένταση βροχής, σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων, αποτελεί η κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών, ΓΑΤ (General Extreme Value, GEV distribution), με έκφραση:



$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \kappa \cdot \left(\frac{x}{\lambda} - \psi \right) \right]^{-1/\kappa} \right\}, \quad x \geq \lambda \cdot \left(\psi - \frac{1}{\kappa} \right) \quad (3.4)$$

Όπου,

κ : (> 0) αδιάστατη παράμετρος σχήματος

ψ : (> 0) αδιάστατη παράμετρος θέσης και $\lambda > 0$ παράμετρος κλίμακας με διαστάσεις έντασης βροχής.

“Για περιόδους επαναφοράς $T \geq 50$ ετών, η εξίσωση (3.2) μπορεί να αντικατασταθεί από την απλούστερη έκφραση

$$i(d, T) = \frac{\lambda' \cdot (T^\kappa + \psi')}{(d + \theta)^\eta}, \quad \kappa \neq 0 \quad (3.5)$$

$$i(d, T) = \frac{\lambda \cdot (\ln T + \psi)}{(d + \theta)^\eta}, \quad \kappa = 0 \quad (3.6)$$

όπου, για απλοποιητικούς λόγους, ορίζονται

$\lambda' = \lambda/\kappa$ και $\psi' = \kappa \cdot \psi - 1$.” (Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A., 1998)

3.2.4 ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Σύμφωνα με τον Κουκοβίνο Α., 2014, “Η διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού επιλέγεται ίση με το τριπλάσιο, τουλάχιστον, του χρόνου συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης”. Η διάρκεια του επεισοδίου, που μελετάται, επιλέγεται επομένως συνήθως να είναι πολλαπλάσια του χρόνου συρροής, ή συγκέντρωσης, της εκάστοτε λεκάνης απορροής.

Από τις ελληνικές προδιαγραφές μελετών ΠΔ696 (1974), προτείνεται η διάρκεια της βροχόπτωσης να λαμβάνεται ως πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της ανάντη λεκάνης απορροής. Συστήνεται η χρήση της εμπειρικής σχέσης Giandotti με σκοπό την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης. Η εμπειρική σχέση που πρότεινε ο Giandotti Μ., το 1934, είναι η εξής:



$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{\Delta z}} \quad (3.7)$$

Όπου,

t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής [h],

A : η επιφάνεια της λεκάνης απορροής [km²]

L : το μήκος της κύριας μισγάγγειας [km] και

Δz : $H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}$, η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο του σημείου εξόδου της [m].

Η παραγωγή του υετογραφήματος σχεδιασμού γίνεται με τη χρήση των όμβριων καμπυλών της περιοχής μελέτης και με την επιλογή μίας μεθόδου χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης. Ο λόγος που επιλέγεται η χρήση της χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης σε σχέση με τη θεώρησης σταθερής έντασης βροχόπτωσης είναι ότι μας προσδίδει ένα αληθοφανέστερο σενάριο της βροχόπτωσης.

Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές μελετών εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για πλημμύρες μέσης πιθανότητας εμφάνισης (100 χρόνια περίοδος επαναφοράς), “το υετογράφημα σχεδιασμού παράγεται χρησιμοποιώντας τις σχετικές όμβριες καμπύλες της περιοχής και με βάση τη «μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ» (alternating block method), όπως αυτή περιγράφεται στο «Applied Hydrology», Chow et al (1988)”.

Με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, γίνεται ο υπολογισμός των τμηματικών ύψων βροχόπτωσης, των επιμέρους διαρκειών, σύμφωνα με την όμβρια καμπύλη που αντιστοιχεί στη λεκάνη απορροής, της περιόδου επαναφοράς μελέτης και σε χρονική κλίμακα ίση με την υπόψη διάρκεια βροχόπτωσης.

“Τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται στη συνέχεια με τρόπο ώστε να προκύπτει ένας ρεαλιστικός και ταυτόχρονα αρκετά δυσμενής συνδυασμός”. (Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., Δημητριάδης Π., & Μαχαίρας Α., 2013). Τα ύψη αυτά κατανέμονται τοποθετώντας στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το μεγαλύτερο ύψος βροχής και στη συνέχεια τοποθετούνται σε φθίνουσα σειρά, δίπλα από το μεγαλύτερο, τα υπόλοιπα υψόμετρα ξεκινώντας από την αριστερή θέση και πηγαίνοντας με εναλλάξ σειρά.



Για πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης, δηλαδή πλημμύρες με περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερες από 1000 ή 10000 χρόνια, η USBR πρότεινε το 1977 τη «μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης» (worst profile method), η οποία αποτελεί μια παραλλαγή της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ και προϋποθέτει την κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των δύο μεθόδων έναντι απλούστερων μεθόδων χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, αποτυπώνονται σύμφωνα με τον Koutsoyiannis (1999), ως εξής:

- 1) Χρησιμοποιούν κατά αποκλειστικότητα δεδομένα από την περιοχή μελέτης (όμβριες καμπύλες) και όχι διαγράμματα της βιβλιογραφίας.
- 2) Οδηγούν σε ένα μοναδικό υετογράφημα σχεδιασμού ή ελέγχου, χωρίς να απαιτείται κάποια παραδοχή.
- 3) Παράγουν εύλογα και συνεπή αποτελέσματα συγκριτικά με αυτά της μεθόδου των αδιάστατων αθροιστικών καμπυλών, όπως παρουσιάστηκε ύστερα από σύγκριση με πληρέστερα στοχαστικά μοντέλα στο «Astochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis». (KoutsoyiannisD., 1994).

Το βασικότερο μειονέκτημα ωστόσο και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι χρησιμοποιούν ως βασική τους παραδοχή ότι, σε κάθε επιμέρους διάρκεια, το προκύπτον ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής, παραδοχή η οποία είναι μη ρεαλιστική.

Παρόλα αυτά, “η παραδοχή μιας ενιαίας περιόδου επαναφοράς για όλες τις χρονικές κλίμακες είναι τουλάχιστον πιο ρεαλιστική από την υιοθέτηση μιας αυθαίρετης αδιάστατης χρονικής κατανομής” (Κουτσογιάννης Δ., και συν., 2010)

3.2.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ SCS-CN

Με σκοπό την εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών, δηλαδή του τμήματος της βροχής που αρχικά κατακρατείται στο έδαφος και τη βλάστηση και, στη συνέχεια, είτε εξατμίζεται είτε διηθείται, και οι οποίες μειώνουν αισθητά την απορροή στη λεκάνη, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Soil Conservation Service των ΗΠΑ (SCS, 1972).

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί από τις πλέον διαδεδομένες παγκοσμίως, προτείνεται και στην ελληνική βιβλιογραφία και αναφέρεται τώρα ως Natural Resources Conservation Service, (λόγω της μετονομασίας της Διεύθυνσης σε Natural Resources Conservation Service).

Συγκεκριμένα, η μέθοδος της NRCS υπολογίζει το ύψος του περισσεύματος βροχής από τρεις μεταβλητές: το ύψος βροχής, τα αρχικά ελλείμματα και το υδρολογικό σύμπλοκο



εδάφους – φυτοκάλυψης που εκφράζεται από έναν αδιάστατο αριθμό, τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (runoff curve number).

Η εμπειρική εξίσωση για τις αθροιστικές απώλειες είναι

$$he = \begin{cases} 0, & h \leq Ia \\ \frac{(h - Ia)^2}{(h - Ia) + S}, & h > Ia \end{cases} \quad (3.8)$$

Όπου:

he : η ενεργός βροχόπτωση

h : το συνολικό ύψος βροχής

Ia : Οι αρχικές απώλειες

S : S η μέγιστη πιθανή κατακράτηση εδάφους (potential maximum retention), παράμετρος που εκτιμάται εμπειρικά και συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης απορροής Curve Number (CN) σύμφωνα με την Εξίσωση 3.9:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Οι αρχικές απώλειες Ia , είναι δυνατό να εκφραστούν και ως ποσοστό του S , ήτοι: $Ia = \alpha S$. Από τη βιβλιογραφία, συνήθως θεωρούνται ίσες με $0.2S$, δηλαδή ποσοστό ποσοστού 20%, όμως δεν είναι απόλυτο. Το ποσοστό αυτό προέκυψε ως μέσος όρος του 50% των παρατηρήσεων πεδίου (κυρίως από μετρήσεις διήθησης σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ), που κυμαίνεται από 0.095 ως 0.38 (Ponce and Hawkins, 1996).

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100 και επηρεάζεται από τον υδρολογικό τύπο του εδάφους (διηθητικότητα), την κάλυψη, τον τρόπο διαχείρισης της γης καθώς και την προηγούμενη κατάσταση υγρασίας.

Σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια τα εδάφη ταξινομούνται σε 4 κατηγορίες A, B, C, ή D υδρολογικής κατάστασης, αναλόγως την διαπερατότητά τους (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

Κατηγορία A: Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.



Κατηγορία Β: Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.

Κατηγορία C: Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.

Κατηγορία D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Επιπλέον η μέθοδος απωλειών SCS ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας, ήτοι:

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm.

Τύπος II: Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 και 38 mm.

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38mm.

Το σύμπλοκο εδάφους – φυτοκάλυψης που αντιπροσωπεύει τον τύπο του εδάφους από υδρολογική άποψη και την κατηγορία φυτοκάλυψης και χρήσης γης μπορεί να εκφρασθεί με τον αριθμό καμπύλης απορροής CN.

Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε η χρήση του επόμενου πίνακα από το ΥΠΕΝ (Πίνακας 3.10), στον οποίο τα κυριότερα πετρώματα που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο αντιστοιχίζονται μία ή περισσότερες ομάδες διηθητικότητας.



Πίνακας 3.10 Επικρατούντες υδρολογικοί εδαφικοί τύποι των κυριότερων πετρωμάτων του Ελλαδικού χώρου (πηγή: floods.yreka.gr)

Τύπος	Υφή	Ομάδα
Πλουτώνια πετρώματα		
Γρανίτης	Αμμώδη έως πηλώδη	A
Συηνίτης	Βαρύτερα του γρανίτη	B
Διορίτης	Αργιλώδη ή αργιλοπηλώδη	D
Γάββρος και Περιδοτίτης	Πηλώδη μέχρι αργιλώδη	B, C, D
Εκρηξιγενή πετρώματα		
Διαβάσης	Αργιλώδη	D
Οφείτης	Λεπτή ή μέτρια λεπτή υφή	C, D
Ρυόλιθος	Αμμώδη	A
Τραχείτης	Αμμώδη	A
Ανδεσίτης	Αργιλώδη	D
Βασάλτης	Αργιλώδη	D
Μηχανικά ιζηματογενή πετρώματα		
Αμμόλιθοι και ψαμίτες	Αμμώδη έως αμμοπηλώδη	A
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστή άργιλος, αργιλίτες	Αργιλώδη	D
Φλύσχης Αδριατικοϊόνιας ζώνης και Ωλονού – Πίνδου	Αμμοαργιλώδη έως αργιλώδη	D
Φλύσχης Πίνδου	Ελαφρύτερα της προηγούμενης	B
Φλύσχης Τριπόλεως – Γαβρόβου	Ενδιάμεση υφή μεταξύ των προηγούμενων	C
Χημικά και βιογενή ιζηματογενή πετρώματα		
Σκληροί ασβεστόλιθοι	Αργιλοπηλώδη έως αργιλώδη	D
Ασβεστολιθικές μάργες	Πηλώδη έως αργιλοπηλώδη	C
Μεταμορφωσιγενή πετρώματα		
Γνεύσιος	Αμμοπηλώδη έως πηλώδη	A, B
Σχιστόλιθος (μαρμαρυγιακός)	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστόλιθος (σερικιτικός)	Αμμώδη έως πηλοαμμώδη	A
Σχιστόλιθος (χλωριτικός)	Βαρύτερα από τα τρία παραπάνω	B
Αργιλικός σχιστόλιθος ή σχίστης	Βαριά εδάφη	D
Χαλαζίτης	Αμμώδη	A

Επίσης, έγινε χρήση του Πίνακα 3.11 με την αντιστοίχιση των τιμών του αριθμού καμπύλης απορροής CN με τους κωδικούς της χρήσης γης, για την κάθε ομάδα διηθησιμότητας.



Πίνακας 3.11 Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής CN, ανάλογα με την ομάδα διηθητικότητας του εδάφους και την φυτοκάλυψη που υπάρχει (πηγή: floods.yraka.gr)

Κωδικός	Περιγραφή	Ομάδα Διηθησιμότητας			
		A	B	C	D
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	66	77	83	86
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	69	80	87	90
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	67	76	83	86
221	Αμπελώνες	63	72	79	82
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	44	66	77	83
223	Ελαιώνες	49	59	72	82
231	Λιβάδια	54	70	80	85
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	67	76	83	86
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	67	76	83	86
311	Δάσος πλατύφυλλων	35	61	74	80
312	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80
313	Μικτό δάσος	35	61	74	80
321	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
322	Θάμνοι και χερσότοποι	42	62	74	80
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	74	80
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	42	62	74	80
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80
523	Θάλασσες και ωκεανοί	100	100	100	100

Τελικά, ο αριθμός καμπύλης απορροής υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} \cdot CN_i \right) \quad (3.10)$$

Όπου A_i η έκταση της υποπεριοχής i , A έκταση της συνολικής λεκάνης απορροής και CN_i ο αριθμός καμπύλης απορροής της υποπεριοχής i . Οι υπολογισμοί αυτοί αναφέρονται στην υγρασιακή κατάσταση τύπου II, δηλαδή αφορά μια μέση κατάσταση του εδάφους. Για τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης απορροής CN υγρασιακής κατάστασης I (ξηρά εδάφη) και III (κορεσμένα εδάφη) γίνεται αναγωγή με βάση τις Εξισώσεις (3.11) και (3.12).



$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}} \quad (3.11)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}} \quad (3.12)$$

Τα αποτελέσματα του αριθμού καμπύλης απορροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12 Αριθμός καμπύλης απορροής, CN, για την περιοχή μελέτης.

ΛΕΚΑΝΗ	CN		
	CN _I	CN _{II}	CN _{III}
α/α			
Δέμα	58	77	88
Τσάγκακη	60	78	89
Καρδόλακκα	58	77	88
Λευκοπηγή	60	78	89

3.2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ HEC-HMS- ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-HMS

Η αμερικάνικη υπηρεσία στρατού, U.S. Army Corp of Engineers δημιούργησε ένα ελεύθερο λογισμικό, το HEC-HMS, με σκοπό την επίλυση ενός φάσματος υδρολογικών προσομοιώσεων όπως η ανάλυση μεγάλων υδάτινων συστημάτων, η ανάλυση επεισοδίων βροχής, η ανάλυση ποιοτικών χαρακτηριστικών της απορροής και η προσομοίωση μεταφοράς φερτών.

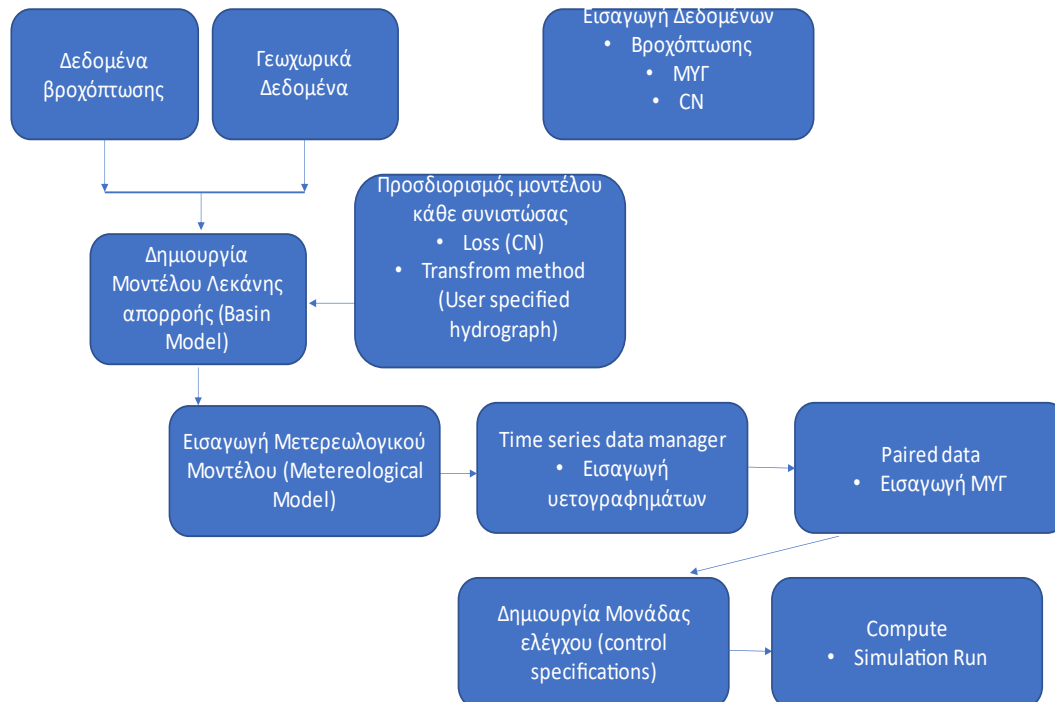
Το HEC-HMS αποτελεί μια πλατφόρμα διασύνδεσης μοντέλων για τον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων και περιλαμβάνει:

- Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model)
- Μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorological Model Manager)
- Μοντέλο υπολογισμού απωλειών
- Μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής
- Μοντέλο υπολογισμού βασικής απορροής
- Μοντέλο υδρολογικής διόδευσης

Ο χρήστης του λογισμικού έχει στη διάθεσή του μια σειρά από επιμέρους μεθόδους για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες των μοντέλων. Κριτήριο επιλογής της ενδεδειγμένης μεθόδου κάθε μοντέλου αποτελεί η εμπειρία του χρήστη, ώστε κρίνει τη δυνατότητα απόκλισης κάποιων μεθόδων για συγκεκριμένες εφαρμογές, καθώς επίσης και η διαθεσιμότητα των δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή κάθε μεθόδου.



Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ακολουθήθηκε το παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.13), και συνοπτικά χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία/ μέθοδοι που ακολουθούν.



Σχήμα 3.13 Διάγραμμα ροής λογισμικού HEC-HMS που ακολουθήθηκε.

- i Έκταση της λεκάνης απορροής, όπως αυτή προκύπτει από το *ArcMap*.
- ii Η ενεργός βροχόπτωση και ο αριθμός καμπύλης απορροής CN, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN, για τον προσδιορισμό των απωλειών.
- iii Υετογράφημα που παράχθηκε σύμφωνα με το κεφάλαιο 3.2.4.
- iv Μοναδιαίο υδρογράφημα που παράχθηκε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών.

Στο περιβάλλον του λογισμικού, κατασκευάζεται αρχικά το μοντέλο της λεκάνης “Basin Model”, στο οποίο φορτώνονται τα χωρικά δεδομένα από το GIS, για παράδειγμα το πολύγωνο της λεκάνης, το υδρογραφικό δίκτυο και το σημείο εξόδου της λεκάνης. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε το κατάλληλο μοντέλο για κάθε συνιστώσα. Με την επιλεγμένη μέθοδο μοντέλου απωλειών SCS, εισάγονται στη συνέχεια τα μοναδιαία υδρογραφήματα που προσδιορίστηκαν μέσω ισόχρονων καμπυλών με τη μορφή Paired Data. Έπειτα δημιουργείται το μετεωρολογικό μοντέλο μέσω του TimeSeries Data, στο οποίο εισάγεται σαν δεδομένο το υετογράφημα όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3.2.4. Τέλος δημιουργείται η μονάδα ελέγχου, επιλέγοντας το χρονικό διάστημα και το χρονικό βήμα.



3.3 ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

3.3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Η φυσική διεργασία απόσπασης, μεταφοράς και απόθεσης των εδαφικών υλικών από τα πετρώματα που πραγματοποιείται λόγω της επίδρασης του νερού και του ανέμου, ονομάζεται εδαφική διάβρωση. Για την περιοχή της νότιας Ευρώπης, η κύρια διεργασία διάβρωσης είναι η μηχανική δράση του νερού (υδατική διάβρωση), τα αποτελέσματα της οποίας είναι συχνά καταστροφικά, δηλαδή τα πλημμυρικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με τους (Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε., & Κουτσογιάννης Δ., 2001), η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης γίνεται με τους εξής όρους:

Στερεοαπορροή (Sediment Yield, S_Y), η οποία “Είναι το φυσικό μέγεθος που εκφράζει και τις τρεις σχετικές φυσικές διεργασίες της εδαφικής διάβρωσης, της στερεομεταφοράς και της απόθεσης” (Vanoni V. A., 1975). Η στερεοαπορροή είναι συγκεκριμένα η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή αναφοράς (π.χ. διατομή υδατορεύματος) σε μια καθορισμένη χρονική διάρκεια (μάζα / χρόνος / επιφάνεια).

Στερεοπαροχή (Sediment Discharge, Q_S): είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μία διατομή αναφοράς ανά μονάδα χρόνου (μάζα/χρόνος).

Ολική Διάβρωση (Gross Erosion): περιγράφει την ποσότητα του υλικού που αποκολλάται από την επιφάνεια του εδάφους εξαιτίας της δράσης της βροχής ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας [μάζα/ χρόνος/ επιφάνεια].

Καθαρή διάβρωση (Net Erosion): εκφράζει το ποσοστό των φερτών υλικών που αποκολλώνται από το εδαφικό στρώμα και δεν εναποτίθενται μέσα στην ίδια μονάδα επιφάνειας.

Συντελεστής Στερεοαπορροής (Sediment Delivery Ratio, SDR): είναι αδιάστατο μέγεθος, μικρότερο της μονάδας που εκφράζει την ποσότητα φερτών υλικών που καταλήγουν στην διατομή αναφοράς ενός υδατορεύματος λόγω ενδιάμεσων αποθέσεων, προς τον όγκο των φερτών που αποκολλήθηκαν από το έδαφος. Δηλαδή, είναι ο λόγος της στερεοαπορροής (sediment yield) προς την ολική διάβρωση (gross erosion).

3.3.2 ΥΔΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Σύμφωνα με τον Ευθυμίου Ν. (2016), η υδατική διάβρωση «περιγράφεται από τη συνδυασμένη δράση της βροχόπτωσης, η οποία προκαλεί την απόσπαση των εδαφικών σωματιδίων και της επιφανειακής απορροής, με την έννοια της μεταφοράς αυτών των εδαφικών σωματιδίων σε αιώρηση, εφόσον υπάρχει ροή στην επιφάνεια του εδάφους



ή/ και την επιπλέον απόσπαση εξαιτίας της διαβρωτικής ικανότητας της συγκεντρωμένης ροής κατά την αύξηση της περιοχής.»

Η παρουσία της είναι ιδιαίτερος έντονη στις ορεινές και λοφώδεις περιοχές της Ελλάδας, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα εδαφικής υποβάθμισης των εν λόγω περιοχών. Το υδρογραφικό δίκτυο διαμορφώνεται από την διαβρωτική δράση του νερού. Η διάκριση στους τύπους της καθορίζεται από τρία πράγματα, κυρίως από την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής στην επιφάνεια του εδάφους, από τη συγκέντρωση του νερού και από την ταχύτητα της ροής του νερού.

3.3.3 ΥΔΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ: ΓΕΝΕΣΙΟΥΡΓΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Όπως αναφέρθηκε, η πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής στην επιφάνεια του εδάφους προκαλεί την διάβρωση διασποράς, η οποία συντελείται με την αποκόλληση και απομάκρυνση με εκτόξευση μικρών σωματιδίων/τεμαχιδίων εδάφους. Η άσκηση επίδρασης της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής (υδροστρωματορροής) συντελεί στη δημιουργία της επιφανειακής/φυλλοειδής διάβρωσης ή διάβρωσης κατά στρώσεις, η οποία εμφανίζεται με την απομάκρυνση ενός επιφανειακού λεπτού στρώματος εδάφους.

Σύμφωνα με τους Vanoni V.A. (1977) και Kirkby & Morgan (1980) η δημιουργία της επιφανειακής ή Φυλλοειδής Διάβρωσης (Sheet, Inter-rill Erosion) είναι το τελικό αποτέλεσμα των δύο φάσεων, της φάσης απόσπασης και της φάσης μεταφοράς.

Στη Φάση απόσπασης (soil detachment), τα εδαφικά σωματίδια με διαμέτρο $\leq 0.250\text{mm}$, αποκολλώνται από την επιφάνεια του εδάφους με την αναπήδηση της σταγόνας της βροχής.

Στη Φάση μεταφοράς, τα εδαφικά σωματίδια μεταφέρονται λόγω απορροής. “Στα αρχικά στάδια του φαινομένου η απορροή έχει τη μορφή ομοιόμορφης ρηχής ροής μικρής ταχύτητας, μεταφέροντας υλικά που έχουν ήδη αποσπαστεί από την εδαφική μάζα και ονομάζεται ροή κατά στρώσεις (sheet flow) ή ορθότερα επιφανειακή ροή (overland flow)” (Morgan R. P. C., Soil Erosion and Conservation, 2nd Edition, 1995). Είναι στρωτή με πολύ μικρή ή πρακτικά μηδενική διαβρωτική ικανότητα.

Η δράση της εξαντλείται στην απόπλυση (wash) του εδάφους (sheet erosion). Η συγκέντρωση της ροής (λόγω επιφανειακής τάσης) κατά την κατηφορική κίνηση του νερού, αποκτά διαβρωτική ικανότητα (inter-rill erosion), προκαλώντας αρχικά το σχηματισμό μικρών αυλακιών (inter-rills).

Κατά τη διάρκεια του φαινομένου της διάβρωσης κατά στρώσεις ελαττώνεται σταδιακά η διηθητικότητα του εδάφους σε ευρείες επιφάνειες. Στην περίπτωση όπου οι τιμές



κρίσιμων παραμέτρων ξεπεραστούν, το νερό που απέρρευε κατά στρώσεις, έχει την τάση να συγκλίνει προς κάποια τοπική ταπεινώση του εδάφους και να διαβρώνει με μεγαλύτερη ικανότητα. Ως αποτέλεσμα αυτών των συνθηκών είναι η εμφάνιση της *αυλακωτής/αυλακοειδής διάβρωσης (rill erosion)*, διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα κυρίως σε επικλινή, πρόσφατα καλλιεργημένα εδάφη, όπου σχηματίζονται πολυάριθμα -συνήθως μερικών εκατοστών (30-45 cm)- αυλάκια, οι επονομαζόμενες αυλακώσεις.

Με την πρόοδο του χρόνου και την συγκέντρωση του νερού σε σχηματισμένες κοίτες, μετατρέπεται η αυλακωτή διάβρωση σε *χαραδρωτική/ χαραδρωτή/ χαραδρώδη διάβρωση* ή σε *διάβρωση χαντακιών (gully erosion)*. Σε αυτό το στάδιο διάβρωσης, το νερό έχει συγκεντρωθεί σε χαράδρες με αποτέλεσμα το εδαφικό υλικό να απομακρύνεται με γοργούς ρυθμούς σε σημαντικό βάθος και πλάτος. Το τυπικό βάθος χαραδρωτικής διάβρωσης κυμαίνεται από λίγα μέτρα (0,5-5m), και σε περιπτώσεις όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια καταιγίδων, μπορεί να ανέρχεται σε βάθη ακόμη και άνω των 200 m.

3.3.4 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι παράγοντες που συντελούν έμμεσα ή και άμεσα στη ρύθμιση της έντασης του φαινομένου της διάβρωσης, πέρα από την δράση των κατακρημνισμάτων και του νερού είναι η τοπογραφία της περιοχής, οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους.

Σύμφωνα με τον Ευθυμίου (2016), οι κυριότεροι παράγοντες είναι:

- Φυτοκάλυψη: Η ύπαρξη χλωρίδας προκαλεί σημαντική μείωση της διάβρωσης συμβάλλοντας:
 - στη μείωση της επιφανειακής απορροής μέσω της αύξησης της τραχύτητας (μείωση ταχύτητας ροής) και της διηθητικής ικανότητας του εδάφους
 - στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της βροχής από τη φυτοκόμμη, καθώς επίσης και τη μείωση της πιθανότητας επαφής του νερού με το έδαφος
- Χαρακτηριστικά εδάφους: Η κοκκομετρική σύσταση, η συνεκτικότητα, η δομή κτλ. προκαλούν:
 - μείωση του ρυθμού απόσπασης των κόκκων (ισχυρή δομή, συνεκτικότητα)
 - μείωση της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας της ροής (τραχύτητα, μεγάλο μέγεθος κόκκων)
 - μείωση της ποσότητας της απορροής (υψηλή διαπερατότητα)



- Τοπογραφικά χαρακτηριστικά: Οι μεγάλες γωνίες κλίσης (slope gradient) και τα μεγάλα μήκη πλαγιάς (slope length) προκαλούν:
 - αύξηση της παροχής που συνεπάγεται αύξηση της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας της ροής
 - ευκολότερη απόσπαση των εδαφικών κόκκων

Επιπλέον σημαντικός παράγοντας της εδαφικής διάβρωσης αποτελεί η ύπαρξη δασικών περιοχών. Οι διαβρωτικές εργασίες επηρεάζονται από την αλλαγή της φυτοκάλυψης εξαιτίας της καύσης. Η καταστροφή της φυτοκάλυψης λόγω της καύσης, προκαλεί την αύξηση της επιφανειακής απορροής, τις απορροές αιχμής καταιγίδων και συνεπώς αυξάνει και το ρυθμό διάβρωσης.

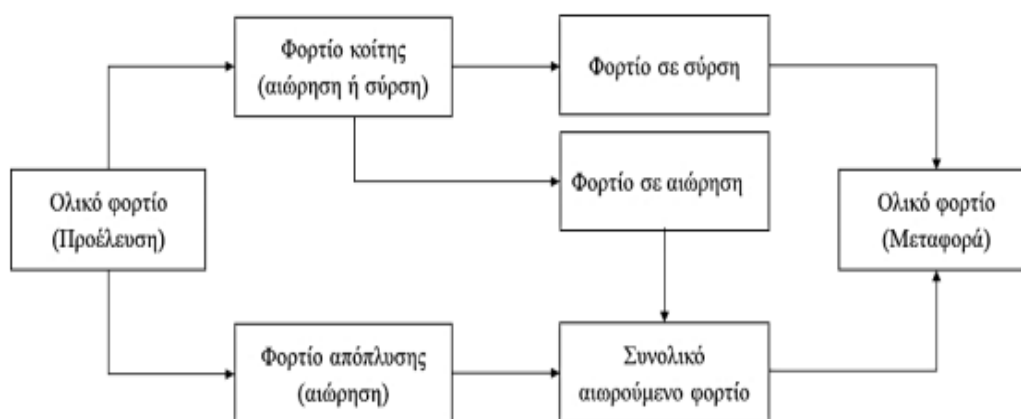
3.3.5 ΜΟΡΦΕΣ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Όπως αναφέρουν οι Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε. και Κουτσογιάννη Δ. (2001), τα φερτά υλικά μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με δύο παράγοντες. Αυτοί είναι ο τρόπος μεταφοράς τους και ο τρόπος προέλευσής τους. Ως προς τον τρόπο μεταφοράς διακρίνεται το φορτίο σε αιώρηση (suspended load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα και δεύτερον, το φορτίο σε σύρση (bed load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη. Παρόλα αυτά η διάκριση αυτή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μοναδική, επειδή φερτά υλικά του ίδιου μεγέθους και της ίδιας ορυκτολογικής σύστασης είναι πιθανό να μεταφέρονται είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση, ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας ροής (όπως η ταχύτητα ροής, τύρβη). Χονδροειδώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ως “φερτά υλικά σε σύρση είναι εκείνα με μέγεθος άνω των 0.85mm”. Η διάκριση αυτή βασίζεται στο κριτήριο που αναφέρει ότι η ταχύτητα καθίζησης γίνεται ίση με τη συρτική ταχύτητα (Bagnold, 1966).

Ως προς την προέλευσή τους, τα φερτά υλικά μπορούν να διακριθούν σε φορτίο κοίτης (bed material load) και σε φορτίο απόπλυσης (wash load). Το φορτίο κοίτης, το οποίο μπορεί να είναι είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση, αναφέρεται σε φερτά υλικά τα οποία ήδη βρίσκονται στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου και αποτελεί τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους, ενώ το φορτίο απόπλυσης παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων και προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής. Το φορτίο απόπλυσης λόγω του ότι μεταφέρεται μέσω της πλημμυρικής απορροής συνήθως είναι φορτίο σε αιώρηση και είναι πιο εύκολο να μετρηθεί στο πεδίο καθώς είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στη διατομή της κοίτης του ποταμού. Η στερεοπαροχή του φορτίου απόπλυσης σε ένα τμήμα ενός υδατορεύματος εξαρτάται από το ρυθμό που τα φερτά υλικά είναι διαθέσιμα στη λεκάνη απορροής και όχι από τη στερεομεταφορική ικανότητα της ροής. Το φορτίο απόπλυσης ιδιαίτερα στο χώρο της Μεσογείου, αποτελεί

το συντριπτικό ποσοστό της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης και μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων έντονων πλημμυρικών επεισοδίων το χρόνο.

Η εκτίμηση των ποσοτήτων στερεοαπορροής αποτελεί ένα ιδιαίτερα απαιτητικό και πολυσύνθετο πρόβλημα, καθώς πέρα από το стоχαστικό χαρακτήρα της διεργασίας της διάβρωσης, παρουσιάζονται αυξημένες δυσκολίες στον αξιόπιστο προσδιορισμό των συγκεντρώσεων φερτών υλικών σε αιώρηση και κυρίως σε σύρση.



Σχήμα 3.14 Σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς (πηγή: Λυκούδη Ε. Ε. & Ζαρρής Δ., 2006)

“Η μέτρηση της στερεοπαροχής είναι αρκετά τυποποιημένη, όσον αφορά στο φορτίο σε αιώρηση, περιλαμβάνοντας τη λήψη δειγμάτων από το ποτάμι και τον εργαστηριακό προσδιορισμό της περιεκτικότητάς τους σε αιωρούμενα φερτά. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται αισθητήρες για την πραγματοποίηση μετρήσεων. Αντίθετα, η μέτρηση του φορτίου σε σύρση, όπου τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη, είναι αρκετά πιο δύσκολη. Στη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική υπάρχουν διάφορες κατασκευές για την αποκαλούμενη «παγίδευση» των συρόμενων φερτών και ζύγισής τους. Η διαδικασία αυτή, πέρα από ακριβή, είναι και χρονοβόρα δεδομένου ότι ο ρυθμός στερεοπαροχής των συρόμενων φερτών υλών εξαρτάται σημαντικά από την πραγματοποίηση ιδιαίτερα ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων και την προηγούμενη κατάσταση της λεκάνης.” (Βαχαβιώλος Θ. Κ., 2014).

Για την εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής χρησιμοποιούνται δύο βασικές μέθοδοι. Αυτές είναι οι εμπειρικές (επαγωγικές) συσχετίσεις (και τα αντίστοιχα μοντέλα) και τα προσδιοριστικά/ εννοιολογικά μοντέλα. Οι δύο αυτές κατηγορίες δεν είναι εφικτό να διαχωριστούν πλήρως καθώς και τα προσδιοριστικά μοντέλα περιέχουν ως ένα βαθμό



εμπειρικές σχέσεις και συσχετίσεις που υποβοήθησαν την ανάπτυξή τους (Ιμπαμπί Μ., 2022).

3.3.6 ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Ο συσχετισμός της στερεοαπορροής με άλλα φυσικά μεγέθη ή χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής εκφράζει την έννοια των εμπειρικών μοντέλων στερεοαπορροής. Το βασικότερο πλεονέκτημα των εμπειρικών σχέσεων και μοντέλων αποτελεί η ευχρηστία και ευκολία στην χρήση τους. Η ευχρηστία τους αφορά την περίπτωση εγγύτητας των συνθηκών (κλιματολογικών, υδρολογικών, γεωλογικών κτλ.) μεταξύ της περιοχής αναφοράς των σχέσεων και της υπό εξέταση περιοχής. (Ραΐσης Φ., 2020)

Στην Ευρώπη, αναπτύχθηκε το μοντέλο Gavrilovic ή EPM (Erosion Potential Method), του Gavrilović S. (1972) με χρήση δεδομένων λεκανών απορροής της περιοχής των Βαλκανίων. Αποτελεί παραμετρικό μοντέλο το οποίο εκτιμά την εδαφική διάβρωση ετησίως. Η ανάπτυξη της μεθόδου οφείλεται στην ανάγκη για την προστασία καλλιεργούμενων εκτάσεων από τη διάβρωση και τον έλεγχο των ρεμάτων.

Η θεώρηση μονιμότητας των επιμέρους συντελεστών σε όλες τις χρονικές κλίμακες συνιστά ένα βασικό μειονέκτημα των εμπειρικών μοντέλων. Επομένως, τυχόν αλλαγές στο σύστημα συνιστούν την συλλογή εκ νέου δεδομένων και επαναπροσδιορισμό των συντελεστών των μοντέλων αυτών.

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ GAVRILOVIC (Erosion Potential Method), EPM

Το ομοίωμα Gavrilovic (Gavrilovic, 1962; 1970; 1972) αποτελεί εμπειρικό μοντέλο για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής χειμαρρικών ρεμάτων. Επιδέχθηκε μετέπειτα τροποποιήσεις από τους Lazarevic (1968, 1985) Pintas et al (1986).

Η εφαρμογή του έχει γίνει κατ' επανάληψιν σε χώρες όπως η Σερβία, Κροατία, Σλοβενία, Ελβετία, Γερμανία, Ιταλία, Αργεντινή κ.α.) και επίσης εφαρμόζεται και στην Ελλάδα με μεγάλη συχνότητα (Stefanidis et al., 1998; Μυρωνίδης, 2001; Emmanouilidis and Filippidis, 2002; Emmanouilidis et al., 2003 ; Σαπουντζής κα. 2009) προσδίδοντας αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης, τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας και κατ' επέκταση της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής, τη διευθέτηση χειμάρρων και το σχεδιασμό έργων προστασίας από τη διάβρωση (Κουρακλή, 2010).

Αποτελείται από μία εξίσωση η οποία «προέκυψε από το συνδυασμό πληροφοριών που προήλθαν από την επεξεργασία δεδομένων τηλεπισκόπησης, την επίβλεψη πειραματικών λεκανών απορροής ποσοτικοποίησης της διάβρωσης χωροθετημένες σε



διαφορετικές τοποθεσίες της πρώην Γιουγκοσλαβίας, ενώ ενισχύθηκε από εργαστηριακές εργασίες.» (Ευθυμίου, 2016).

Το βασικότερο πλεονέκτημα του μοντέλου Gavrilovic, πλην την δυνατότητας εφαρμογής του σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων και της σχετικής υπολογιστικής ευκολίας που ενέχει, οφείλεται στο γεγονός ότι δε δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, όπως το μοντέλο USLE. “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 I. & Kostadinov S., 2010).

Το ομοίωμα παρουσιάζει παρ’ όλα αυτά και κάποιους περιορισμούς. Βασικός λόγος αποτελεί το γεγονός ότι καθοριστικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και η κοκκομετρική σύσταση, δε λαμβάνονται υπόψη εξαιτίας της δυσκολίας προσδιορισμού τους σε μεγάλες περιοχές μελέτης έκτασης. Επιπλέον, δεν υπάρχουν συντελεστές οι οποίοι καθορίζουν τον όγκο και την εποχική ανομοιομορφία της απορροής (πλημμυρικά φαινόμενα) ως καθοριστικούς παράγοντες της έντασης της διάβρωσης. Τέλος, η βαθμονόμηση των διαφορετικών συντελεστών της εξίσωσης έχει γίνει για τις συνθήκες της Σερβίας, και απαιτείται η επέκτασή της και σε άλλες περιοχές.” (Ευθυμίου Ν. Γ., 2016)

Η βασική εξίσωση του μοντέλου Gavrilovic (1962, 1970, 1972) είναι:

$$w = \pi \cdot T \cdot P \cdot \sqrt{Z^3} \quad (3.13)$$

όπου w ο μέσος ετήσιος όγκος εδαφικής διάβρωσης¹ [$m^3 \cdot (km^2)^{-1} \cdot \gamma^{-1}$], T ο συντελεστής θερμοκρασίας, P η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιοχής μελέτης [mm] και Z συντελεστής διάβρωσης του εδάφους της περιοχής μελέτης.

3.4.1 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ P

Τα ψηφιακά δεδομένα της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης ελήφθησαν από το σάιτ <http://kyg.hydroscope.gr/> του κτηματολογίου Α.Ε. και αφορούν σταθμούς που είναι υπό την επίβλεψη του υπουργείου περιβάλλοντος, ενέργειας και κλιματικής αλλαγής. Από τους έξι σταθμούς, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν οι τέσσερις. Οι σταθμοί των

¹Για την αναγωγή του μεγέθους σε μάζα διαβρωμένου εδάφους πολλαπλασιάζεται με τη φαινόμενη πυκνότητα των πετρωμάτων η οποία, σύμφωνα με τον Κωτούλα Δ. (2001), κυμαίνεται μεταξύ 2.65 – 2.75 [t / m^3], με συνήθη τιμή το 2.67 [t / m^3].



Σερβίων και του Φρούριου απορρίφθηκαν εξαιτίας του μικρού υψόμετρου τους. Στον επόμενο πίνακα, (Πίνακας 3.13), παρουσιάζονται οι σταθμοί με επαρκείς χρονοσειρές βροχόπτωσης, ενώ στον Πίνακα 3.14 η μέση ετήσια βροχόπτωση των επιλεγμένων σταθμών.

Πίνακας 3.13 Πληροφοριακά στοιχεία βροχομετρικών σταθμών, περιοχής μελέτης.

ΣΤΑΘΜΟΙ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
ΠΟΝΤΟΚΩΜΗ	x=309913.0, y=4475162.5	718.8	01/07/1950- 01/09/2010
ΤΣΟΥΥΛΙΟ	x=272345.69, y=4459789.0	856	01/07/1950- 01/09/2010
ΣΙΑΤΙΣΤΑ	x=291609.09, y=4459428.5	933.1	01/06/1950- 01/09/2011
ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΣ	x=256548.8, y=4452954.5	1053	01/01/1967- 01/09/2001

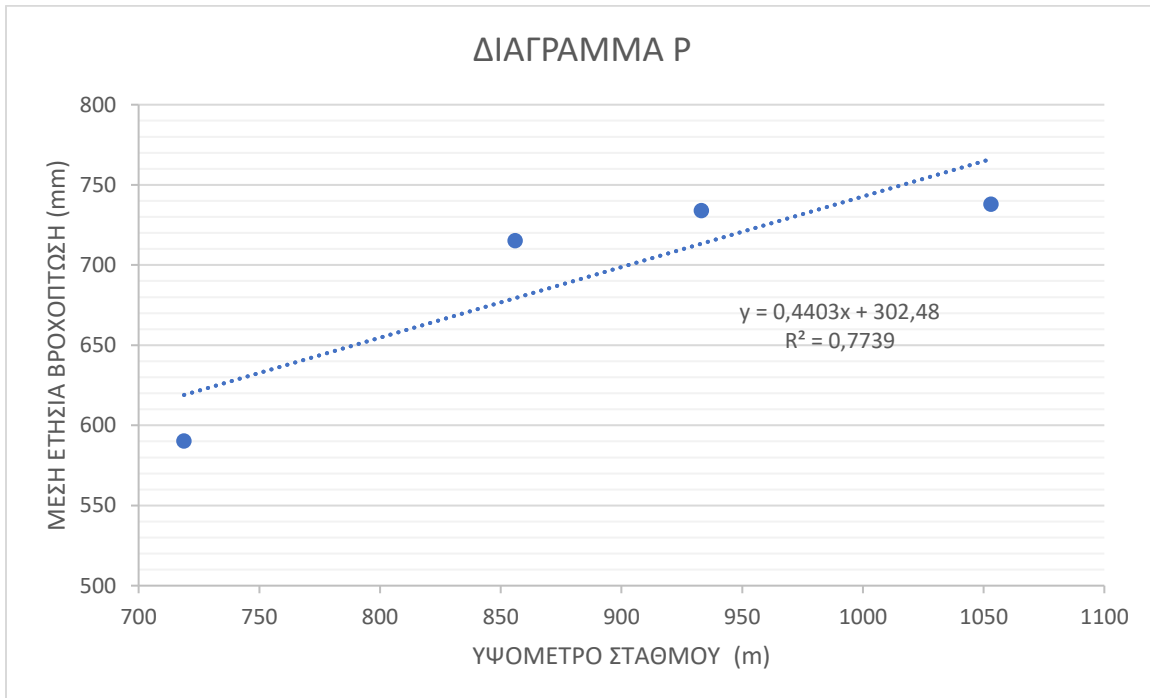
Πίνακας 3.14 Μέση ετήσια βροχόπτωση και υψόμετρο επιλεγμένων σταθμών.

ΣΤΑΘΜΟΙ	ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)
ΠΟΝΤΟΚΩΜΗ	590.3	718.8
ΤΣΟΥΥΛΙΟ	715.3	856
ΣΙΑΤΙΣΤΑ	734.0	933.1
ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΣ	737.9	1053

Συσχετίζοντας τη μέση ετήσια σημειακή βροχόπτωση με το υψόμετρο, προέκυψε η Εξίσωση (3.14) με δείκτη συσχέτισης 0.77.

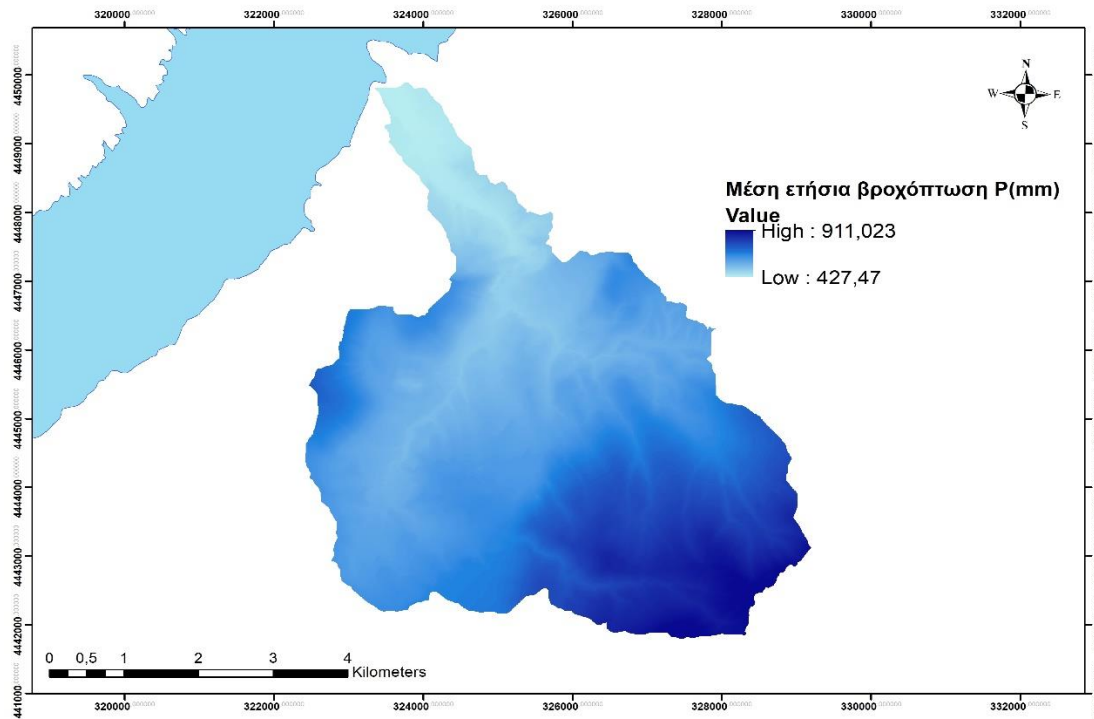
$$P = 0.4403z + 302.48 \quad (3.14)$$

Όπου P η μέση ετήσια βροχόπτωση ενός σημείου (mm) και z το υψόμετρο του σημείου αυτού (m).

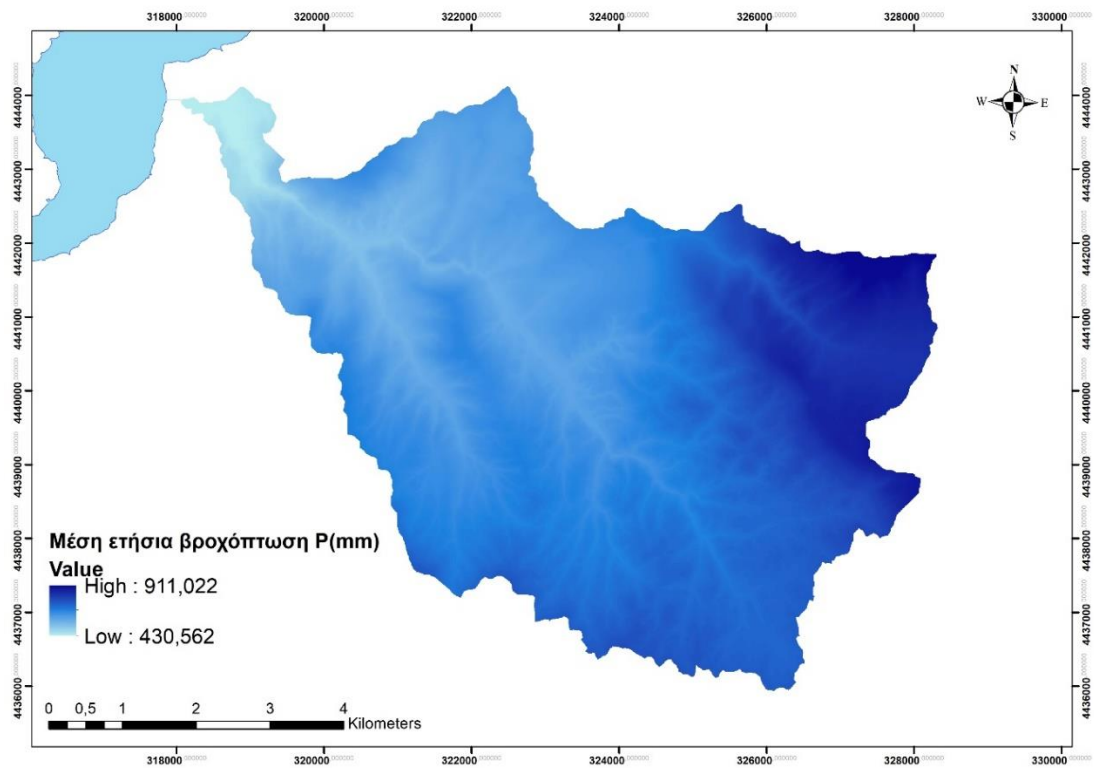


Σχήμα 3.15 Συσχέτιση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο του εδάφους

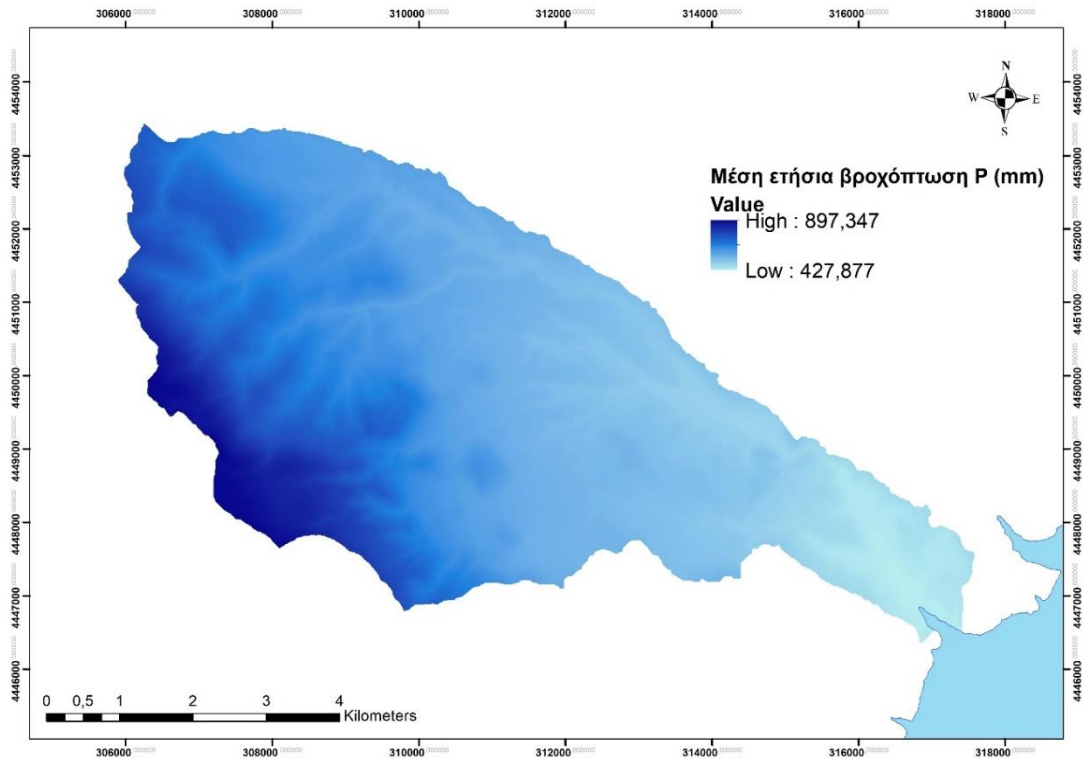
Με χρήση του εργαλείου RasterCalculator του GIS, προέκυψαν οι χάρτες της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης των εξεταζόμενων λεκανών απορροής και απεικονίζονται στα Σχήματα 3.16, 3.17, 3.18 και 3.19.



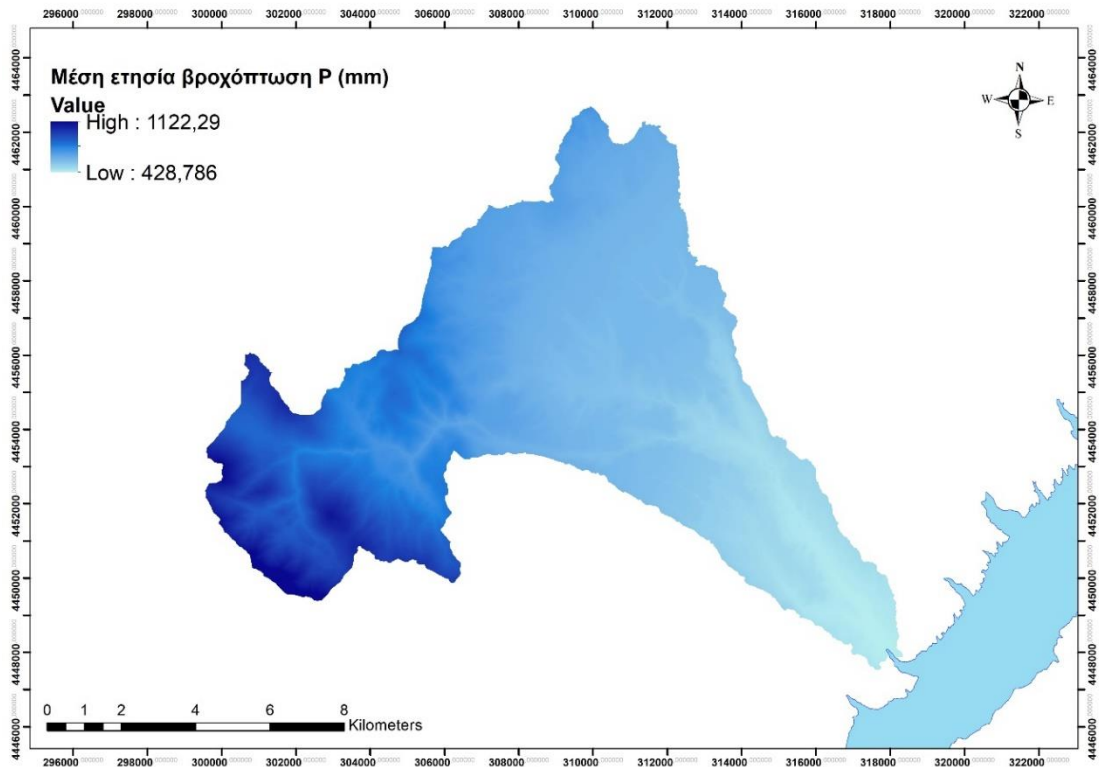
Σχήμα 3.16 Χάρτης μέσης ετήσια βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Δέμα.



Σχήμα 3.17 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Τσαγκακή.



Σχήμα 3.18 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.



Σχήμα 3.19 Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.



3.4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ T

Ο συντελεστής θερμοκρασίας, T, ορίζεται ως:

$$T = \sqrt{0.1 + \frac{T_o}{10}} \quad (3.15)$$

Όπου T_o η μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$). Για τους επιλεγμένους σταθμούς η μέση ετήσια θερμοκρασία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.15.

Πίνακας 3.15 Μέση ετήσια θερμοκρασία και υψόμετρων επιλεγμένων σταθμών.

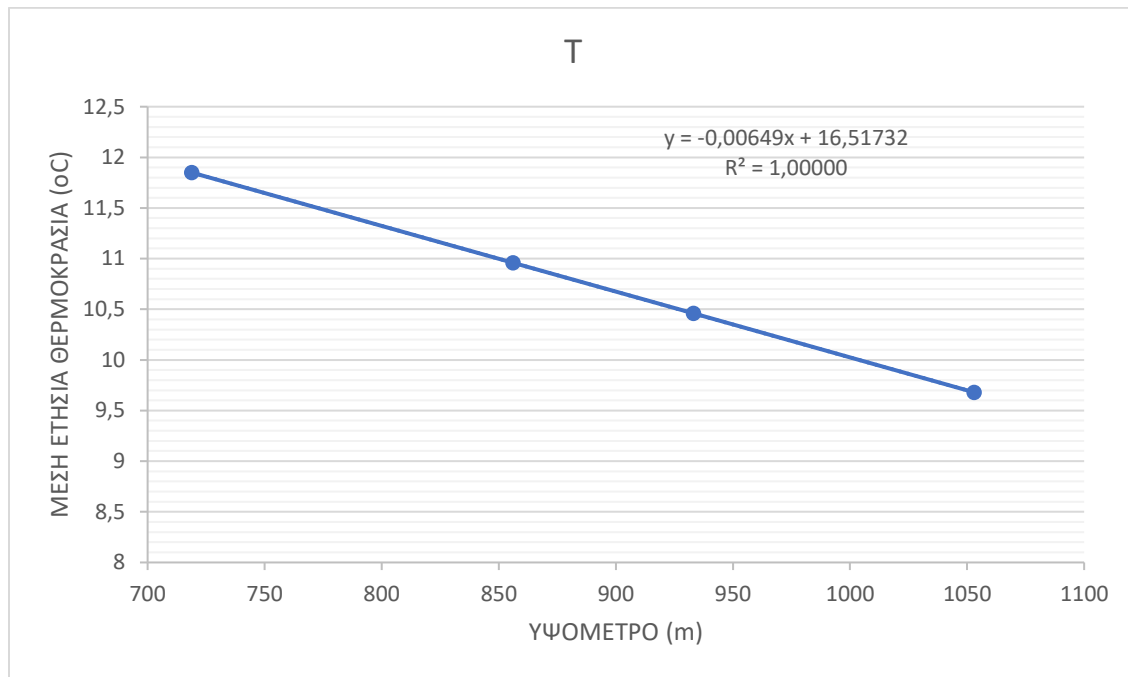
ΣΤΑΘΜΟΙ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ($^{\circ}\text{C}$)
ΠΟΝΤΟΚΩΜΗ	718.8	11.9
ΤΣΟΥΛΙΟ	856	11
ΣΙΑΤΙΣΤΑ	933.1	10.5
ΠΕΝΤΑΛΟΦΟΣ	1053	9.7

Το επόμενο διάγραμμα προέκυψε μέσω συσχέτισης των τιμών θερμοκρασίας με τα αντίστοιχα υψόμετρα. Η εξίσωση που εξαγεται είναι η εξής :

$$T = -0.0069z + 16.52 \quad (3.16)$$

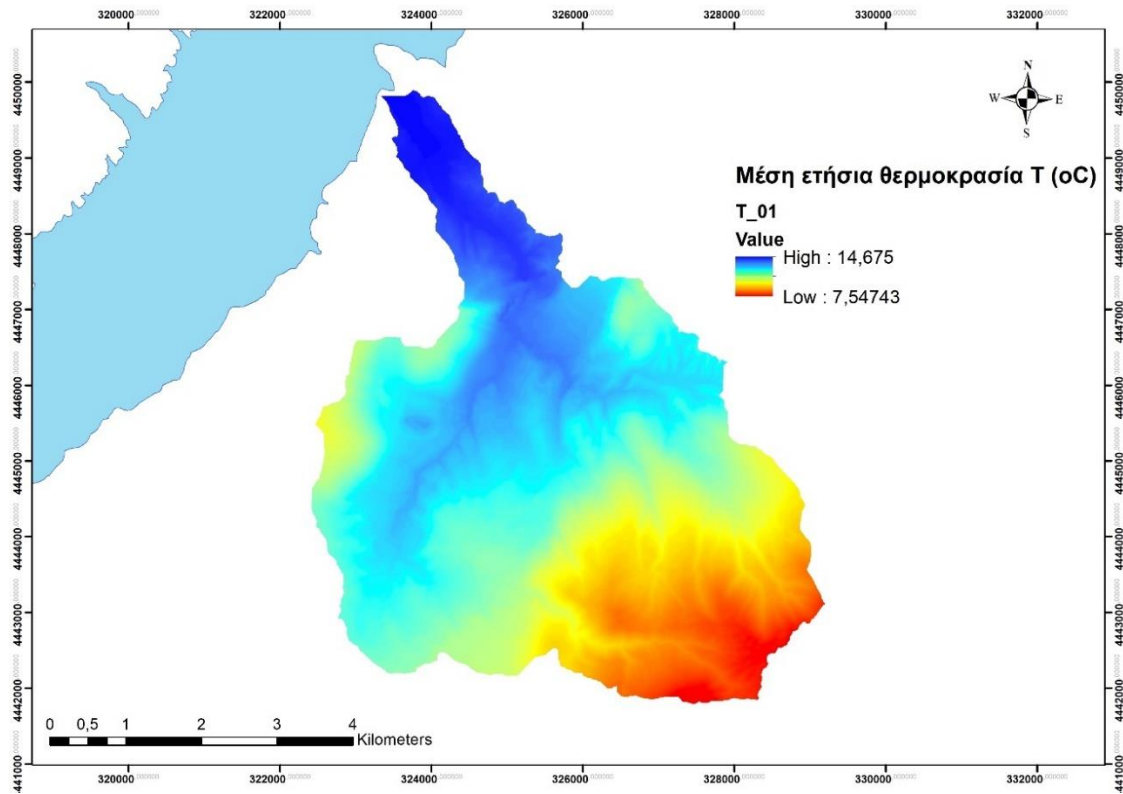
Όπου T η μέση ετήσια θερμοκρασία ενός σημείου ($^{\circ}\text{C}$) και z το υψόμετρο του σημείου αυτού (m).

²“Η αρχική εκδοχή του EPM δε μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των -10°C εξαιτίας του τρόπου ορισμού του συντελεστή θερμοκρασίας” (Milanesi L., Pilotti M., Clerici A., & Gavrilovic Z., 2015)

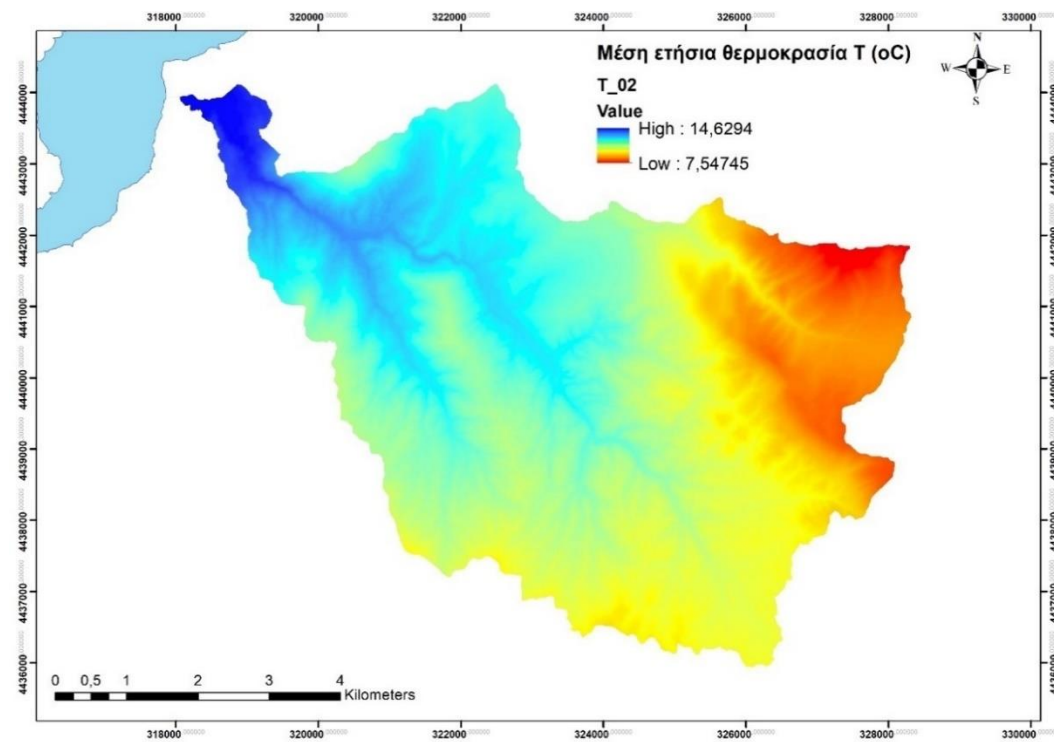


Σχήμα 3.20 Συσχέτιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο του εδάφους.

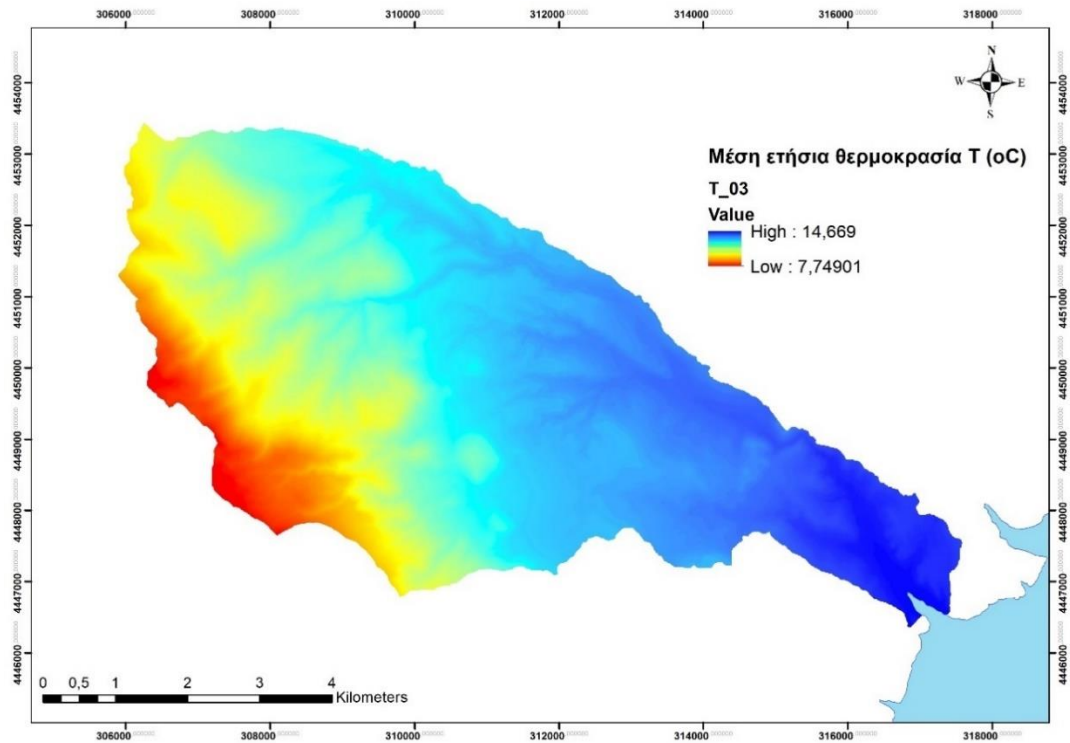
Με τη χρήση του εργαλείου RasterCalculator, στο περιβάλλον του GIS προκύπτει ο παρακάτω χάρτης για τη μέση ετήσια θερμοκρασία κάθε λεκάνης, (Σχήματα 3.21, 3.22, 3.23 και 3.24).



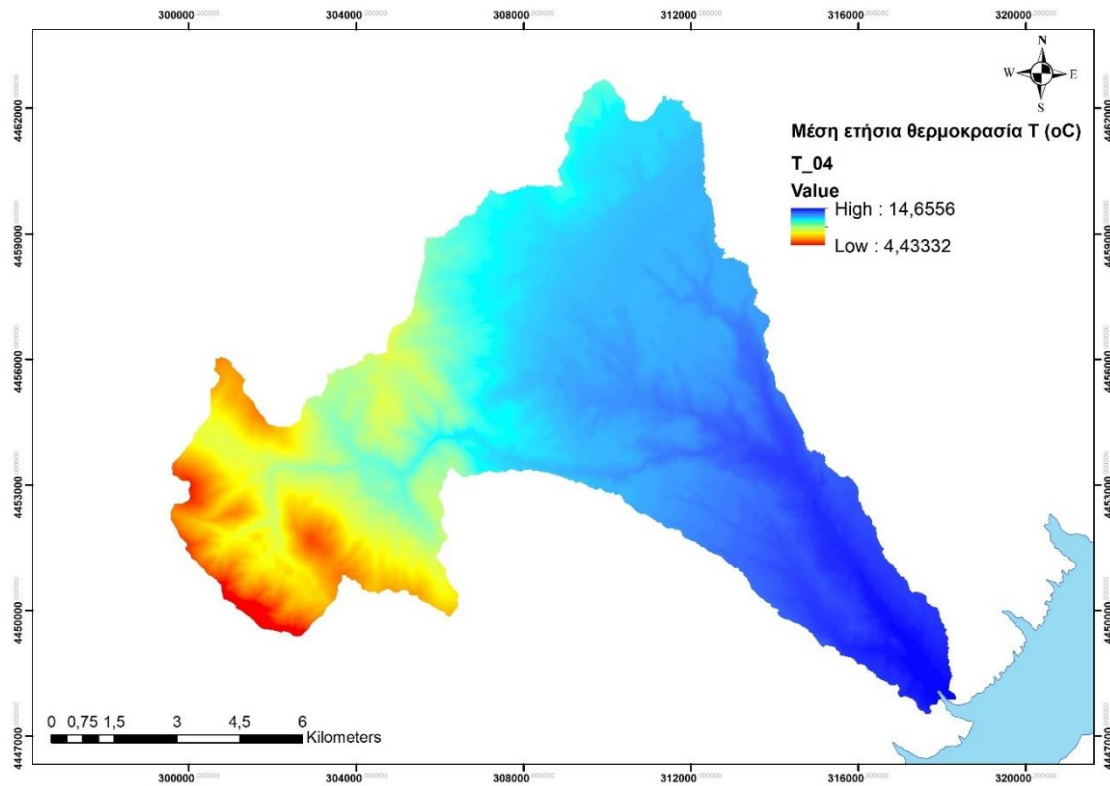
Σχήμα 3.21 Μέση ετήσια θερμοκρασία T λεκάνης απορροής Δέμα.



Σχήμα 3.22 Μέση ετήσια θερμοκρασία λεκάνης απορροής Τσάγκακη.



Σχήμα 3.23 Μέση ετήσια θερμοκρασία T λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.



Σχήμα 3.24 Μέση ετήσια θερμοκρασία T λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.



Από τους χάρτες της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας είναι εμφανές ότι στα πεδινά τμήματα των λεκανών παρουσιάζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες .

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (3.15), υπολογίζεται τελικά ο συντελεστής θερμοκρασίας των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.

Ο συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z , εκτιμάται από την Εξίσωση (3.17):

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + \sqrt{J}) \quad (3.17)$$

όπου X συντελεστής που εκφράζει την προστασία της φυτοκάλυψης της περιοχής μελέτης κατά της εδαφικής διάβρωσης³, Y συντελεστής που εκφράζει την ανθεκτικότητα των πετρωμάτων της περιοχής μελέτης στη διάβρωση της βροχόπτωσης, φ συντελεστής που εκφράζει την υφιστάμενη διάβρωση της περιοχής μελέτης και J η μέση κλίση εδάφους της περιοχής μελέτης [%]⁴.

Ο προσδιορισμός των συντελεστών γίνεται με τη χρήση των παρακάτω πινάκων (Πίνακας 3.16, 3.17 και 3.18), οι οποίοι συναντώνται στη βιβλιογραφία (Κωτούλας Δ., 2001)

Πίνακας 3.16 Τιμές συντελεστή X , του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την κατάσταση της λεκάνης και το είδος της φυτοκάλυψης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)

α/α	Κατάσταση Λεκάνης και Είδος Φυτοκάλυψης	X
ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ		
1	Έδαφος πλήρως υποβαθμισμένο, μη καλλιεργήσιμο	1.00
2	Αγροί καλλιεργούμενοι με κλιτείες	0.90
3	Αμπελώνες χωρίς βλάστηση στο έδαφος	0.70
4	Υποβαθμισμένες δασοσυστάδες και θαμνώνες με υποβαθμισμένο έδαφος	0.60
5	Λιβάδια, αγροί με τριφύλλι και άλλες παρόμοιες καλλιέργειες	0.40
6	Εκτεταμένες δασοσυστάδες και θαμνώνες σε καλή κατάσταση	0.05
ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ		
1	Διευθετημένες κοίτες με φράγματα	0.70
2	Αγροί καλλιεργημένοι συχνά κατά τις ισοϋψείς	0.63

³“Ο συντελεστής X εμπεριέχει δύο επιμέρους συντελεστές, το συντελεστή χρήσης γης x (εξαρτάται από τον τύπο γης, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης και το βαθμό της φυτικής κάλυψης) και το συντελεστή φυτικής κάλυψης a (εξαρτάται από τα μέτρα που λαμβάνονται για τη μείωση των διεργασιών που εντείνουν την εδαφική διάβρωση κυρίως στη γεωργία).” (Ευθυμίου Ν. Γ., 2016)

⁴Σε περιβάλλον GIS δεν αρκεί μόνο ο υπολογισμός της κλίσης σε ποσοστό, αλλά απαιτείται και η διαίρεση με το 100 για τον υπολογισμό του συντελεστή Z



3	Αγροί καλά καλλιεργούμενοι	0.54
4	Αγροί καλλιεργημένοι κατά λωρίδες οριζόντιες	0.45
5	Αγροί βαθμιδωμένοι	0.36
6	Αμπελώνες κατά τις ισοϋψείς	0.32
7	Υποβαθμισμένα εδάφη μετά από αναχλόαση, βελτιωμένα λιβάδια	0.30
8	Εδάφη με αγωγούς ανάσχεσης και συγκράτησης του νερού	0.27
9	Εδάφη λεκανών με αναδασώσεις συνοδευόμενες και από βαθμίδωση του εδάφους	0.10
ΜΟΡΦΗ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ		
1	Μικτές δασοσυστάδες και πυκνοί θαμνώνες ή δασοσυστάδες αραιές με υπόροφο	0.05-0.20
2	Δασοσυστάδες κωνοφόρων με υπόροφο ασθενή ή θαμνώνες όχι σύμπυκνοι	0.20-0.40
3	Δασοσυστάδες και θαμνώνες υποβαθμισμένοι, λιβάδια	0.40-0.60
4	Λιβάδια και εδάφη καλλιεργούμενα, υποβαθμισμένα	0.60-0.80
5	Επιφάνεια χωρίς φυτοκάλυψη	0.80-1.00

Πίνακας 3.17 Τιμές συντελεστή Υ, του μοντέλου Ganvilovic, ανάλογα με την πετρολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)

α/α	Είδος Πετρώματος και Υπεδάφους	Υ
1	Σκληρά πετρώματα, ανθεκτικά στη διάβρωση	0.20-0.60
2	Πετρώματα μετρίως ανθεκτικά στη διάβρωση	0.60-1.00
3	Εύθρυπτα πετρώματα	1.00-1.30
4	Αποθέσεις, μορένες, άργιλοι, ψαμμόλιθοι και άλλα λιγότερο ανθεκτικά πετρώματα	1.30-1.80
5	Πολύ ευαίσθητα στη διάβρωση πετρώματα και εδάφη	1.80-2.00

Πίνακας 3.18 Τιμές συντελεστή Φ, του μοντέλου Ganvilovic, ανάλογα με την υπάρχουσα εδαφική διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)

α/α	Είδος και Βαθμός Διάβρωσης Λεκάνης	Φ
1	Ασθενής διάβρωση	0.10-0.20
2	Επιφανειακή διάβρωση στα 25-50% της λεκάνης	0.30-0.50
3	Επιφανειακή διάβρωση, ολισθήσεις και αποθέσεις, καρστική διάβρωση	0.60-0.70
4	Το 50-80% της λεκάνης είναι υποβαθμισμένο από χαραδρώσεις και ολισθήσεις	0.80-0.90
5	Πλήρης υποβάθμιση από έντονες διαβρώσεις	0.90-1.00



Είναι σύνηθες στο μοντέλο του EPM να κατηγοριοποιούνται οι υποπεριοχές των λεκανών απορροής, βάσει της τιμής που λαμβάνει ο συντελεστής διάβρωσης, Z, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.19).

Πίνακας 3.19 Ερμηνεία συντελεστή Z, του μοντέλου Gavrilovic, για τη διάβρωση της λεκάνης (πηγή: GavrilovicZ .etal., 2004)

Κατηγορία Διάβρωσης	Ποιοτική Κατηγοριοποίηση Διάβρωσης	Z
I	Εκτενής διάβρωση –βαθείς διεργασίες διάβρωσης (χαραδρώσεις, ολισθήσεις και παραπλήσια)	>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

Συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης ο υπολογισμός των υποπαραμέτρων της εξίσωσης (3.17), έγινε ως εξής :

- Συντελεστής φυτοκάλυψης X

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή φυτοκάλυψης X, έγινε η αντιστοίχιση των κωδικών Corine με τιμές που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία (Κωτούλας, 2001) και έγιναν εύλογες παραδοχές για τις ελλείπουσες τιμές. Παράχθηκαν με αυτό τον τρόπο οι ψηφιακοί χάρτες που απεικονίζονται στις επόμενες εικόνες.

- Συντελεστής ανθεκτικότητας πετρωμάτων κατά της βροχόπτωσης, Y

Ο προσδιορισμός του συντελεστή ανθεκτικότητας πετρωμάτων Y, έγινε με την αντιστοίχιση του συντελεστή αυτού με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή, με τη βοήθεια στοιχείων που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία (Κωτούλας, 2001). Ο συντελεστής Y εκφράζει την ανθεκτικότητα των πετρωμάτων έναντι της διάβρωσης.

- Συντελεστής υφιστάμενης διάβρωσης φ

Ο συγκεκριμένος συντελεστής εκφράζει το βαθμό και το είδος της διάβρωσης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης. Ο τρόπος υπολογισμού του με ακρίβεια απαιτεί την λήψη δειγμάτων από την περιοχή, τα οποία αναλύονται. Στην παρούσα εργασία έγινε η θεώρηση ότι αποτελεί συνάρτηση των χρήσεων γης και των γεωλογικών σχηματισμών που εντοπίζονται, μέσω της γραμμικής εξίσωσης (3.19)

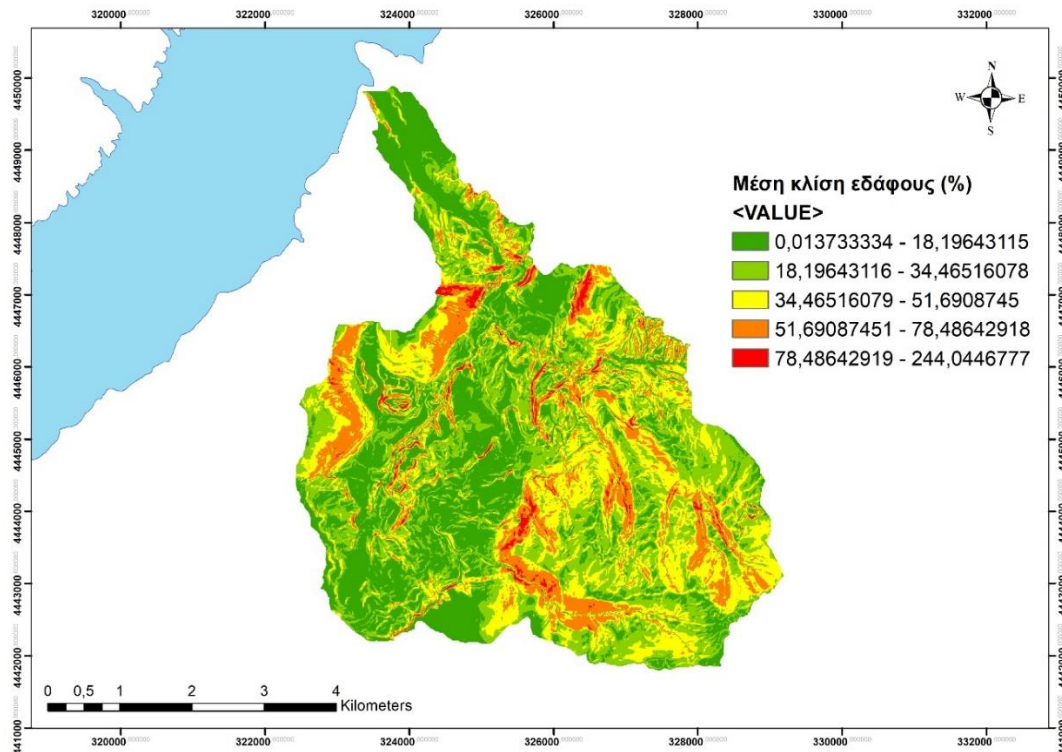


$$\varphi = 0.7 \cdot X + 0.3 \cdot Y \quad (3.19)$$

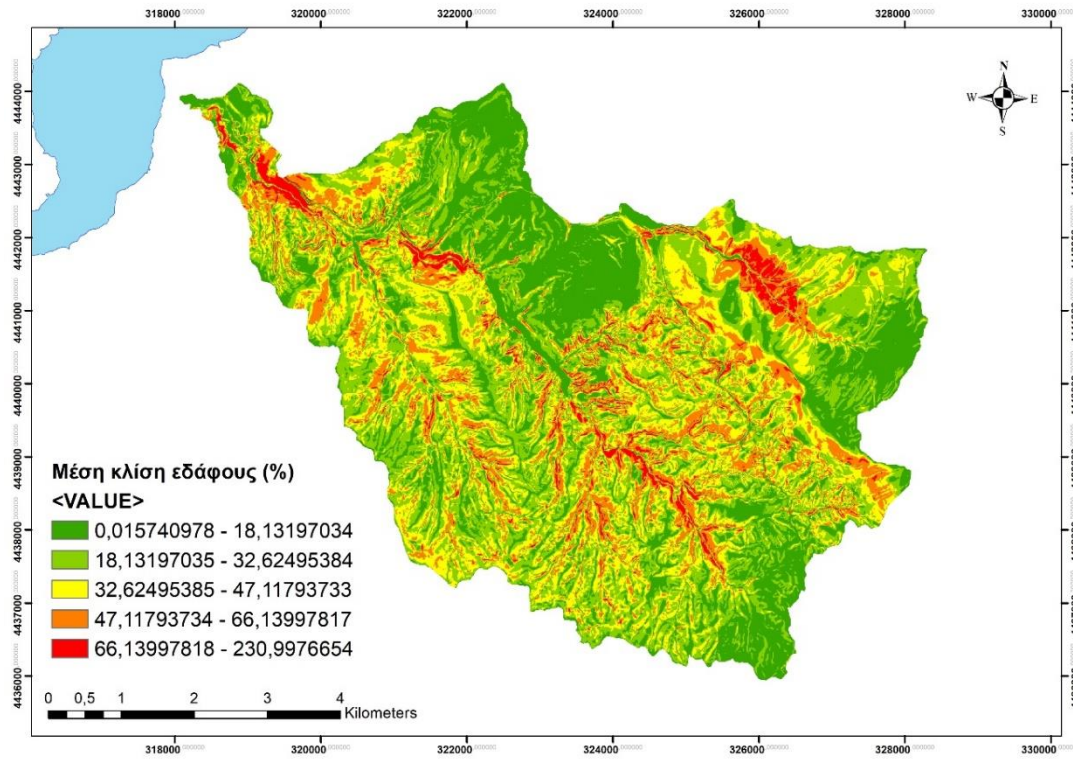
Πιο συγκεκριμένα, κρίνεται σημαντικότερη η συμβολή του πετρώματος από τη χρήση γης, γι' αυτό και λαμβάνει μεγαλύτερο συντελεστή.

Μέση κλίση εδάφους J

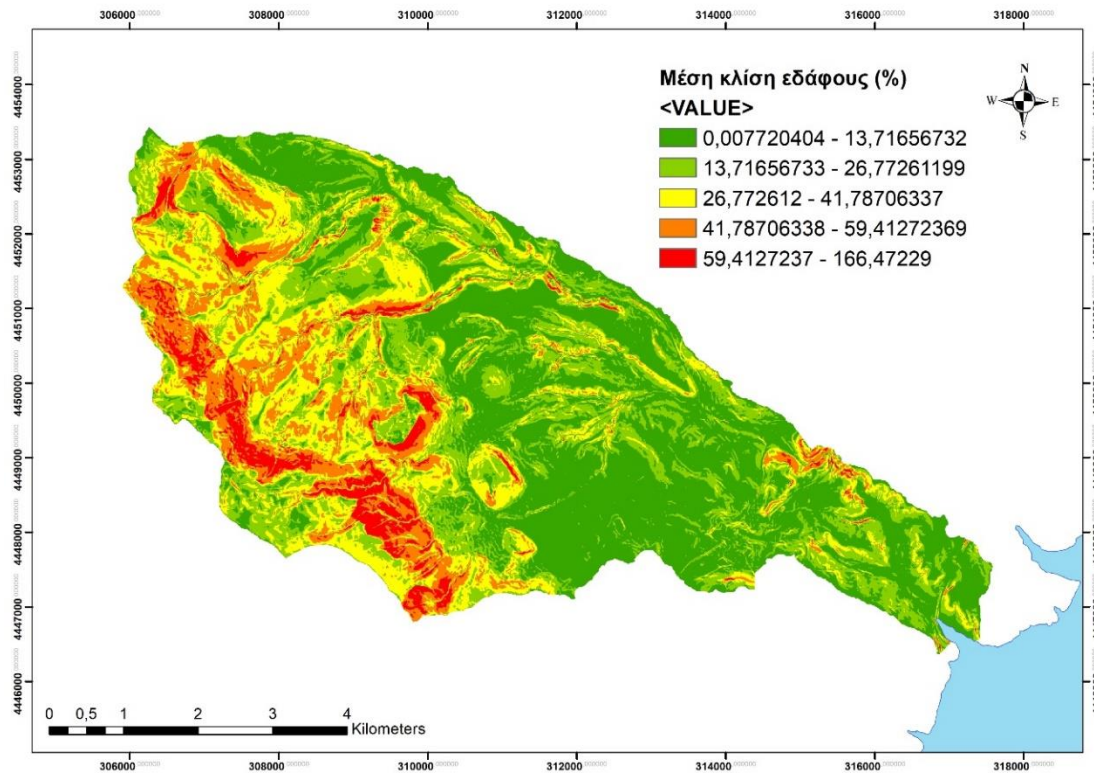
Η ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους εξήχθη ορίζοντας κατάλληλα την εντολή Slope. Στα επόμενα σχήματα (Σχήματα 3.25, 3.26, 3.27 και 3.28) παρουσιάζεται ο ψηφιακός χάρτης που προέκυψε για τις εξεταζόμενες λεκάνες.



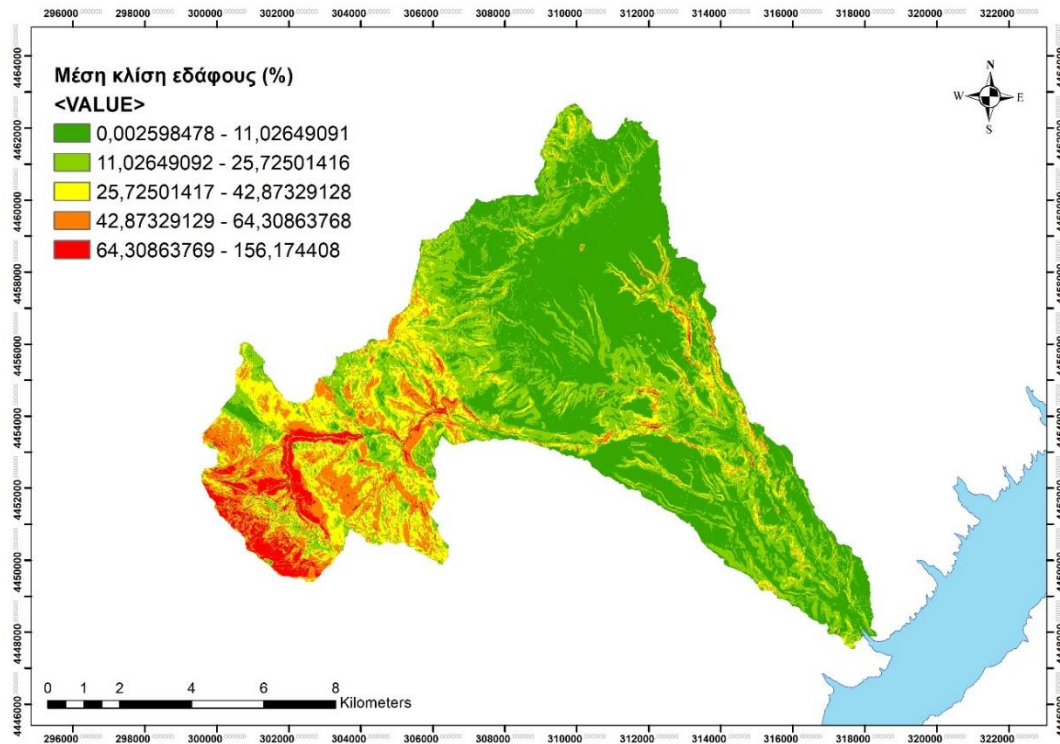
Σχήμα 3.25 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Δέμα.



Σχήμα 3.26 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Τσάγκακη.

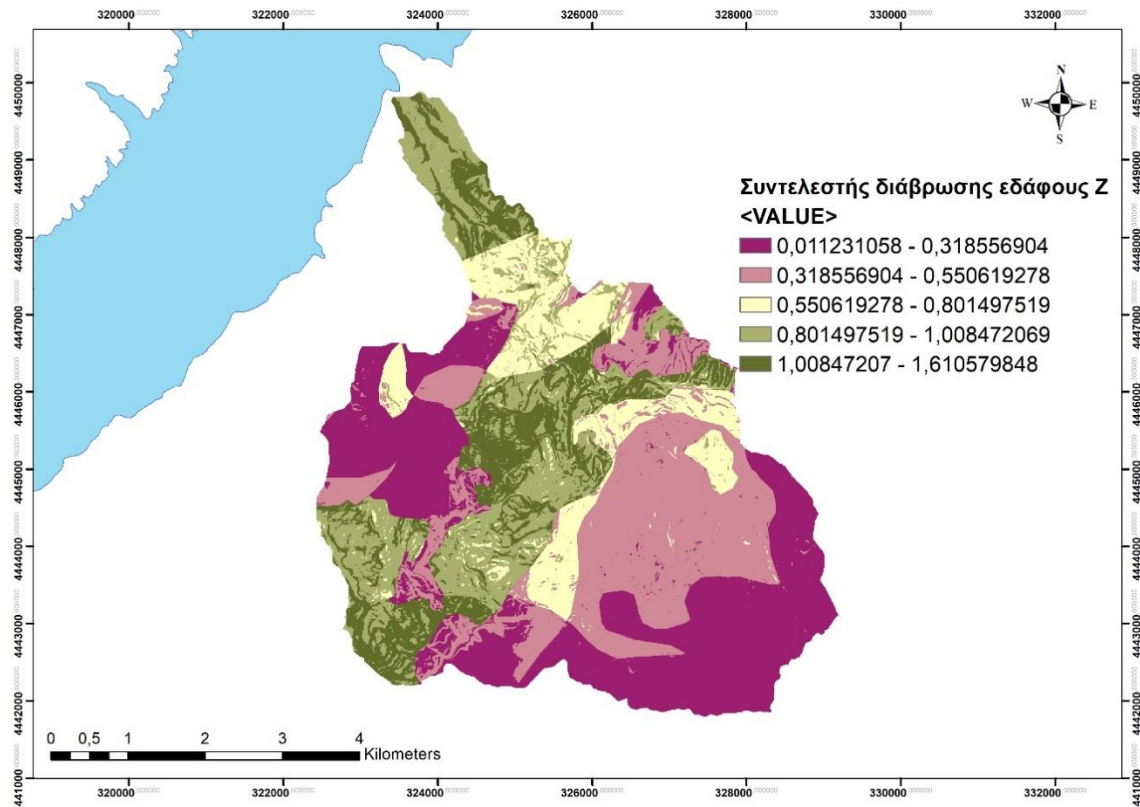


Σχήμα 3.27 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.

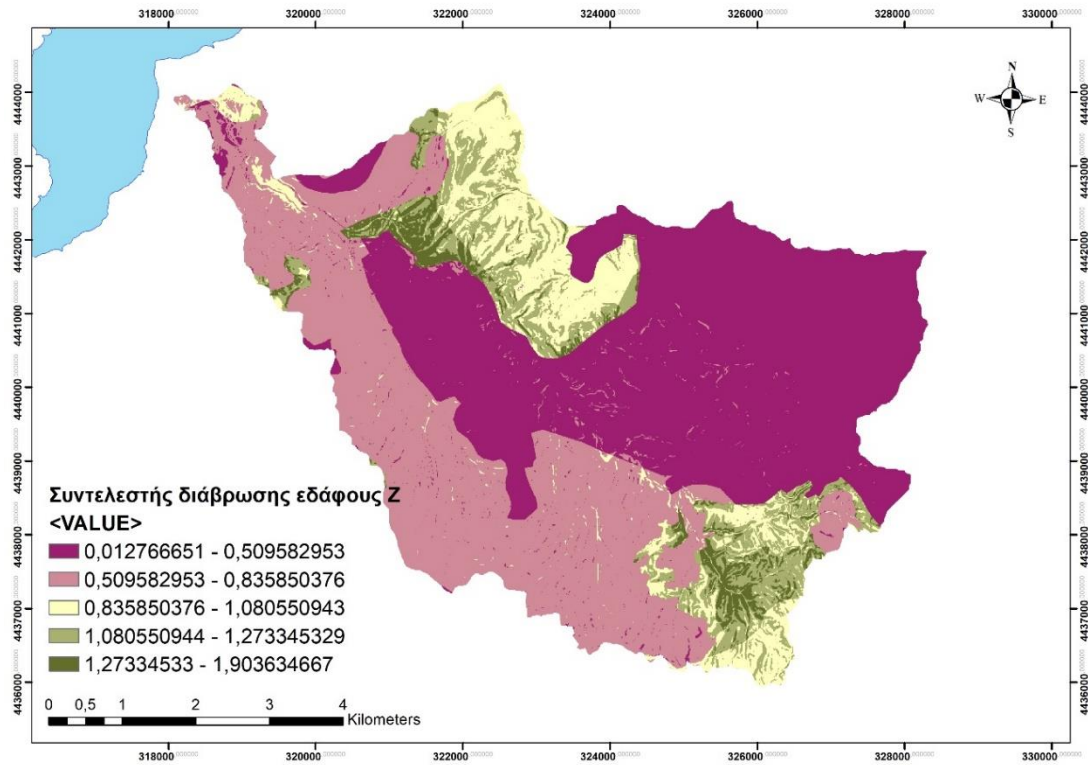


Σχήμα 3.28 Ποσοστιαία μέση κλίση εδάφους λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.

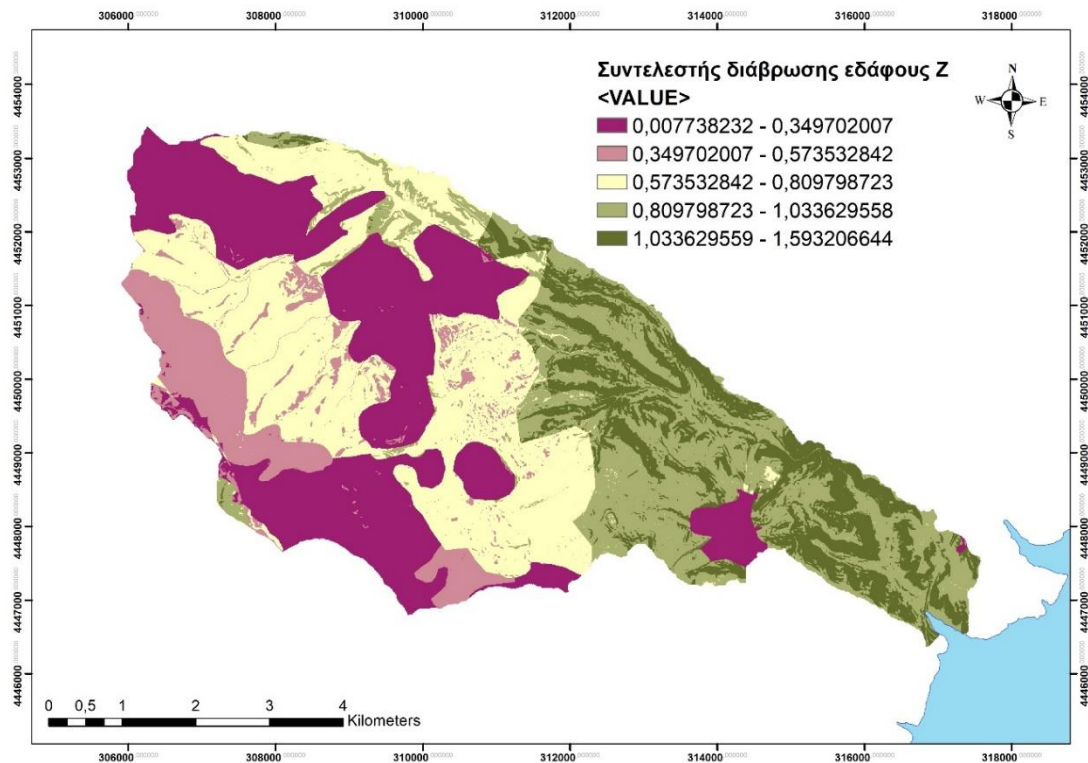
Παρακάτω στους ψηφιακούς χάρτες των Σχημάτων 3.29, 3.30, 3.31 και 3.32, παρουσιάζεται ο συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, των εξεταζόμενων λεκανών.



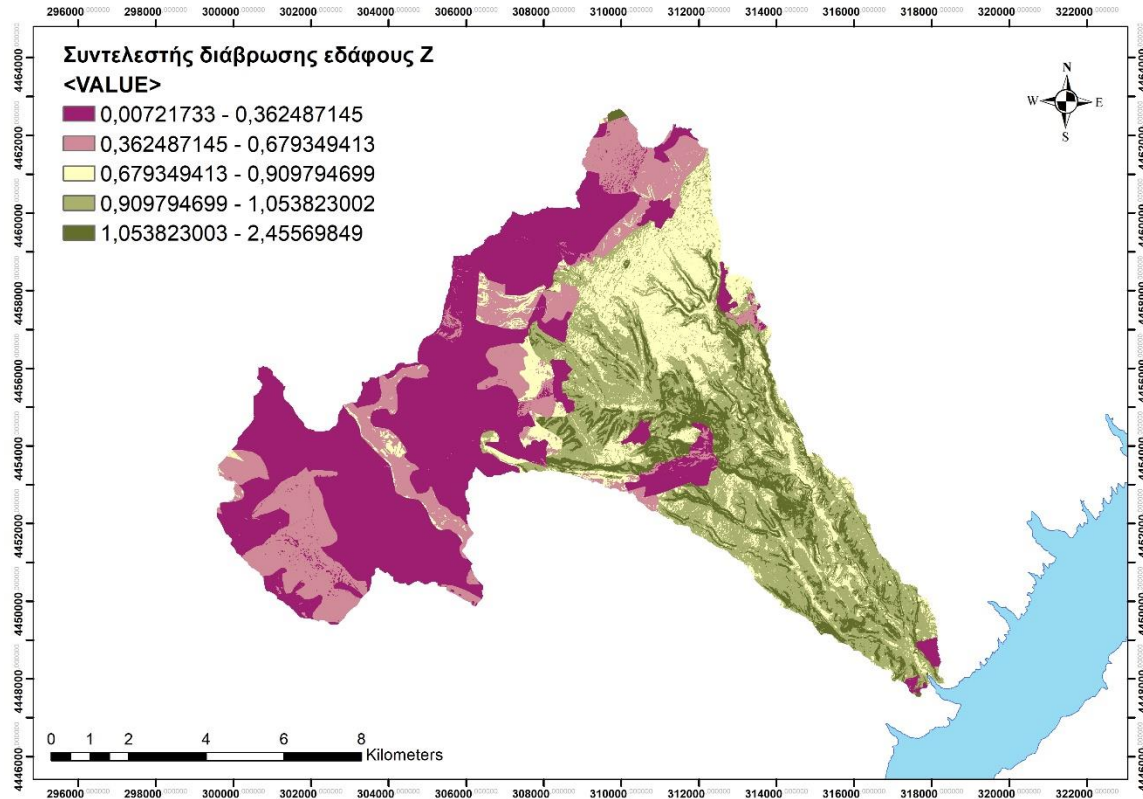
Σχήμα 3.29 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Δέμα.



Σχήμα 3.30 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Τσαγκακή.



Σχήμα 3.31 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Καρδόλακκα.



Σχήμα 3.32 Συντελεστής διάβρωσης του εδάφους Z, λεκάνης απορροής Λευκοπηγής.

3.4.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ (Retention Coefficient), R

Ο Gavrilović S., το 1962, όρισε το συντελεστή κατακράτησης ως:

$$R = \frac{G}{w} \quad (3.20)$$

όπου R ο συντελεστής κατακράτησης, που λαμβάνει τιμές από 0.00 έως 1.00, G η μέση ετήσια στερεοαπορροή στην έξοδο της λεκάνης και w η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση εντός της λεκάνης απορροής.

Η εκτίμηση του συντελεστή κατακράτησης, R, στο μοντέλο Gavrilovic γίνεται με τη χρήση της επόμενης εξίσωσης:

$$R_{Gavrilovic} = \frac{4 \cdot \sqrt{O \cdot D}}{L + 10} \quad (3.21)$$



όπου O η περίμετρος της λεκάνης απορροής / μήκος υδροκρίτη [km], D η μέση υψομετρική απόσταση της λεκάνης απορροής [km] και L το μήκος του κύριου υδατορεύματος που διατρέχει την λεκάνη απορροής [km].

Ο Zemljic M., το 1971, ύστερα από έρευνες σε λεκάνες απορροής των Άλπεων, παρατήρησε πως η Εξίσωση (τείνει να υπερεκτιμά το συντελεστή κατακράτησης R , και ορισμένες φορές επιστρέφει μέχρι και τιμές άνω της μονάδας.” (Milanesi L., Pilotti M., Clerici A., & Gavrilovic Z., 2015) Επομένως, ο Zemljic M., το 1971, προχώρησε στην τροποποίηση της εξίσωσης που προτείνεται από το μοντέλο Gavrilovic, ως εξής:

$$R_{Zemljic} = \frac{\sqrt{O \cdot D}}{(L + 10)} \cdot \frac{(L + L_i)}{F} \quad (3.22)$$

όπου O η περίμετρος της λεκάνης απορροής / μήκος υδροκρίτη [km], D η μέση υψομετρική απόσταση της λεκάνης απορροής [km], L το μήκος του κύριου υδατορεύματος που διατρέχει την λεκάνη απορροής [km], L_i το μήκος των δευτερευόντων παραποτάμων και F η επιφάνεια της λεκάνης απορροής [km²].

Μετά τον διαχωρισμό της επιφάνειας σε n ζεύγη ισοϋψών, σύμφωνα με τους Globevnik L., Danko H., Petkonšek G. Και Rubinić J. (2003), η μέση υψομετρική απόσταση μιας λεκάνης απορροής, D [m] ορίζεται ως:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot h_i}{F} - H_{min} \approx H_{mean} - H_{min} \quad (3.23)$$

όπου f_i η επιφάνεια μεταξύ δύο ισοϋψών [km²], h_i το μέσο υψόμετρο μεταξύ των δύο ισοϋψών [m], F η επιφάνεια όλης της λεκάνης απορροής [km²], H_{min} το χαμηλότερο υψόμετρο της λεκάνης απορροής [m] και H_{mean} το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής [m].

3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ

3.4.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ (Soil Delivery Ratio), SDR

Σύμφωνα με (Walling D. E., 1983) “από το σύνολο των φερτών υλικών που παράγονται σε μια υδρολογική λεκάνη (average annual gross erosion, E), μόλις ένα κλάσμα αυτής καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης ως στερεοαπορροή (transported gross erosion)”. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό το φαινόμενο είναι ότι σημαντικό μέρος της ποσότητας αυτής εναποτίθεται εντός της λεκάνης, κατά την πορεία των φερτών υλών προς το υδατόρρευμα. Η Εξίσωση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της στεροαπορροής είναι η εξής (U.S. Department of Agriculture, 1971):



$$SDR = \frac{S_Y}{A_S} \quad (3.24)$$

Όπου S_Y η στερεοαπορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής και A_S η διάβρωση – εδαφική απώλεια εντός της λεκάνης απορροής. Οι τιμές του συντελεστή SDR κυμαίνονται μεταξύ του 0.00 και 1.00.

Για την εκτίμηση του ποσοστού της διάβρωσης που τελικά μετατρέπεται σε στερεοαπορροή, έχουν διατυπωθεί πολλές εμπειρικές εξισώσεις (Φελώνη, 2019). Οι εξισώσεις αυτές εξήχθησαν μετά από μελέτες των ερευνητών σε υδρολογικές λεκάνες οι οποίες ανήκουν σε ευρύτερες περιοχές σε παγκόσμια κλίμακα. Η πολυπλοκότητα που διέπει τις παραμέτρους που συντελούν στην τελική ποσότητα της στερεοαπορροής, προκαλεί την αδυναμία εξαγωγής μιας μοναδικής εξίσωσης που να καλύπτει κάθε τύπου λεκάνες απορροής.

Το 1972, ο Renfro G.W., κατέληξε σε μια εξίσωση, που συσχετίζει τον συντελεστή στερεοαπορροής με την έκταση της λεκάνης, και έχει την εξής μορφή:

$$\log(SDR) = 1.877 - 0.1419 \cdot \log(25.9 \cdot A) \quad (3.25)$$

όπου SDR ο συντελεστής στερεοαπορροής σαν ποσοστό [%] και A η επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά χιλιόμετρα [km^2].

Τρία χρόνια αργότερα, το 1975, χρησιμοποιώντας δεδομένα από 14 λεκάνες απορροής της περιοχής Blackl and Prairie, στο Τέξας των ΗΠΑ, βελτίωσε την προηγούμενη εξίσωση, επιτυγχάνοντας ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή συσχέτισης, συγκεκριμένα $R^2 = 0.92$ (ZarrisD., VlastaraM., &PanagouliaD., 2011):

$$\log(SDR) = 1.7935 - 0.1479 \cdot \log(A) \quad (3.26)$$

όπου SDR ο συντελεστής στερεοαπορροής σαν ποσοστό [%] και A η επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά χιλιόμετρα [km^2].

Την ίδια χρονιά, ο Vanoni V.A., αναλύοντας δεδομένα στερεοαπορροής από 300 λεκάνες σε παγκόσμια κλίμακα, κατέληξε σε μια πιο γενική εξίσωση της μορφής:

$$SDR = 0.42 \cdot A^{-0.125} \quad (3.27)$$

όπου SDR ο συντελεστής στερεοαπορροής και A η επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά μίλια [mi^2].

Με το συνδυασμό των δεδομένων του τον Renfro και τη μορφή της εξίσωσης του Vanoni, η αμερικάνικη υπηρεσία USDA- SCS κατέληξε το 1979 στην εξίσωση:



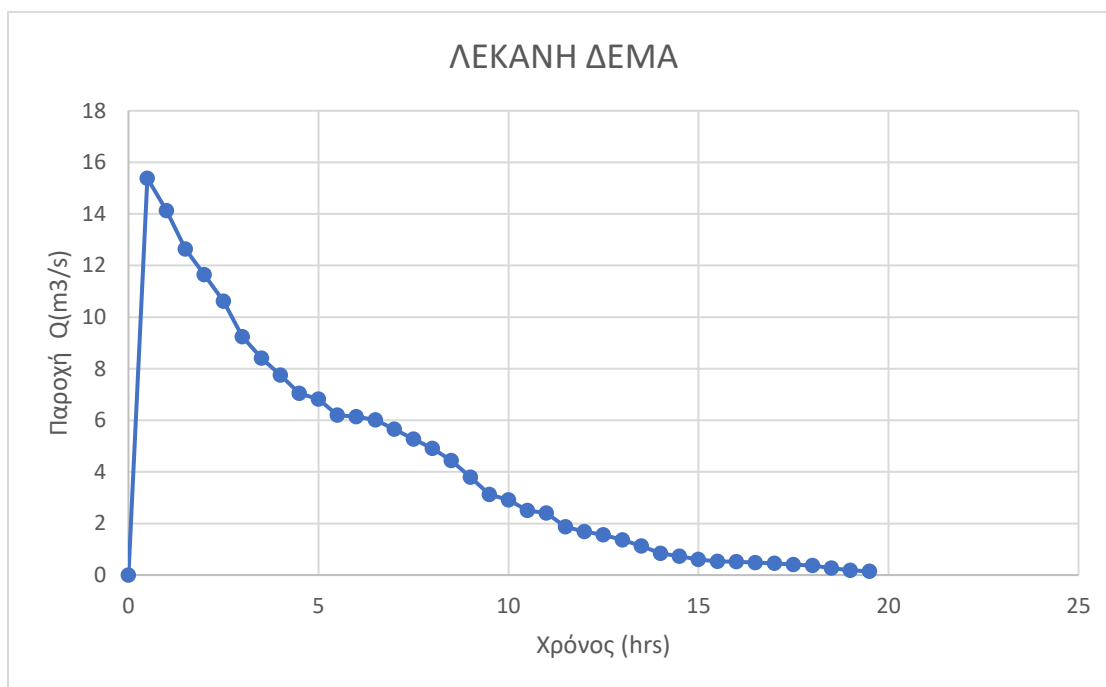
$$SDR = 0.51 \cdot A^{-0.11} \quad (3.28)$$

όπου SDR ο συντελεστής στερεοαπορροής και A η επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά μίλια [mi^2]. (Fernandez C., Wu J. Q., McCool D. K., & Stöckle C. O., 2003)

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

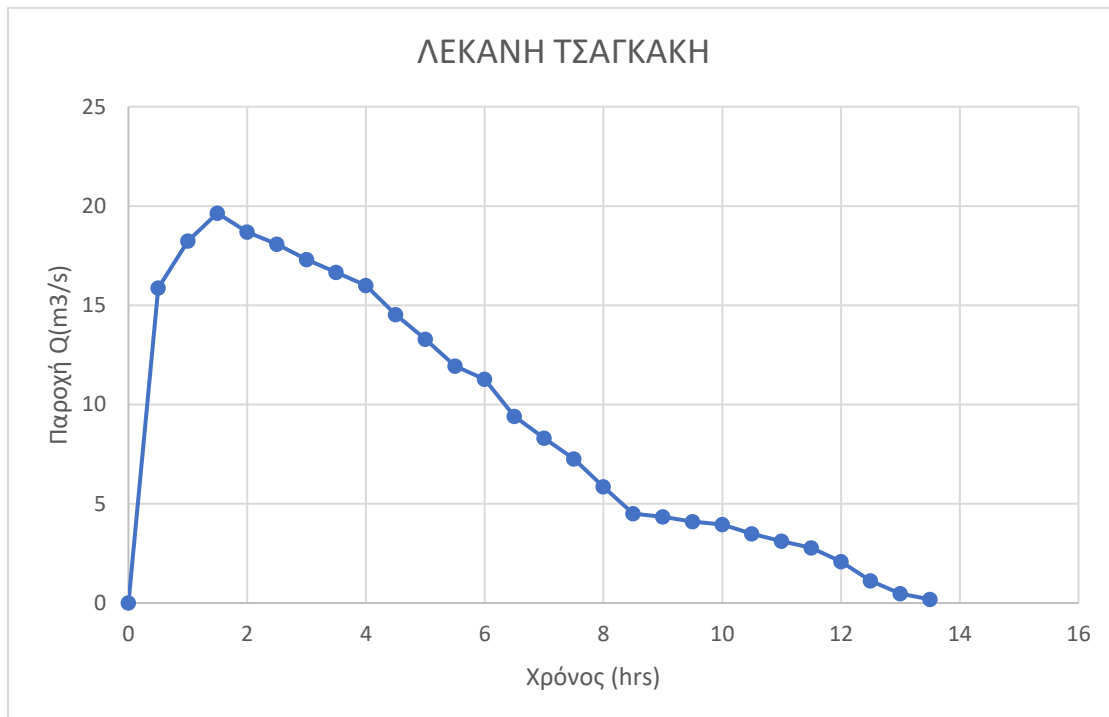
4.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Με βάση τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο Κεφ. 3, καταρτίστηκαν τα πλημμυρογράφηματα στην έξοδο των λεκανών απορροής. Συγκεκριμένα, στο Σχήματα 5.1 παρουσιάζεται γραφικά το πλημμυρογράφημα εξόδου της λεκάνης απορροής για βροχόπτωση διάρκειας 20 ωρών, και για κανονικές συνθήκες υγρασίας. Η αιχμή του πλημμυρογραφήματος εμφανίζεται στη μισή ώρα από την έναρξη του επεισοδίου και λαμβάνει τιμή $15.4 \text{ m}^3/\text{s}$



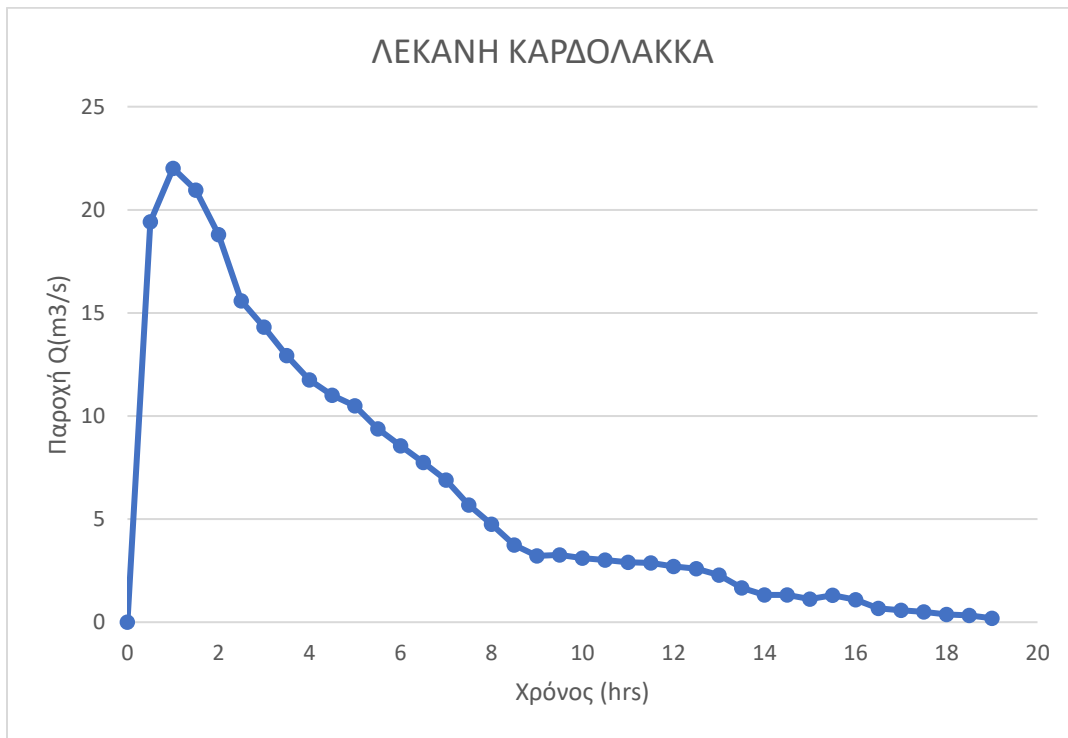
Σχήμα 4.1 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Δέμα, μέσω ισόχρονων καμπυλών

Στο Σχήμα 4.2, απεικονίζεται το πλημμυρογράφημα της λεκάνης ρέματος Τσάγκακη για βροχόπτωση διάρκειας 14 ωρών. Η παροχή αιχμής παρουσιάζεται στη μια μισή ώρα από την έναρξη της βροχόπτωσης και έχει τιμή $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$.



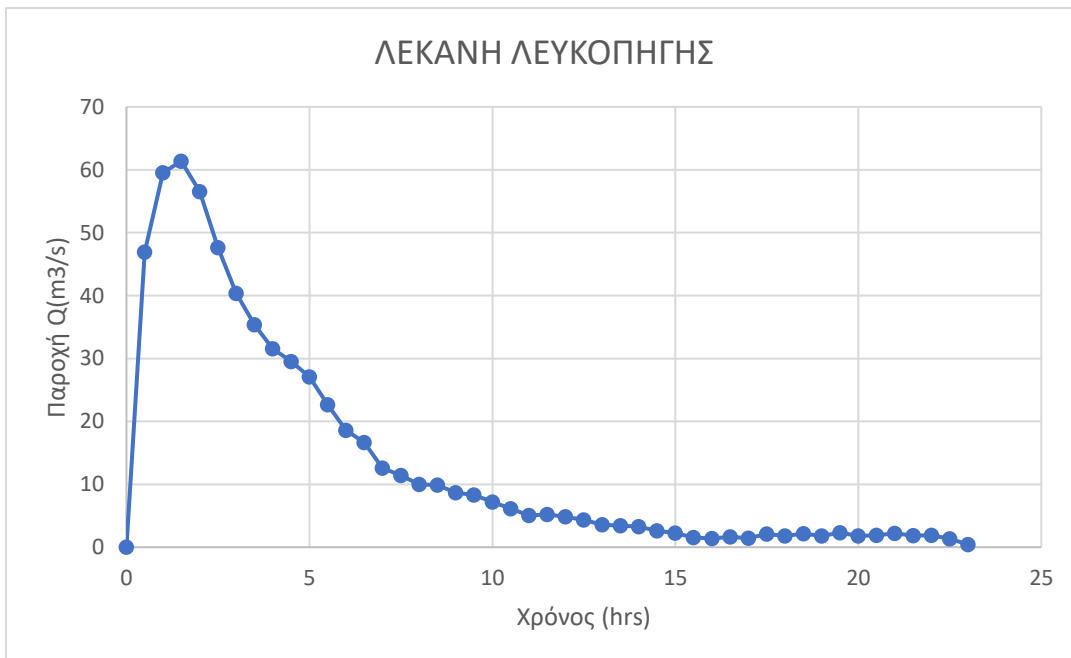
Σχήμα 4.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Τσάγκακη, μέσω ισόχρονων καμπυλών.

Η παροχή αιχμής εμφανίζεται για τη λεκάνη Τσάγκακη στην πρώτη ώρα του επεισοδίου και έχει τιμή $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Η συνολική διάρκεια βροχόπτωσης είναι 13.5 ώρες.



Σχήμα 4.3 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Καρδολακκα, μέσω ισόχρονων καμπυλών.

Τέλος, στη λεκάνη Λευκοπηγής η παροχή αιχμής έχει τιμή $61.4 \text{ m}^3/\text{s}$ και εμφανίζεται στη μια μισή ώρα από την έναρξη της βροχόπτωσης των 23 ωρών.



Σχήμα 4.4 Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Λευκοπηγής, μέσω ισόχρονων καμπυλών.

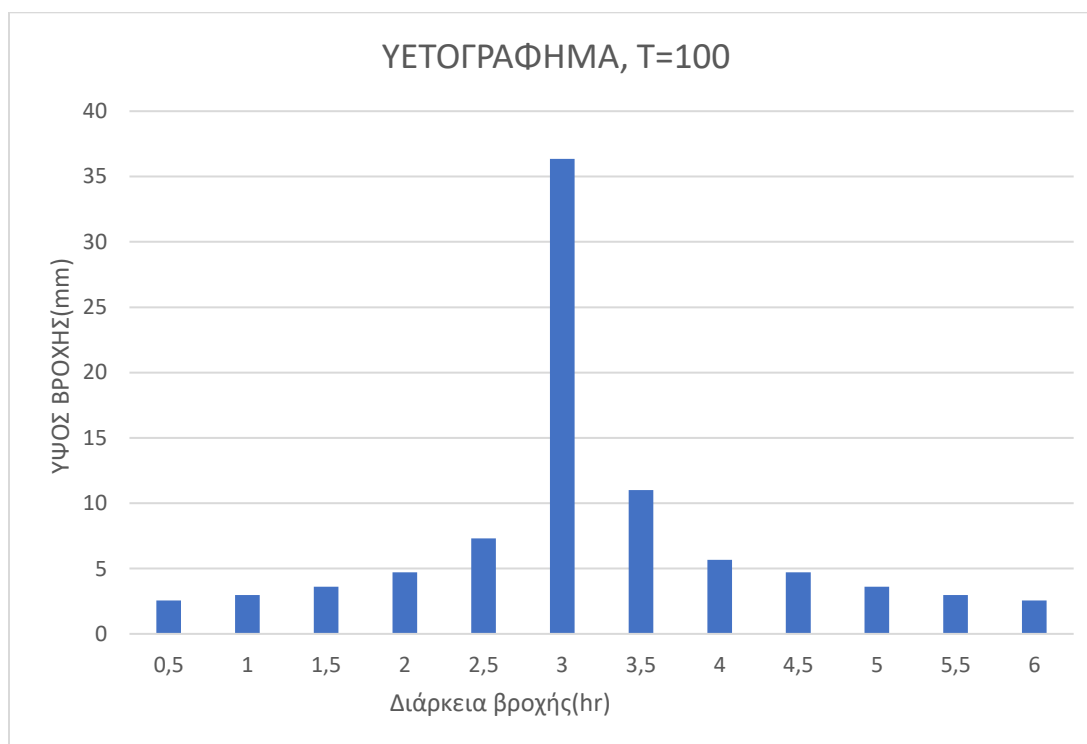


Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο κεφάλαιο 3.2.4, για βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 100 ετών, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

Αναφορικά με την λεκάνη ρέματος Δέμα, στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζεται το υετογράφημα σχεδιασμού με βάση το σταθμό «Μεταξά», μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ, για περίοδο επαναφοράς 100 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης 6 ωρών, καθώς σύμφωνα με την εξίσωση του Giandotti ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίστηκε σε 2.03 ώρες.

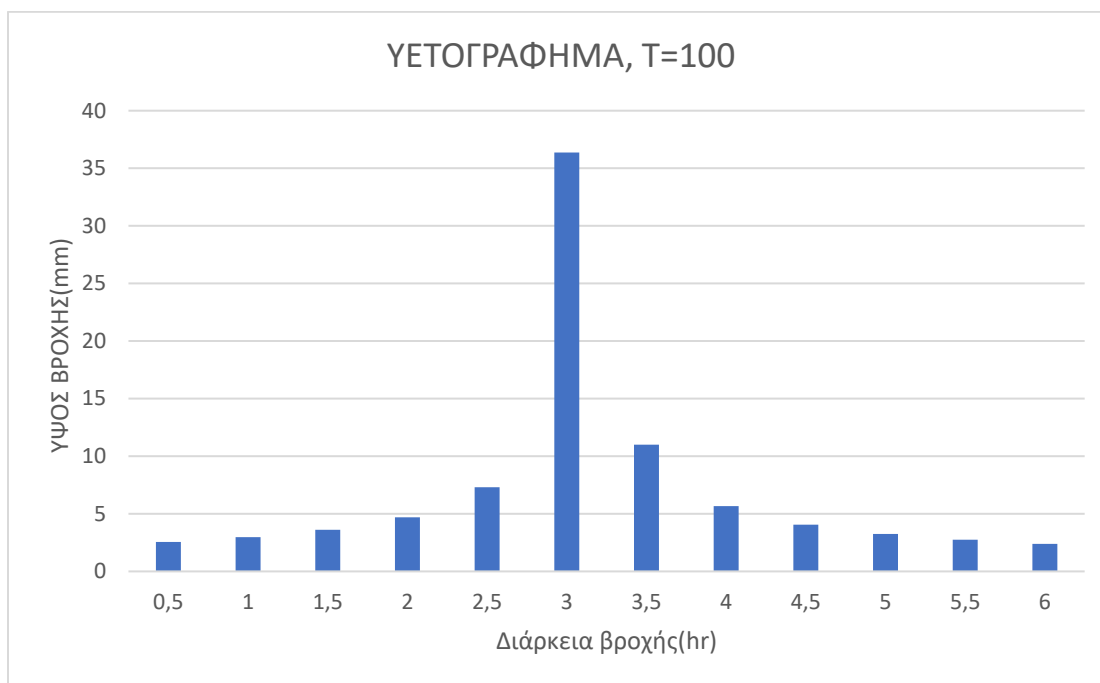
Πίνακας 4.1 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Μεταξάς».

ΣΤΑΘΜΟΣ	X	Y	Z	λ'	ψ'	θ	H	K
ΜΕΤΑΞΑΣ	326847.7	4438892	1076	259	0.66	0.076	0.686	0.126



Σχήμα 4.5 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Δέμα.

Για την λεκάνη ρέματος Τσαγκακή, με βάση τον σταθμό “Μεταξά”, με περίοδο επαναφοράς 100 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης 6 ώρες, το υετογράφημα που προέκυψε είναι



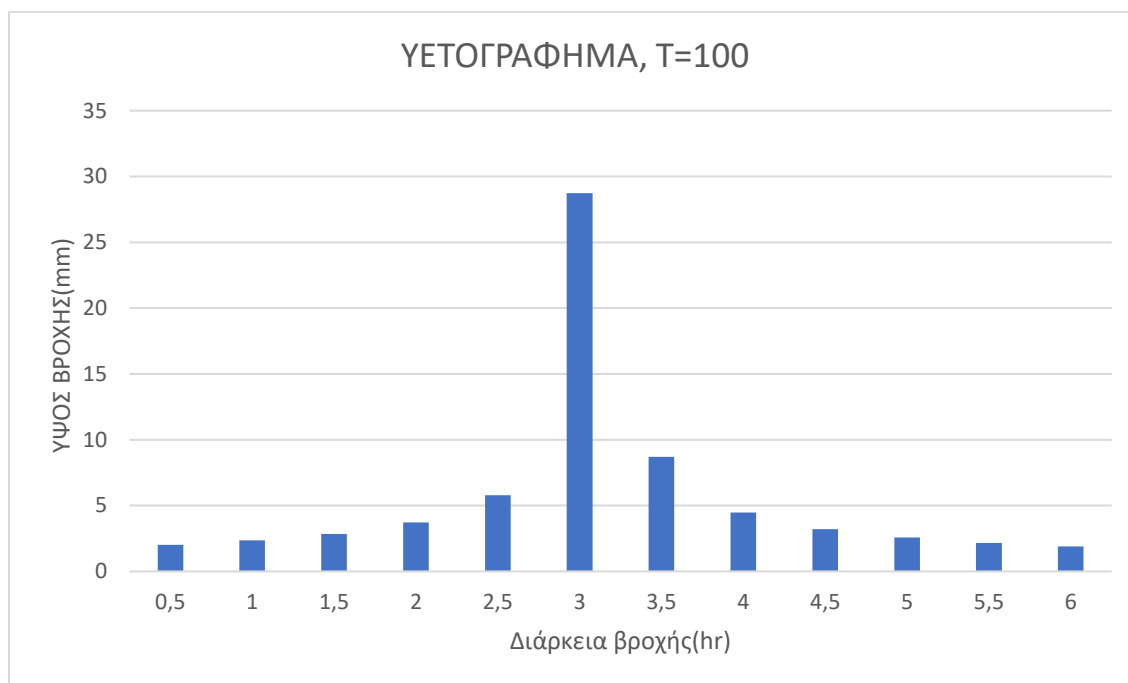
Σχήμα 4.6 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Τσάγκακη.

Ο χρόνος συγκέντρωσης από την εξίσωση Giandotti για την λεκάνη αυτή υπολογίζεται σε $t_c=2.38$ ώρες.

Στην λεκάνη Καρδολακκα, με βάση το σταθμό "ΑΙΑΝΗ" χρόνο συγκέντρωσης Giandotti 2.85 ώρες και επομένως επιλεγμένη διάρκεια βροχόπτωσης 6 ώρες προκύπτει για περίοδο επαναφοράς 100 έτη το επόμενο υετογράφημα.

Πίνακας 4.2 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Αιανή».

ΣΤΑΘΜΟΣ	X	Y	Z	λ'	ψ'	θ	η	K
ΑΙΑΝΗ	313840.5	4447653	481.6	429.6	0.8	0.076	0.686	0.063

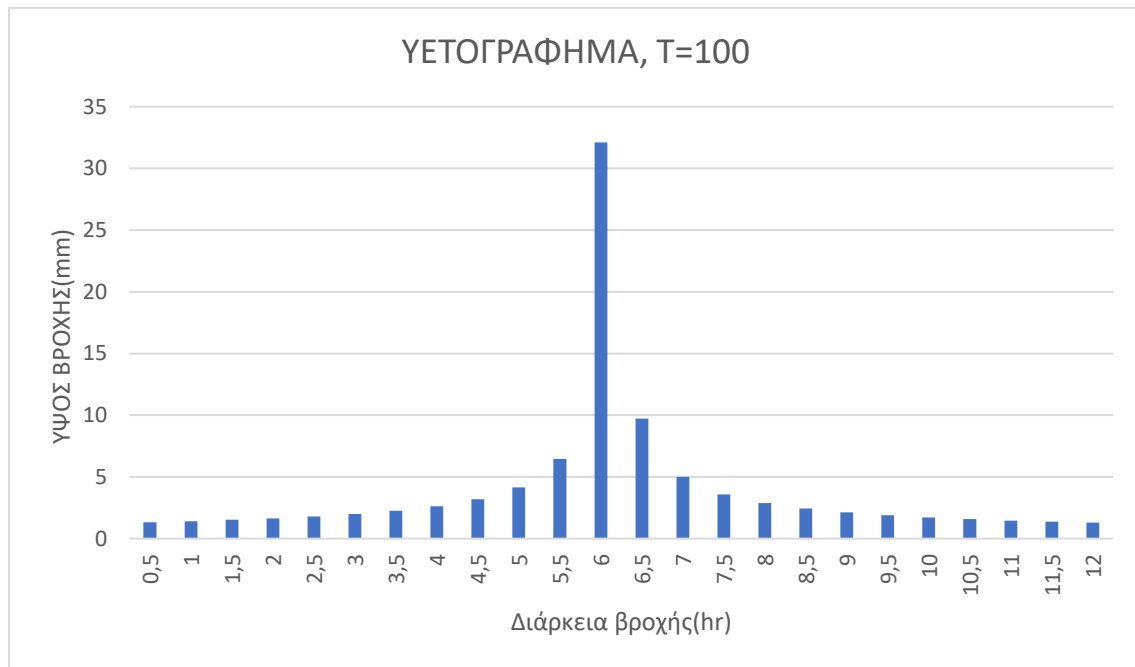


Σχήμα 4.7 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.

Τέλος, αναφορικά με την λεκάνη Λευκοπηγής υπολογίστηκε το εξής υετογράφημα με δεδομένη διάρκεια βροχής 12 ώρες, εφόσον ο χρόνος συγκέντρωσης από την εξίσωση Giandotti υπολογίζεται σε 4.63 ώρες, και χρόνο επαναφοράς 100 έτη για το σταθμό “ΛΕΥΚΟΠΗΓΗ”.

Πίνακας 4.3 Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων του βροχογράφου του Σταθμού «Λευκοπηγή».

ΣΤΑΘΜΟΣ	X	Y	Z	λ'	ψ'	θ	H	K
ΛΕΥΚΟΠΗΓΗ	308347.8	4455993	645.2	489.1	0.81	0.076	0.686	0.063

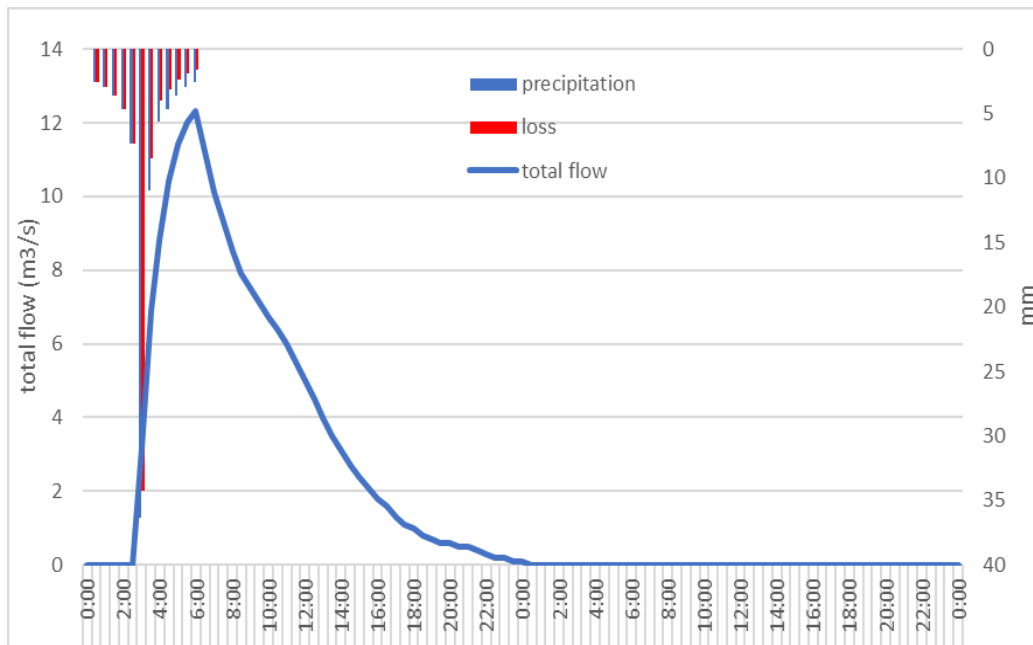


Σχήμα 4.8 Υετογράφημα λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.

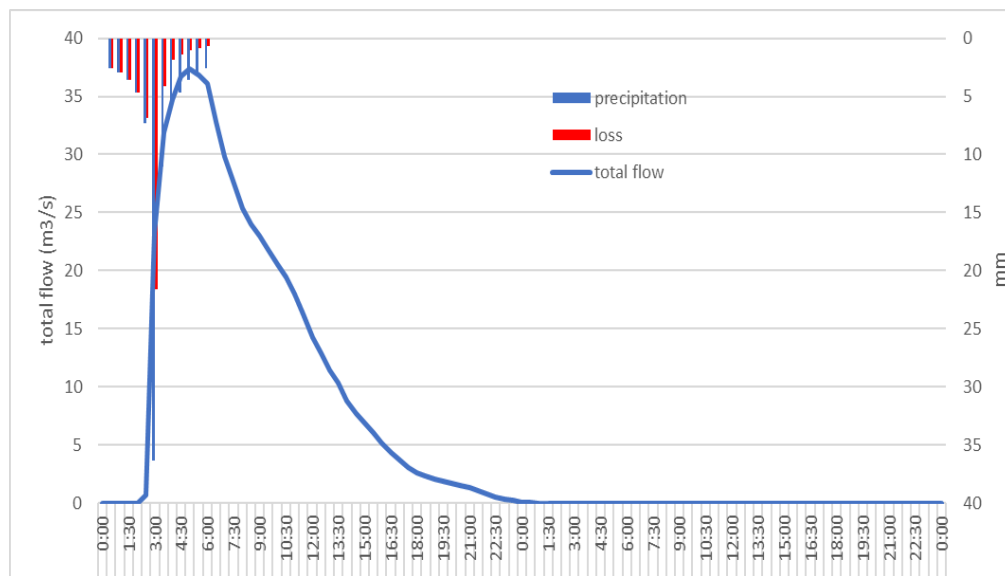
Τα παραπάνω υετογραφήματα σχεδιασμού μεταφράζονται μέσω του λογισμικού HEC-HMS, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2.6. στα επόμενα πλημμυρογραφήματα για ξηρές, μέσες και υγρές συνθήκες υγρασίας. Στα διαγράμματα, εκτός της πλημμυρικής απορροής, παρατίθενται και τα υδρογραφήματα της βροχόπτωσης με τις αντίστοιχες απώλειες.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για τις 4 λεκάνες, παρουσιάζονται παρακάτω:

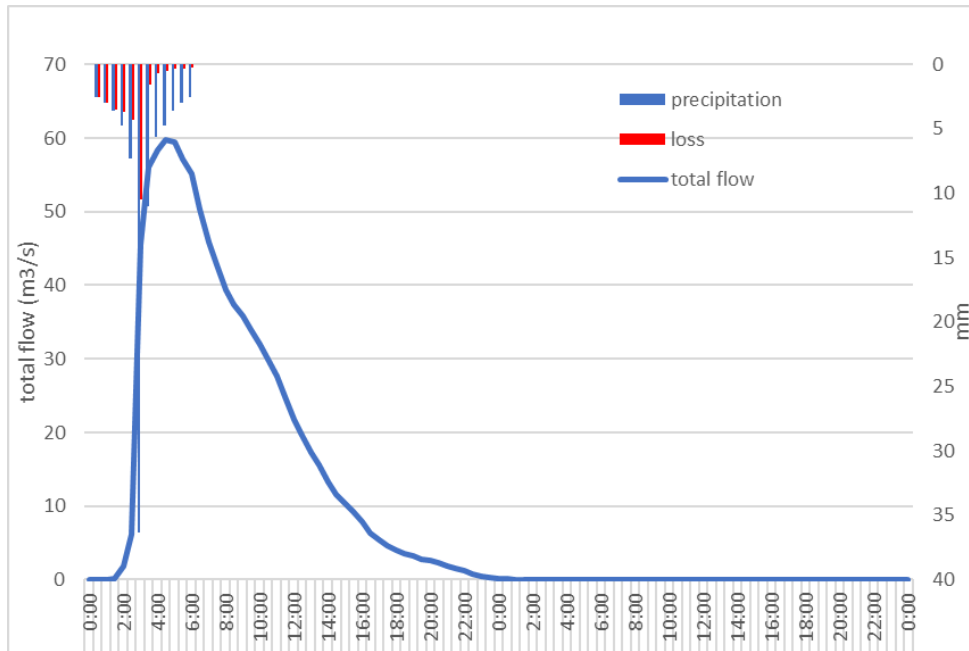
Λεκάνη ρέματος Δέμα:



Σχήμα 4.9 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.

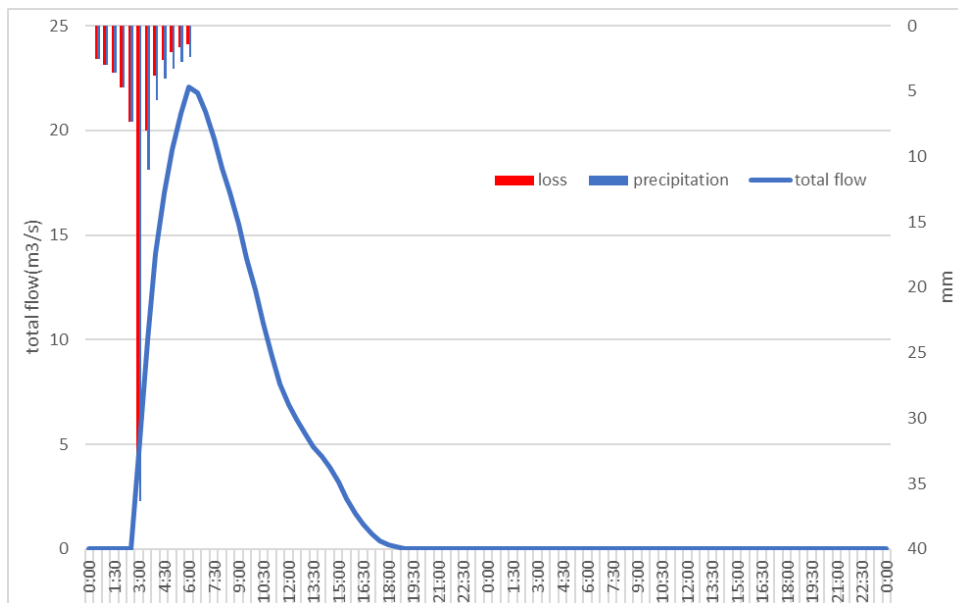


Σχήμα 4.10 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.

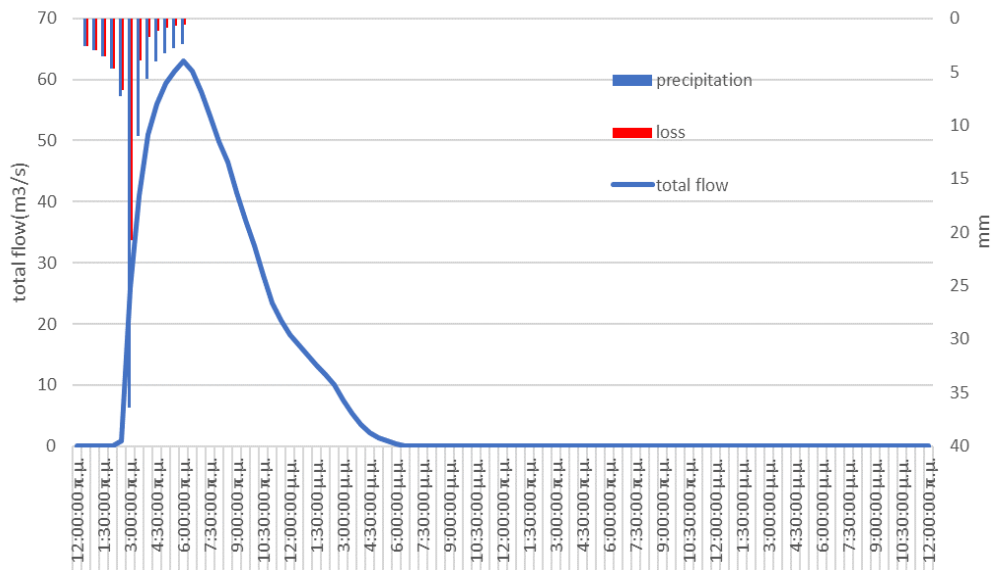


Σχήμα 4.11 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.

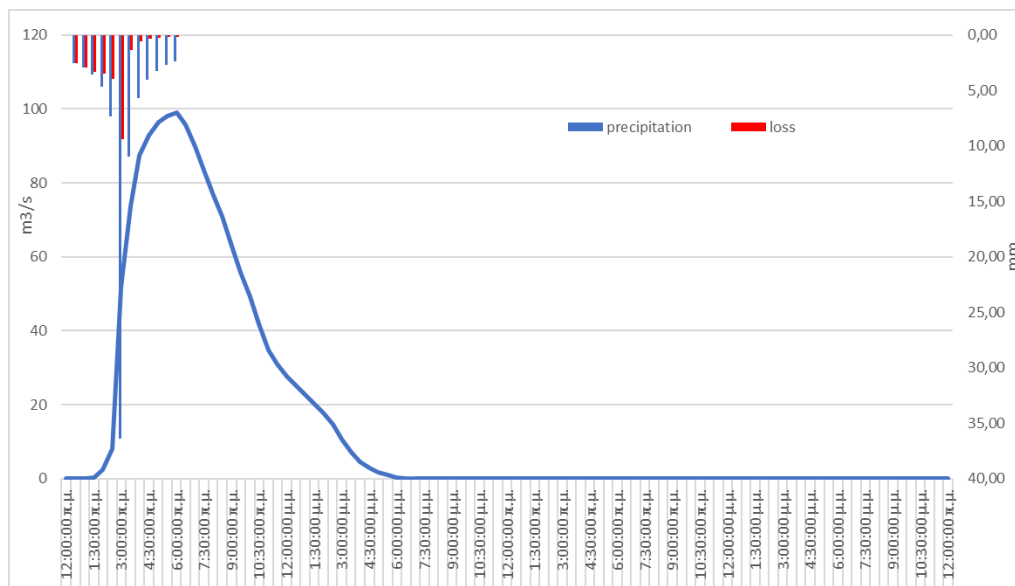
Λεκάνη ρέματος Τσάγκακη:



Σχήμα 4.12 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.

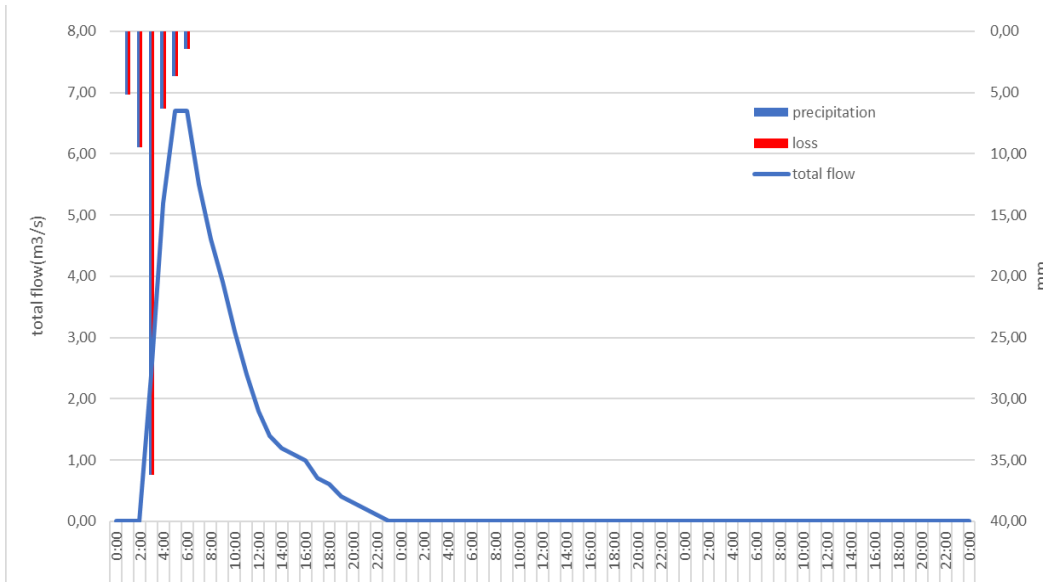


Σχήμα 4.13 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.

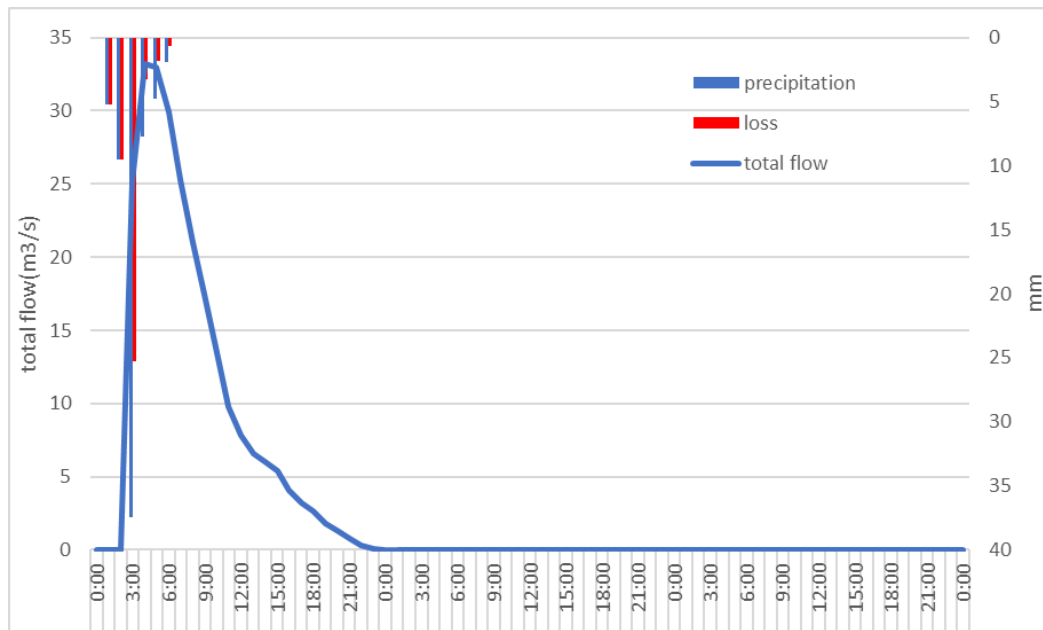


Σχήμα 4.14 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.

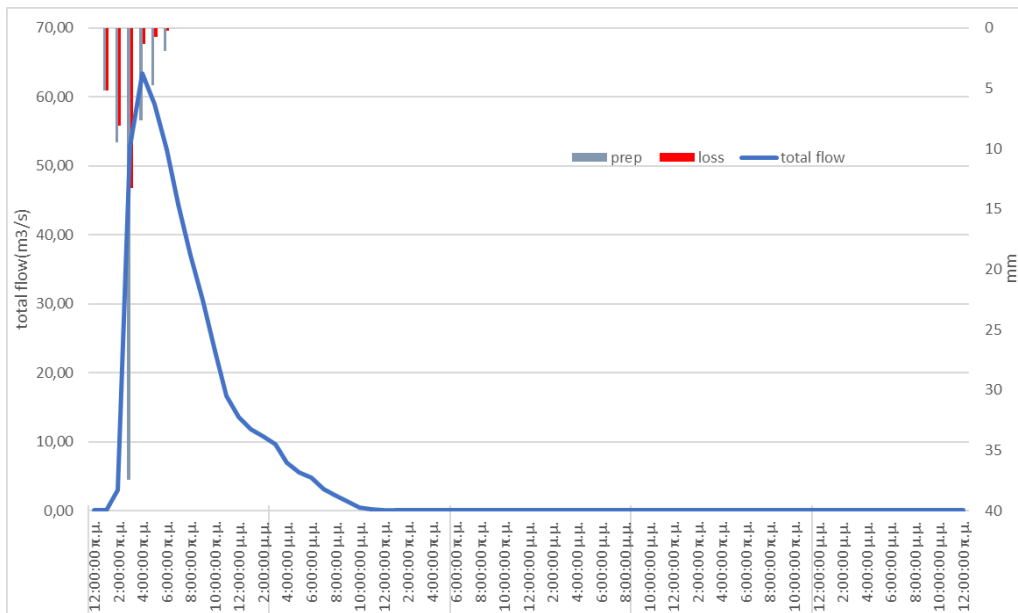
Λεκάνη ρέματος Καρδόλακκα:



Σχήμα 4.15 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.

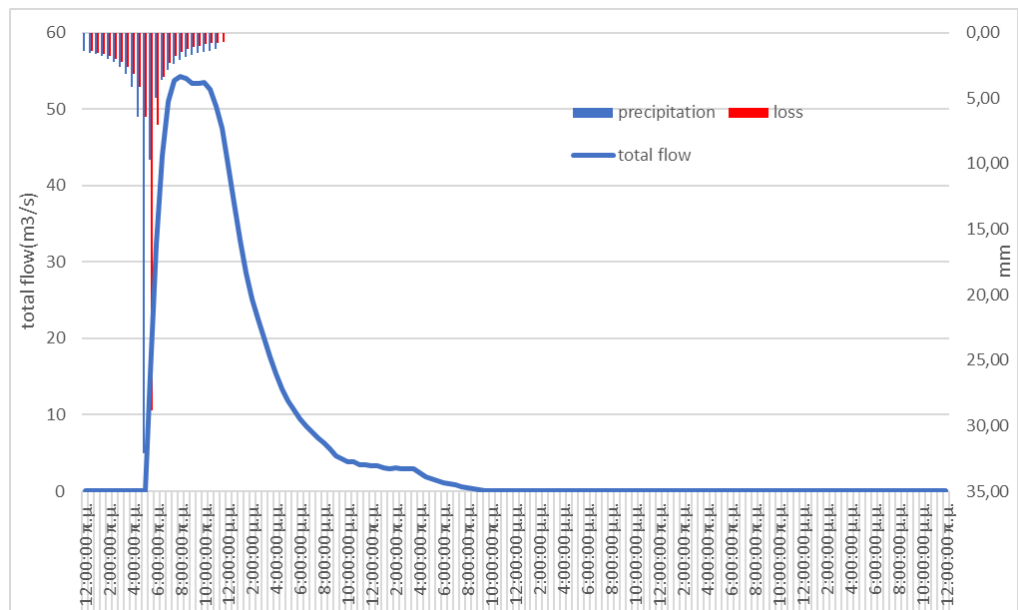


Σχήμα 4.16 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.

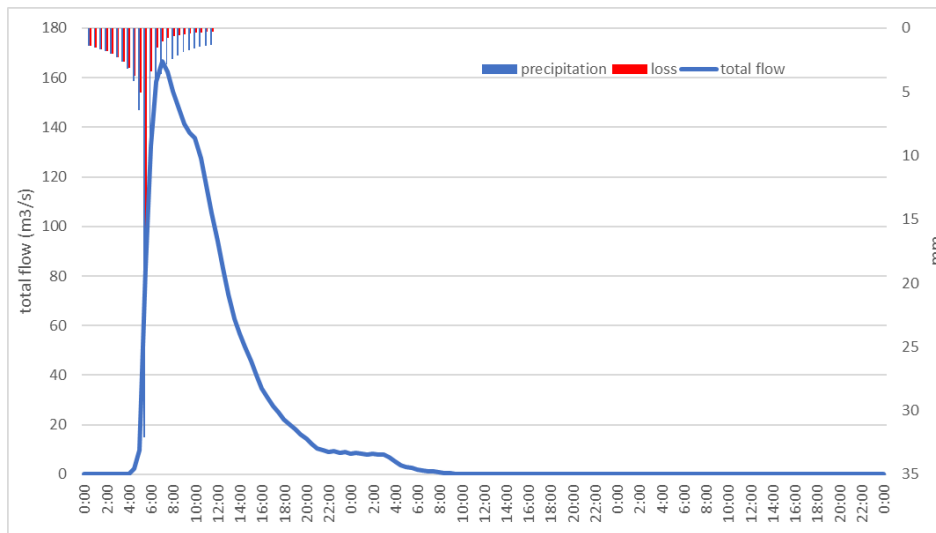


Σχήμα 4.17 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.

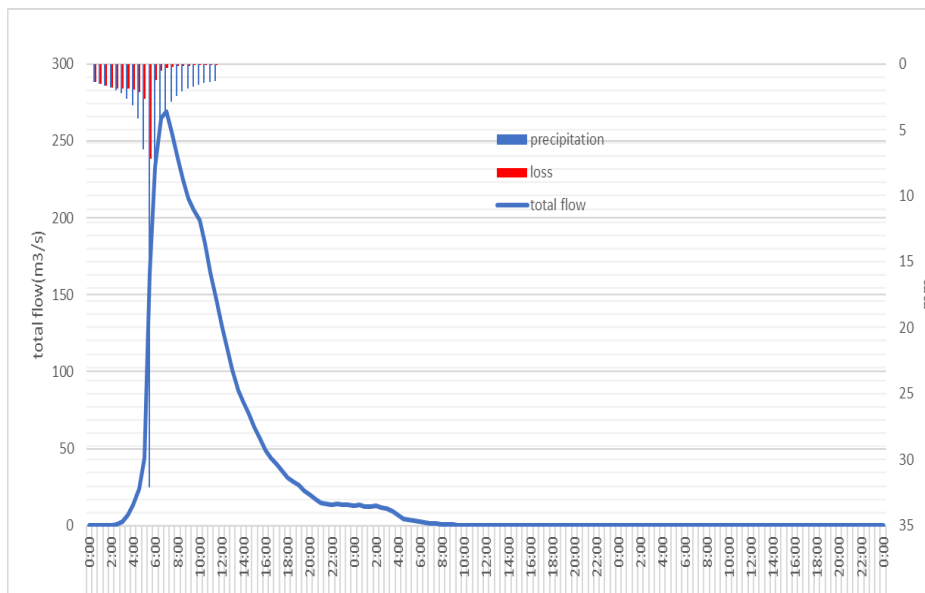
Λεκάνη ρέματος Λευκοπηγής:



Σχήμα 4.18 Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες υγρασίας.



Σχήμα 4.19 Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες υγρασίας.

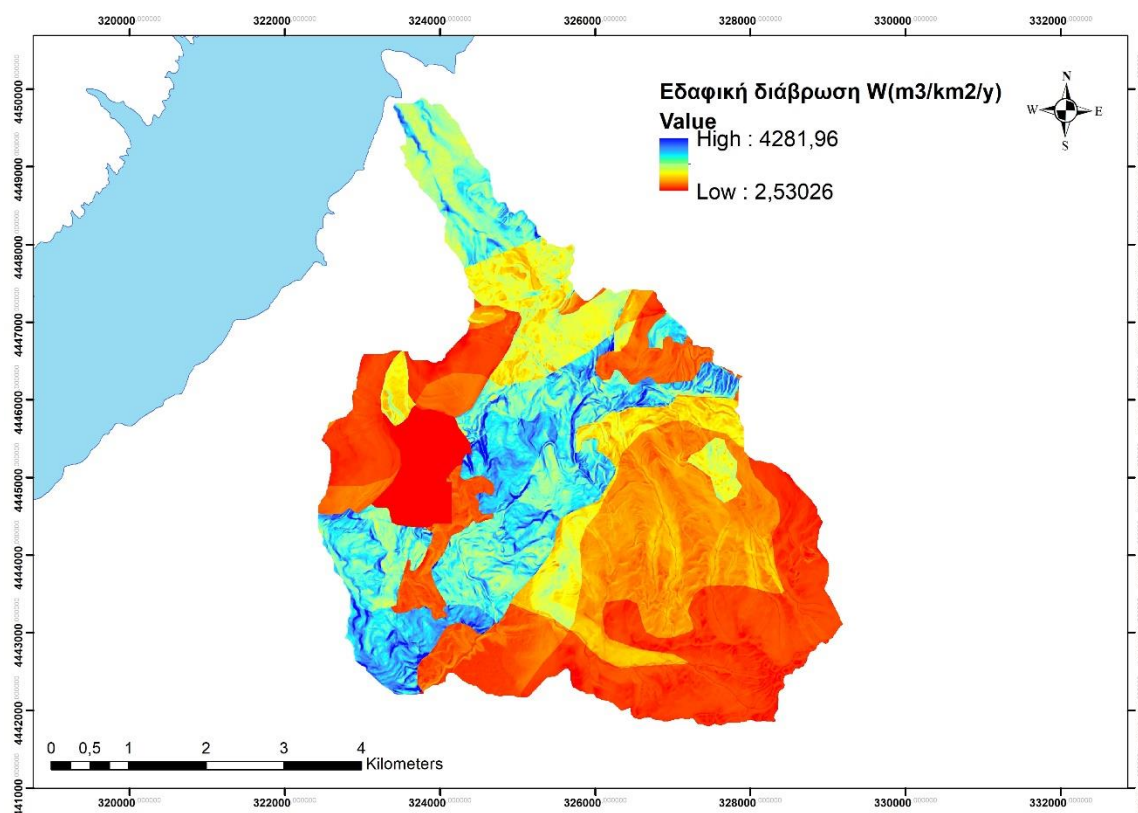


Σχήμα 4.20 Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες υγρασίας.

Από τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα, τα οποία εξετάζουν και τις τρεις συνθήκες υγρασίας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η υγρασιακή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το έδαφος επιδρά άμεσα στο μέγεθος των πλημμυρικών παροχών. Όσο περισσότερο κορεσμένο είναι το έδαφος, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες βροχόπτωσης, και συνεπώς και η ενεργή βροχόπτωση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Η μεγαλύτερη ενεργή βροχόπτωση οδηγεί και σε μεγαλύτερη τιμή της πλημμυρικής παροχής.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Με εφαρμογή της μεθοδολογίας για το πολυδιάστατο πρόβλημα της εδαφικής διάβρωσης, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.4, προκύπτουν οι ψηφιακοί χάρτες (Σχήματα 4.21, 4.22, 4.23 και 4.24).

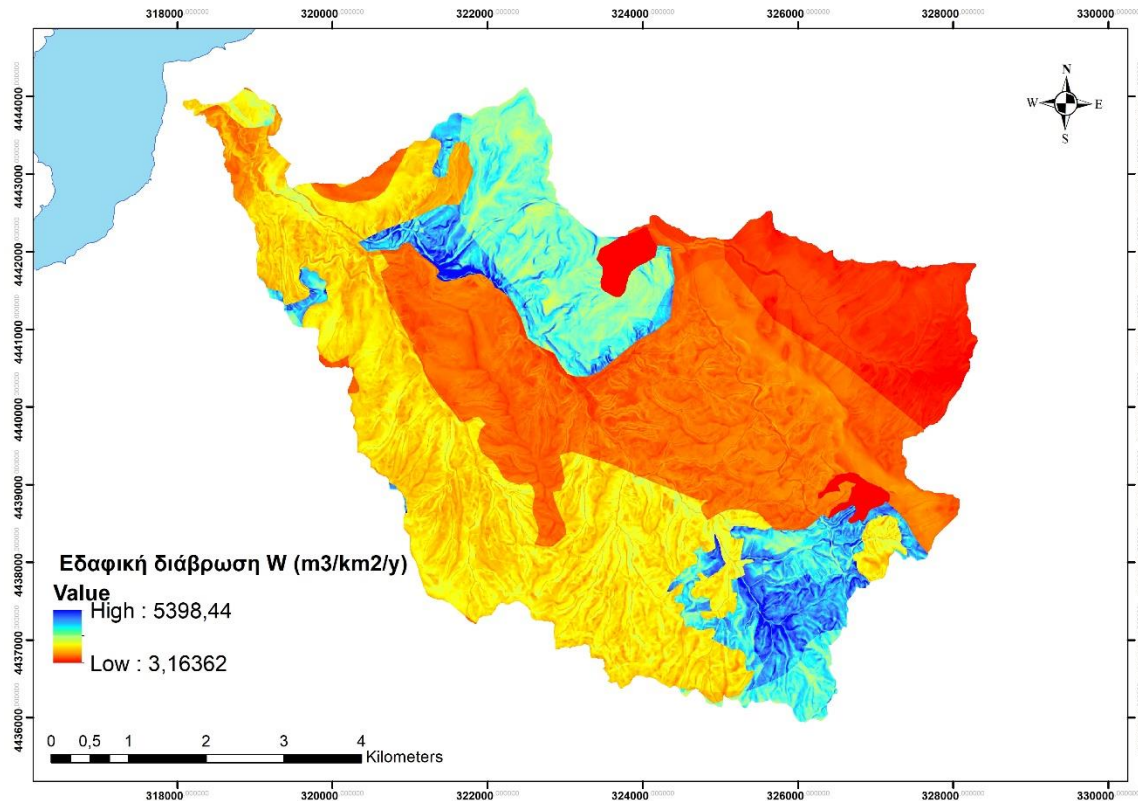


Σχήμα 4.21 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Δέμα.

Παρατηρείται ότι μικρότερος ρυθμός διάβρωσης παρουσιάζεται στο νότιο δυτικό τμήμα της λεκάνης, ενώ βόρεια και κεντρικά ο συντελεστής X έχει μεγάλες τιμές καθώς συναντώνται καλλιεργήσιμες εκτάσεις οι οποίες δεν εμφανίζουν σημαντική αντίσταση στη διάβρωση. Όσον αφορά στη γεωλογία της λεκάνης, στο νοτιοδυτικό της μέρος εμφανίζονται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι που έχουν σημαντική αντίσταση στη διάβρωση. Οι παραπάνω συντελεστές X , Y επηρεάζουν σημαντικά τον συντελεστή διάβρωσης Z (Σχήμα 4.2δ), αφού παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή διάβρωσης Z παρουσιάζουν όντως μικρότερες τιμές στις περιοχές με γεωλογικό σχηματισμό ασβεστόλιθων και σε περιοχές με πυκνή βλάστηση. Σε ευρύτερο επίπεδο της λεκάνης παρατηρείται ότι ο συντελεστής Z εμφανίζει μέση τιμή περίπου 0.6 (μέτρια διάβρωση). Από τον χάρτη κλίσεων γης διεξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά

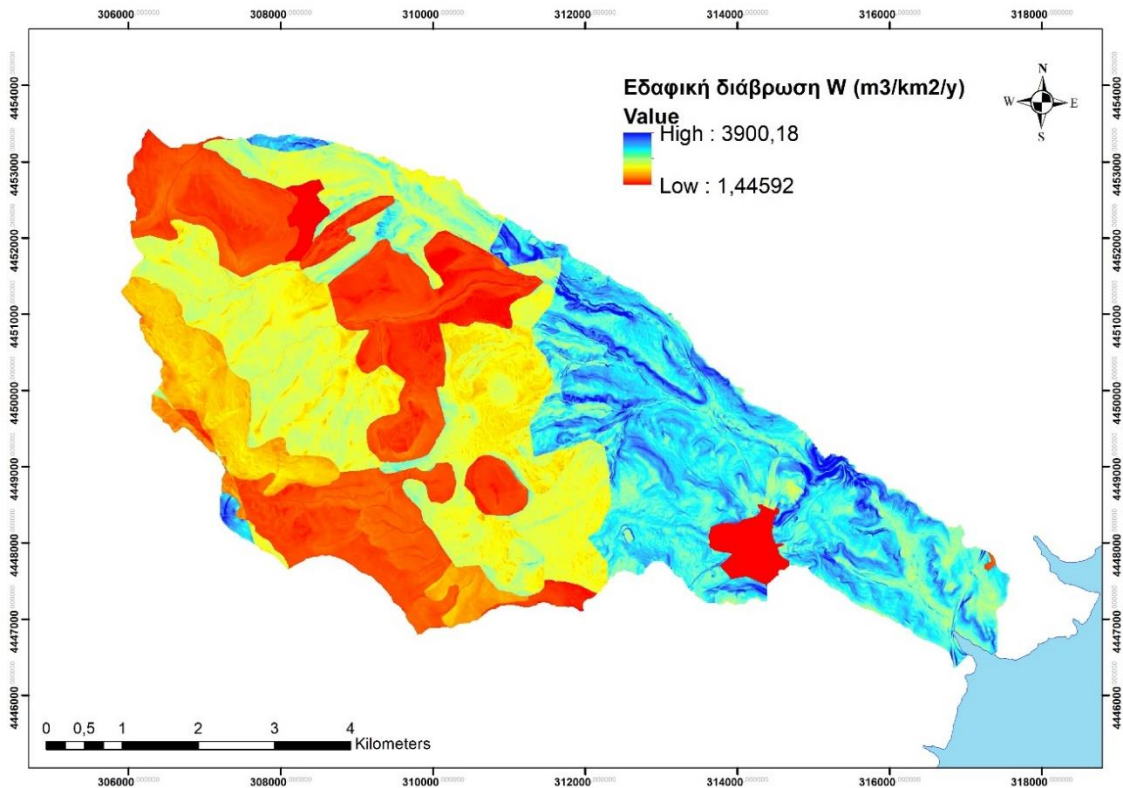


τον συντελεστή Z , καθώς στο πεδινό τμήμα εμφανίζεται μεγαλύτερη τιμή διάβρωσης αφού και η γεωλογία της περιοχής εμφανίζει το μεγαλύτερο συντελεστή Y στη λεκάνη, με τις λιμναίες αποθέσεις και ταυτόχρονα καλλιεργούμενες εκτάσεις γης. Τέλος παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές στο πεδινό τμήμα, ενώ οι τιμές της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερες στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης.



Σχήμα 4.22 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Τσαγκακή.

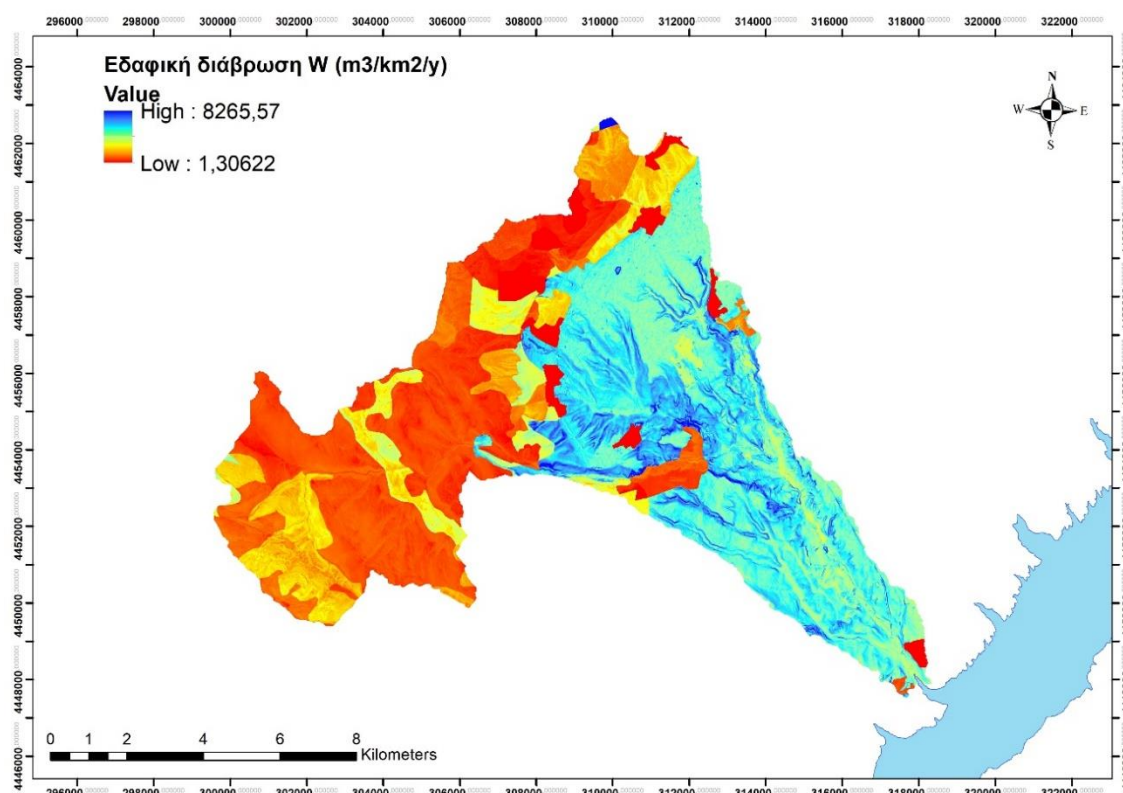
Ο συντελεστής Z εμφανίζει μέση τιμή 0.64, δηλαδή μέτρια διάβρωση. Στα τμήματα της λεκάνης όπου το ποσοστό των οφθαλμογενέσιων κυριαρχεί υπάρχει ένας μέσος με μικρό βαθμό διάβρωση και παράλληλα στην ίδια περιοχή, στο δυτικό τμήμα, εμφανίζονται βοσκότοποι και λιβάδια, τα οποία αναστέλλουν το βαθμό διάβρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και στα ανατολικά της λεκάνης, στην οποία υπάρχει κυριαρχία του ασβεστόλιθου με αντίσταση σε διάβρωση και ταυτόχρονα περιοχές με σκληρόφυλλη βλάστηση και δάση πλατύφυλλων. Ο χάρτης κλίσεων γης δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα του συντελεστή διάβρωσης. Τέλος, παρατηρείται ότι η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη στα υψηλότερα σημεία των κλίσεων γης και οι τιμές της θερμοκρασίας χαμηλότερες συγκριτικά με το υπόλοιπο επίπεδο της λεκάνης.



Σχήμα 4.23 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Καρδόλακκα.

Παρατηρείται ότι μεγαλύτερη τιμή του Z εμφανίζεται στα σημεία όπου υπάρχουν γεωλογικοί σχηματισμοί λιμναίων αποθέσεων σε συνδυασμό με χρήσεις γης μη αρδεύσιμες εκτάσεις, δηλαδή στα νότιο-ανατολικά της λεκάνης όπως απεικονίζεται και στο χάρτη. Στη συνολική έκταση της λεκάνης η διάβρωση είναι σε μέτριο βαθμό. Η περιοχή καλύπτεται σχεδόν ισόποσα από γεωλογικούς σχηματισμούς μέτριας ή μικρής διάβρωσης πχ οφιόλιθους και το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και με τις χρήσεις γης, όπου εμφανίζονται σχεδόν ισόποσα βλάστηση με δάση και εκτάσεις μη αρδεύσιμης γης. Η πυκνή βλάστηση προκαλεί μείωση της διάβρωσης, ενώ οι γεωργικές εκτάσεις οδηγούν στην υποβάθμιση του εδάφους και συνεπώς έχουν ισχυρή επίπτωση στη διαδικασία της διάβρωσης.

Με τη βοήθεια του χάρτη κλίσεων γης, διαπιστώνεται ότι η συνεισφορά της κλίσης γης δεν είναι ιδιαίτερη. Το ύψος της βροχόπτωσης είναι μικρότερο στο σύνολο της λεκάνης αυτής καθώς σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αποτελεί πιο πεδινή λεκάνη.



Σχήμα 4.24 Χάρτης εδαφικής διάβρωσης λεκάνης ρέματος Λευκοπηγής.

Όπως και στις προηγούμενες εξεταζόμενες λεκάνες, η εικόνα και για τη συγκεκριμένη είναι περίπου ίδια. Μεγαλύτερη διάβρωση παρατηρείται στη περιοχή όπου επικρατούν οι γεωργικές εκτάσεις σε συνδυασμό με τις λιμναίες γεωλογικές αποθέσεις. Αυτή η εικόνα βρίσκεται στο νότιο ανατολικό τμήμα της. Η μικρότερη τιμή της συναντάται στο βόρειο δυτικό τμήμα όπου κυριαρχούν εκτάσεις δασών και ασβεστόλιθων. Όσον αφορά τη βροχόπτωση, όπως είναι αναμενόμενο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές στα πιο ορεινά τμήματα της λεκάνης, η θερμοκρασία εκεί έχει τις χαμηλότερες τιμές, ενώ οι κλίσεις εδάφους δεν ασκούν ιδιαίτερως μεγάλη επιρροή στο συντελεστή διάβρωσης Z.

Τα αποτελέσματα με βάση τη μέθοδο Ganrilovic καθώς και τους συντελεστές κατακράτησης R, σύμφωνα με το κεφάλαιο 3.4.3. είναι τα εξής (Πίνακας 4.4) :

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα εδαφικής διάβρωσης μοντέλου EPM.

Μοντέλο Εκτίμησης EPM			
Λεκάνες	Συντελεστής κατακράτησης, R	Εδαφική διάβρωση (m ³ /y/km ²)	Εδαφική διάβρωση [t · y ⁻¹]
Δέμα	0.80	283	23136.78
Τσαγκακή	0.85	181	21954.96



Καρδόλακκας	0.66	399	46107.48
Λευκοπηγής	0.77	448	135656.51

Το μεγαλύτερο μέγεθος μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων παρατηρείται στη λεκάνη ρέματος Λευκοπηγής ($448 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), ενώ το μικρότερο στη λεκάνη ρέματος Τσάγκακη ($181 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$). Η λεκάνη Τσάγκακη παρουσιάζει τη μικρότερη διάβρωση καθώς στο μεγαλύτερο ποσοστό της επικρατούν δάση και εκτάσεις σκληροφυλλικής βλάστησης, οι οποίες και αναστέλλουν το φαινόμενο της διάβρωσης. Η λεκάνη Λευκοπηγής εμφανίζει μεγάλα ποσοστά λιμναίων αποθέσεων οι οποίες έχουν μικρή αντίσταση στη διάβρωση και συνδυαστικά με τα μεγάλα ποσοστά γεωργίας που υπάρχουν στην περιοχή, δεν είναι εφικτή η μεγάλη αντίσταση στη διαδικασία διάβρωσης. Δεύτερη σε μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων είναι η λεκάνη Καρδόλακκα ($399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$) στην οποία εμφανίζονται σε μεγάλα ποσοστά καλλιεργούμενες εκτάσεις γεωργίας και αραιής βλάστησης. Αυτές οι χρήσεις γης δεν είναι δυνατό να αναστείλουν το ρυθμό διάβρωσης. Τέλος, η λεκάνη ρέματος Δέμα έχει μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων ($283 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$). Η λεκάνη αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά λιμναίων αποθέσεων, οι οποίες παρά την παρουσία εκτάσεων δασών προκαλούν έντονο βαθμό διάβρωσης.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα στερεοαπορροής με βάση το μοντέλο εκτίμησης EPM και το συντελεστή στερεοαπορροής (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με βάση το μοντέλο EPM.

Μοντέλο Εκτίμησης EPM			
Λεκάνες	Συντελεστής κατακράτησης, R	Εδαφική διάβρωση [$\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$]	Στερεοαπορροή [$\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$]
Δέμα	0.80	23136.78	18509.42
Τσάγκακη	0.85	21954.96	18661.71
Καρδόλακκας	0.66	46107.48	30430.94
Λευκοπηγής	0.77	135656.51	104455.51

Στη συνέχεια στον Πίνακα 4.6, παρουσιάζεται η στερεοαπορροή με βάση την εμπειρική σχέση Vanoni (εξίσωση 3.26). Η στερεοαπορροή εκτιμάται υποπολλαπλάσια σε σχέση με τη μέθοδο Gavrilovic, καθώς ο συντελεστής Gavrilovic λαμβάνει υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών και όχι μόνο το εμβαδό τους.



Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με τη μέθοδο Vanoni.

Vanoni			
Λεκάνες	Συντελεστής στερεοαπορροής	Εδαφική διάβρωση [t · γ ⁻¹]	Στερεοαπορροή [t · γ ⁻¹]
Δέμα	0.308	23136.78	7126.13
Τσάγκακη	0.294	21954.96	6454.76
Καρδόλακκας	0.295	46107.48	13601.71
Λευκοπηγής	0.262	135656.51	35542.01

Τέλος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 τα αποτελέσματα με βάση την εμπειρική εξίσωση της μεθόδου USDA- SCS (εξίσωση 3.27). Οι τιμές των συντελεστών εμφανίζουν μεγάλη διαφορά σε σχέση με τους συντελεστές κατακράτησης R κατά Gavrilovic και συνεπώς και η τελική εκτίμηση της στερεοαπορροής είναι εμφανώς μικρότερη.

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα στερεοαπορροής με τη μέθοδο USDA- SCS.

USDA- SCS			
Λεκάνες	Συντελεστής στερεοαπορροής	Εδαφική διάβρωση [t · γ ⁻¹]	Στερεοαπορροή [t · γ ⁻¹]
Δέμα	0.389	23136.78	9000.21
Τσάγκακη	0.372	21954.96	8167.25
Καρδόλακκας	0.374	46107.48	17244.20
Λευκοπηγής	0.337	135656.51	45716.24

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων αναγράφεται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα συντελεστών συγκράτησης.

Λεκάνες	ΕΜΒΑΔΟΝ (km ²)	Συντελεστής κατακράτησης R	Συντελεστής Στερεοαπορροής Vanoni	Συντελεστής Στερεοαπορροής SCS
Δέμα	30.62	0.80	0.308	0.389
Τσάγκακη	45.43	0.85	0.294	0.372
Καρδόλακκας	43.28	0.66	0.295	0.374
Λευκοπηγής	113.4	0.77	0.262	0.337



Όσον αφορά τους συντελεστές συγκράτησης, παρατηρείται ότι μεγαλύτερο συντελεστή και συνεπώς και μεγαλύτερη τιμή στερεοαπορροής παρουσιάζει ο συντελεστής κατακράτησης της μεθόδου Gavrilovic, στη συνέχεια είναι ο συντελεστής υπολογισμένος σύμφωνα με τη SCS και μικρότερη τιμή εμφανίζει ο συντελεστής κατά Vanoni. Επίσης, οι συντελεστές κατά Vanoni και SCS παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή τους στη λεκάνη ρέματος Δέμα, ενώ στη λεκάνη ρέματος Λευκοπηγής τη μικρότερη. Αυτό συμβαίνει αφού οι τιμές τους εξαρτώνται μόνο από το εμβαδό των λεκανών και είναι αντιστρόφως ανάλογοι της αύξησης του εμβαδού τους.



5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται υδρολογική διερεύνηση 4 λεκανών απορροής της παραλίμνιας λίμνης Πολυφύτου και στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος Gavrilovic για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων σε περιβάλλον ArcGIS. Παρουσιάζεται η επιφανειακή κατανομή της μέσης ετήσιας παραγωγής ιζημάτων, όπως και των παραμέτρων που την επηρεάζουν, δηλαδή της γεωλογίας, των χρήσεων γης, της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και των κλίσεων γης. Στη συνέχεια, γίνεται η εκτίμηση της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συγκράτησης στερεοαπορροής κατά Gavrilovic, SCS και Vanoni για τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Από την εφαρμογή των παραπάνω προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.

5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία αυτά είναι τα εξής:

- Η υγρασιακή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το έδαφος διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις πλημμυρικές αιχμές.
- Οι παράγοντες που ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στη διάβρωση είναι η γεωλογία και οι χρήσεις γης της περιοχής. Ο λόγος είναι ότι η φυτοκάλυψη αναστέλλει το ρυθμό διάβρωσης και το ύψος βροχόπτωσης που είναι η κινητήριος δύναμη της διάβρωσης
- Σχετικά με τη σύγκριση των συντελεστών συγκράτησης Gavrilovic, Vanoni και συντελεστή SCS, παρατηρείται ότι τις μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει ο συντελεστής συγκράτησης Gavrilovic καθώς εξαρτάται από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (περίμετρος, μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής), ενώ οι άλλοι δύο συντελεστές εξαρτώνται μόνο από το μέγεθος των λεκανών. Τέλος, παρατηρείται ότι οι συντελεστές συγκράτησης SCS και Vanoni αυξάνονται με τη μείωση των εμβαδών των λεκανών απορροής και αντιστρόφως.
- Συγκριτικά με τους συντελεστές SCS και Vanoni, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι τιμές του συντελεστή συγκράτησης που προκύπτουν από την εμπειρική εξίσωση της SCS είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που προκύπτουν από την εμπειρική εξίσωση του Vanoni.

5.3 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σχετικά με τα ειδικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι τα εξής:

- Η ενεργός βροχόπτωση στη λεκάνη ρέματος Δέμα αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες υγρασίας εδάφους, σε ποσοστό 40.5% της συνολικής βροχόπτωσης.



- Στις ξηρές συνθήκες το ποσοστό είναι 5.8% (μείωση κατά 85.7%), ενώ στις υγρές το 71% (αύξηση κατά 75.8%).
- Στη λεκάνη απορροής ρέματος Τσαγκακη, η ενεργός βροχόπτωση για μέσες συνθήκες εδάφους αντιστοιχεί στο ποσοστό 43% της συνολικής βροχόπτωσης. Η διαμόρφωση των ποσοστών στις ξηρές και υγρές συνθήκες αντιστοίχως είναι 8% (μείωση 81.4%) και 74% (αύξηση 72.5%)
 - Στη λεκάνη απορροής ρέματος Καρδολακκα, η ενεργός βροχόπτωση για μέσες συνθήκες εδάφους αντιστοιχεί στο ποσοστό 32% της συνολικής βροχόπτωσης. Η διαμόρφωση των ποσοστών στις ξηρές και υγρές συνθήκες αντιστοίχως είναι 3.2% (μείωση 90%) και 64.6% (αύξηση 49.9%)
 - Η ενεργός βροχόπτωση στη λεκάνη ρέματος Λευκοπηγής αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες υγρασίας εδάφους, σε ποσοστό 48% της συνολικής βροχόπτωσης. Στις ξηρές συνθήκες το ποσοστό είναι 10.3% (μείωση κατά 78.5%), ενώ στις υγρές το 78% (αύξηση κατά 62%).
 - Όσον αφορά τη λεκάνη του ρέματος Δέμα, το πλημμυρογράφημα για κανονικές συνθήκες υγρασίας παρουσιάζει αιχμή $Q=37.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Η αύξηση της ενεργούς βροχόπτωσης κατά 62% στις υγρές εδαφικές συνθήκες προκαλεί και αντίστοιχη αύξηση 59.6% στην πλημμυρική αιχμή, με τιμή $Q=59.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Σχετικά με τις ξηρές συνθήκες υγρασίας παρατηρείται ότι η μείωση της ενεργούς βροχόπτωσης οδηγεί σε παροχή $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$, μείωση δηλαδή της τάξης του 67%.
 - Στη λεκάνη απορροής του ρέματος Τσαγκακη, η πλημμυρική αιχμή στις κανονικές συνθήκες εδάφους έχει τιμή $63 \text{ m}^3/\text{s}$. Στις ξηρές συνθήκες η τιμή ανέρχεται σε $22.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (μείωση 64.9%), ενώ στις υγρές με την αύξηση της ενεργούς βροχόπτωσης κατά 72.5%, η πλημμυρική αιχμή εμφανίζει την τιμή $92.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (αύξηση κατά 47.5%).
 - Το πλημμυρογράφημα για κανονικές συνθήκες εδάφους, στη λεκάνη ρέματος Καρδολακκα, παρουσιάζει αιχμή $33.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Η μείωση της ενεργούς βροχόπτωσης κατά 90% στις ξηρές συνθήκες του εδάφους, οδηγεί σε αιχμή $6.70 \text{ m}^3/\text{s}$ (μείωση 79.8%). Στις υγρές συνθήκες η παροχή παρουσιάζει αύξηση κατά 90.9% και έχει τιμή $63.4 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Η πλημμυρική αιχμή στη λεκάνη απορροής του ρέματος Λευκοπηγής εμφανίζει τιμή $166.7 \text{ m}^3/\text{s}$, για μέσες συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Στις υγρές συνθήκες λαμβάνει τιμή $54.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (μείωση σε ποσοστό 67.4%), ενώ στις ξηρές συνθήκες η μείωση των απωλειών που συνεπάγεται στην αύξηση 75.8% της ενεργούς βροχόπτωσης, δίνει στην αιχμή την τιμή $269.1 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Μεγαλύτερη μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων εμφανίζει η λεκάνη του ρέματος Λευκοπηγής ($448 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), στη συνέχεια βρίσκεται η λεκάνη ρέματος



Καρδόλακκα ($399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), τρίτη είναι η λεκάνη ρέματος Δέμα ($283 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), ενώ τη μικρότερη η λεκάνη ρέματος Τσάγκακη ($181 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$). Η λεκάνη ρέματος Λευκοπηγής εμφανίζει μεγάλα ποσοστά λιμναίων αποθέσεων οι οποίες έχουν μικρή αντίσταση στη διάβρωση και συνδυαστικά με τα μεγάλα ποσοστά γεωργίας που υπάρχουν στην περιοχή, δεν είναι εφικτή η μεγάλη αντίσταση στη διαδικασία διάβρωσης.

- Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι έντονο και στη λεκάνη ρέματος Καρδόλακκα ($399 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{y}$), καθώς η παρουσία καλλιεργούμενων εκτάσεων γης και αραιής βλάστησης εντείνουν το ρυθμό του φαινομένου.
- Τα ποσοστά λιμναίων αποθέσεων είναι μεγάλα και στη λεκάνη ρέματος Δέμα. Παρά την παρουσία δολομιτικών ασβαστόλιθων στην έκτασή της, εμφανίζεται μέτρια διάβρωση στη λεκάνη.
- Μικρότερη μέση ετήσια παραγωγή ιζημάτων παρουσιάζεται στη λεκάνη ρέματος Τσάγκακη, στην οποία η ύπαρξη δασών και η γεωλογία της περιοχής, με κυρίαρχο στοιχείο τον ασβεστόλιθο, βοηθά στην αναστολή της διάβρωσης.
- Η συνολική ποσότητα φερτών υλών που καταλήγουν στην τεχνητή λίμνη Πολυφύτου είναι 37171.3 t y^{-1} για τις νότιες λεκάνες απορροής (ρέματα Δέμα και Τσάγκακη) και $134886.45 \text{ t y}^{-1}$ για τις βόρειες λεκάνες (ρέματα Καρδόλακκα και Λευκοπηγής), σύμφωνα με το μοντέλο Gavrilovic. Οι νότιες λεκάνες συγκρατούν ποσοστό 18% της ποσότητας των φερτών υλών από τον αρχικό παραγόμενο όγκο, ενώ οι βόρειες 26%, γεγονός που αποδίδεται στο ομαλότερο ανάγλυφο των βόρειων λεκανών και στην έντονη παρουσία δασών στις νότιες λεκάνες.

5.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε αφορμή για τη διατύπωση ορισμένων προτάσεων προς μελλοντική έρευνα

- Η μέθοδος Gavrilovic για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία μόνο στην παραλίμνια περιοχή της Πολυφύτου, όπου τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι παρόμοια και για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Προτείνεται επομένως η εφαρμογή και σύγκριση της μεθόδου μεταξύ λεκανών απορροής που ανήκουν σε διαφορετικά υδατικά διαμερίσματα και έχουν μεγάλες διαφορές στα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.
- Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με διαφορετική μέθοδο και σύγκριση των αποτελεσμάτων.



- Χρήση του υετογραφήματος που προκύπτει από τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης.

ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ / ENGLISH REFERENCES

Bagnold, R. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US

Blinkov I., Kostadinov S. (2010). *Applicability of various Erosion Risk Assessment Methods for Engineering Purposes*. Ohrid, North Macedonia: BALWOIS 2010 Conference

Chow V., Maidment D., Mays L. (1988). *Applied Hydrology*. Νέα Υόρκη: Mc Graw-Hill.

Dooge, J., (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of geophysical research*, 64(2), pp.241-256

Emmanouloudis D., Christou O. and Filippidis E. (2003). Quantitative estimation of degradation in the Aliakmon river basins using GIS. *Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques*. IAHS Publication, 279, 234.

Emmanouloudis D. and Filippidis E. (2002). A quantitative estimation model of mountainous watershed degradation. *Kick-off workshop on IAHS. Decade of prediction in ungauged basins (PUB) – Hydrological Science on Mission, Brazil*.

Fernandez C., Wu J. Q., McCool D. K., & Stöckle C. O. (2003). Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation*.

Fleming, M., & Doan J. (2013). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual Version 4.2*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Centre, Davis, CA.

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

Giandotti M. (1934). *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d' acqua*. Roma: Ministero dei Lavori Pubblici.



Globevnik L., Danko H., Petkovšek G., & Rubinić J. (2003). Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. *International Association of Hydrological Sciences*, 279.

Jenson S., Domingue J. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis.

Kirkby M., & Morgan R. (1980). *Soil Erosion*. Chichester: Wiley.

Koutsoyiannis D. (1994). A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. *Journal of Hydrology*.

Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology* 206.

Lazarević R. (1968). Naučno-istraživački rad iproblemi u oblastiborbeprotiverozijeibujičnih tokova. In: Materijali sa simpozijuma o problemima erozije u SR Srbiji. Beograd, Institut za šumarstvo idrvenu industriju, pp. 35–46.

Lazarević, R. (1985). Novi postupak za odredjivanje koeficijenata erozije (Z) (The new method for erosion coefficient determination). *Erozija – stručno-informativnibilten*, 13, pp. 54–61.

McCuen, R., (1989). *Hydrologic analysis and design*. Prentice-Hall Inc, EnglewoodCliffs

Milanesi L., Pilotti M., Clerici A., Gavrilovic Z. (2015) *Application of an improved version of the Erosion Potential Method in Alpine Areas*. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1

Morgan R. (1995). *Soil Erosion and Conservation, 2nd Edition*. Essex: Longman.Pandey, S. K. Himanshu, S. K. Mishra, and V. P. Singh, Physically based soil erosion and sediment yield models revisited, *Catena*, vol. 147, pp. 595–620, 2016.

Renfro G. W. (1972). *Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield*.USA: Proc Sainch-Yield Workshop

Stefanidis P., Myronidis D., Sapountzis M. and Stathis D. (1998). The torrent "Sklithro" in Florina. *Torrential Environment and torrent control system*. *Scientific Annals*. Department of forestry and natural enviroment. Aristotelian University of Thessaloniki. \$1, (2), 1275.

US Army Corps of Engineers (USACE), 2013. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-HMS: User's Manual, Version 10.1, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA; Available online: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf



U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA-SCS), National Engineering Handbook, Section 3: Sedimentation, Chapter 6: Sediment sources, yields, and delivery ratios, pp 18, 1971.

Vanoni V. A. (1975). *Sedimentation Engineering No.54*. ASCE Manuals and Reports of Engineering Practices.

Walling D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65

SCS, U., 1972. National engineering handbook. Hydrology Section, 4

Stefanidis P.Sapountzis M.Stathis D.2002*Sheet erosion after fire at the urban forest of Thessaloniki (Northern Greece)*Silva Balcanica, 2(1)

Zarris D., Vlastara M., & Panagoulia D. (2011). *Sediment Delivery Assessment for a Transboundary Mediterranean Catchment: The Example of Nestos River Catchment*. Water Resources Management

Zemljic M. (1971) – Calcul du debit solide – Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antiérosif, International Symposium Interpraevent, Villaco

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ / GREEK REFERENCES

Ανδρικοπούλου Θ. (2020). *Ανάπτυξη και συγκριτική αξιολόγηση ενός καταναμημένου μοντέλου βροχής-απορροής με χρήση μεθόδων GIS, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Βαχαβιώλος Θ. (2014) *Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμειυτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα:Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δερμιτζάκης Μ., Λέκκας Σ. (2010) *Διερευνώντας τη Γη. Εισαγωγή στη Γενική Γεωλογία, Β' Έκδοση*. Αθήνα: Εκδόσεις Γ. Γκέλμπεσης

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.

Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., Δημητριάδης Π., Μαχαίρας Α., (2013). *Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων. Ημερίδα Ερευνητικού Προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ*.



Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε., Κουτσογιάννης Δ. (2001) *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε., Κουτσογιάννης Δ. (2002). *Η εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες ως δυναμικό φαινόμενο - Εφαρμογή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Θεοχάρη Α. (2018). *Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης χωροθέτησης δικτύου υδρομετρικών σταθμών στην Αττική με χρήση μεθόδων GIS, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ιμπαμπί Μ. (2023). *Υπολογισμός Στερεοαπορροής και Υδρολογική - Υδραυλική Προσομοίωση στην Περιοχή της Εύβοιας, Διπλωματική Εργασία*, Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καββαδά, Ο. (2012) *Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία*, Αθήνα :Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κάβουρας Μ., Δάρρα Α., Κονταξάκη Σ., Τομαή Ε. (2016) *Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας - Αρχές και Τεχνολογίες*.Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Κουρακλή Π. (2010) *Εκτίμηση του κινδύνου πρόσχωσης των ταμιευτήρων νερού με τη χρήση των GIS και της τηλεπισκόπησης (Εφαρμογή Τεχνητή Λίμνη Πολυφύτου Ν. Κοζάνης)*, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη : Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κουκουβίνος Α. (2014). *Προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογίας πλημμυρών, Ημερίδα Ερευνητικού Προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ*.

Κουτσογιάννης Δ., Μαρκόνης Γ., Κουκουβίνος Α., Παπαλεξίου Σ., Μαμάσης Ν., Δημητριάδης Π. (2010). *Υδρολογική μελέτη ισχυρών βροχοπτώσεων στη λεκάνη του Κηφισού*

Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος Θ. (2016) *Τεχνική Υδρολογία*, 4η έκδ.

Κουτσογιάννης Δ.Ταρλά Κ. (1987) *Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην ΕλλάδαΤεχνικά Χρονικά, Α-7(3)*

Κωτούλας Δ. (2001). *Ορεινή Υδρονομική Τόμος Ι: Τα ρέοντα ύδατα*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μαμάσης, Ν. (2007) *Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα*, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, ΕΜΠ, Αθήνα



Μιμίκου και Μπαλτάς (2012) Τεχνική Υδρολογία, 5η έκδ, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Μυρωνίδης Δ. (2001). *Εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης και στερεομεταφοράς στις λεκάνες απορροής και στις κοίτες των χειμαρρικών ρευμάτων με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), Μεταπτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη : Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.*

Ραΐσης, Φ. (2020). *Υδρολογική-υδραυλική προσομοίωση και διερεύνηση της στερεομεταφοράς στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού, Διπλωματική εργασία, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.*

Σαπουντζής Μ., Μυρωνίδης Δ., Στάθης Δ. και Στεφανίδης Π. (2009). Σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής των μεθόδων πρόβλεψης της διάβρωσης USLE και Gavrilonic με πραγματικές μετρήσεις σε λεκάνη απορροής . Κοινό συνέδριο : 11ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης και 7^ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων. Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών, Τόμος Ι. Βόλος 27-30/05/2009

ΥΠΕΝ, ΕΓΥ (2017) ΕΡΓΟ : 1 Η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (ΕΛ09)

ΥΠΕΝ, ΕΓΥ (2018) ΕΡΓΟ : ΣΧΕΔΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΩΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Φελώνη Ε., Μπουρνάς Α., Μπαλτάς Ε. 2019 *Εκτίμηση στερεοαπορροής σε ορεινή λεκάνη χωρίς δεδομένα με χρήση τεχνικών GIS, 14ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, 16-17 Μαΐου 2019*

Χριστοφίδης Α. (2008) Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΙΣΤΙΟΤΟΠΟΙ

geo.auth.gr (Προσπέλαση - Νοέμβριος 2022)

land.copernicus.eu (Προσπέλαση - Νοέμβριος 2022)

<http://eidc.ceh.ac.uk/metadata/32533dd6-7c1b-43e1-b892-e80d61a5ea1d/corine-land-cover-legend-layer-file/view> (Προσπέλαση - Δεκέμβριος 2022)



nationalgeographic.org (Προσπέλαση - Δεκέμβριος 2022)

https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=174&Itemid=604 (Προσπέλαση - Δεκέμβριος 2022)

<http://kyg.hydroscope.gr/> (Προσπέλαση - Φεβρουάριος 2023)