



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος



Διπλωματική Εργασία

**Υδρολογική – υδραυλική προσομοίωση και διερεύνηση της  
στερεομεταφοράς στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού  
ποταμού**

Φίλιππος Ραΐσης

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

Αθήνα, 2020

*Στην γιαγιά μου*



## Ευχαριστίες

Μέσα από αυτήν την εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές, της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν αυτά τα 5 πολύτιμα χρόνια, τις οποίες προσπάθησα να αξιοποιήσω και εφαρμόσω εντός αυτής.

Ειδικές ευχαριστίες στον επιβλέπων καθηγητή, του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Ευάγγελο Μπαλά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ολοκληρώσω κοντά του τις σπουδές μου, δίνοντάς μου, μέσω της επιλογής του θέματος της εργασίας, το πάτημα για να δοκιμάσω τις δυνατότητές μου.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη και τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Νίκο Μαμάση, της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Δε μπορώ να παραλείψω την υποψήφια διδάκτορα, της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αιμιλία – Παναγιώτα Θεοχάρη για την ζωτικής σημασίας βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη και τις συμβουλές που μου παρέχουν από την αρχή του βίου μου, και τους φίλους μου, εντός και εκτός της σχολής, για την υπομονή και τα ενθαρρυντικά τους λόγια.



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	iv
Ευρετήριο Σχημάτων .....	vii
Ευρετήριο Πινάκων .....	ix
List of Figures .....	xi
List of Tables .....	xii
Ευρετήριο Αγγλικών Ακρωνύμιων / English Acronyms .....	xiii
Ευρετήριο Ελληνικών Ακρωνύμιων / Greek Acronyms .....	xiv
Abstract.....	xv
Extended Summary .....	xvi
Introduction .....	xvi
Materials and Methods .....	xvi
Study Area .....	xxiii
Results .....	xxxix
Conclusions.....	xlvii
Περίληψη .....	I
1 Εισαγωγή.....	1
2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	3
2.1 Όμβριες καμπύλες .....	3
2.1.1 Γεωγραφική Μεταβλητότητα .....	5
2.2 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχόπτωσης.....	6
2.2.1 Μεθοδολογίες ολοκλήρωσης.....	6
2.2.2 Συντελεστής αναγωγής φ .....	7
2.3 Υετογράφημα .....	8
2.4 Ενεργή Βροχόπτωση .....	9
2.5 Εδαφική Διάβρωση .....	13
2.5.1 Βασικές έννοιες – Ορολογία .....	13
2.5.2 Υδατική διάβρωση.....	14
2.5.3 Ρυθμιστικοί παράγοντες διάβρωσης .....	16
2.5.4 Μορφές στερεομεταφοράς .....	17
2.5.5 Εκτιμήσεις εδαφικής διάβρωσης και στερεοαπορροής.....	19
2.5.5.1 Εμπειρικά μοντέλα .....	20
2.5.5.2 Προσδιοριστικά μοντέλα .....	22
2.5.5.3 Στοχαστικά ομοιώματα.....	22
3 Επιλογή μεθόδων και εργαλείων .....	23





3.1	ArcMap (έκδοση 10.4) .....	23
3.1.1	HEC-GeoHMS (έκδοση 10.2).....	24
3.2	HEC-HMS (έκδοση 4.5).....	26
3.3	HEC-RAS (έκδοση 5.0.7).....	28
3.4	Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (ΑΠΕΕΑ ή RUSLE) .....	30
3.4.1	Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity Factor), R.....	30
3.4.1.1	Αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή R .....	30
3.4.1.2	Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή R.....	31
3.4.2	Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil Erodibility Factor), K 36	
3.4.3	Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (Slope Length & Steepness Factor), LS.....	40
3.4.4	Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management Factor), C.....	42
3.4.5	Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης (Support Practice Factor), P .....	46
3.4.6	Συντελεστής στερεοαπορροής (Soil Delivery Ratio), SDR .....	47
3.5	Μέθοδος Gavrilovic (Erosion Potential Method), EPM.....	49
3.5.1	Συντελεστής κατακράτησης (Retention Coefficient), R.....	53
3.6	Σχέση Κουτσογιάννη – Ταρλά.....	54
4	Περιγραφή της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής .....	56
4.1	Γενικά.....	56
4.2	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα .....	57
4.3	Υδρολογικά δεδομένα .....	59
4.4	Μετεωρολογικά δεδομένα .....	60
4.5	Γεωλογία.....	61
4.5.1	Γεωλογικά χαρακτηριστικά .....	61
4.5.2	Υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά.....	65
4.6	Χρήσεις γης .....	67
5	Αποτελέσματα – Ανάλυση .....	69
5.1	Υδρολογική ανάλυση .....	69
5.2	Υδρολογική απόκριση της περιοχής ανάντη .....	74
5.3	Υδραυλική απόκριση της περιοχής κατόντη .....	75
5.4	Στερεομεταφορά .....	80
5.4.1	Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (ΑΠΕΕΑ ή RUSLE).....	80



5.4.1.1	Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity Factor), R.....	84
5.4.1.2	Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil Erodibility Factor), K .....	86
5.4.1.3	Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (Slope Length & Steepness Factor), LS .....	86
5.4.1.4	Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management Factor), C .....	88
5.4.1.5	Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης (Support Practice Factor), P.....	88
5.4.2	Μέθοδος Gavrilovic (Erosion Potential Method), EPM .....	89
5.4.2.1	Παράμετρος βροχόπτωσης, P [mm].....	91
5.4.2.2	Παράμετρος θερμοκρασίας, T.....	93
5.4.2.3	Παράμετρος διάβρωσης, Z .....	96
5.4.2.4	Έμμεσος υπολογισμός της εδαφικής απώλειας.....	100
5.4.3	Σχέση Κουτσογιάννη - Ταρλά.....	101
6	Συζήτηση .....	102
6.1	Γενικά Συμπεράσματα .....	102
6.2	Ειδικά Συμπεράσματα.....	103
6.3	Μελλοντική έρευνα.....	104
	Διεθνής Αναφορές / English References.....	105
	Ελληνικές Αναφορές / Greek References .....	112
	Διαδικτυακοί Ιστότοποι / Websites .....	116
	Παραρτήματα / Appendixes .....	117
	Παράρτημα I: Στρωματογραφικές στήλες .....	118
	Παράρτημα II: Γεωλογικοί σχηματισμοί .....	119
	Παράρτημα III: Καλύψεις - χρήσεις γης .....	131
	Παράρτημα IV: Μέση μηνιαία απορροή [hm <sup>3</sup> ] Σπερχειού ποταμού στη θέση Γέφυρα Κομποτάδων .....	133



## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Μηχανισμός υδατικής διάβρωσης εδάφους από τη βροχόπτωση 15	
Σχήμα 2.2: Μορφές υδατικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής (πηγή: Ζαρρής Δ., 2019).....	16
Σχήμα 2.3: Μηχανισμός στερεομεταφοράς (πηγή: slideplayer.com ).....	18
Σχήμα 2.4: Σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς (πηγή: Λυκούδη Ε. Ε. & Ζαρρής Δ., 2006).....	19
Σχήμα 3.1: Σύνθεση χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων GIS.....	23
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του HEC-GeoHMS για την παρούσα εργασία... ..	25
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής του προγράμματος HEC-HMS για την παρούσα εργασία.....	27
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής του προγράμματος HEC-RAS για την παρούσα εργασία.....	29
Σχήμα 3.5: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης, R, της ESDAC.....	36
Σχήμα 3.6: Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας, K.....	37
Σχήμα 3.7: Τιμές συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας, K, για αντιπροσωπευτικά εδάφη.....	38
Σχήμα 3.8: Θέσεις αντιπροσωπευτικών εδαφών στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών.....	38
Σχήμα 3.9: Χάρτης συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας, K, της ESDAC..	39
Σχήμα 3.10: Μήκος πλαγιάς, λ (πηγή: Renard et al. 1996).....	40
Σχήμα 3.11: Χάρτης συντελεστή ανάγλυφου, LS, της ESDAC.....	42
Σχήμα 3.12: Καμπύλη NDVI-C για τιμές παραμέτρων $\alpha=2$ και $\beta=1$ .....	45
Σχήμα 3.13: Χάρτης συντελεστή φυτοκάλυψης, C, της ESDAC.....	46
Σχήμα 3.14: Χάρτης συντελεστή ελέγχου διάβρωσης, P, της ESDAC.....	47
Σχήμα 4.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επιλεγμένης λεκάνης απορροής.....	56
Σχήμα 4.2: Ζώνες συντελεστή κ (πηγή: floods.ypeka.gr).....	58
Σχήμα 4.3: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας λ' (πηγή: floods.ypeka.gr).....	58
Σχήμα 4.4: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου θέσης ψ' (πηγή: floods.ypeka.gr).....	59
Σχήμα 4.5: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας (πηγή: geo.auth.gr).....	62
Σχήμα 4.6: Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών που αναπτύσσονται στην περιοχή μελέτης.....	65
Σχήμα 4.7: Χάρτης υδρολιθολογικών σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης.....	65
Σχήμα 4.8: Καλύψεις / χρήσεις γης όπως αυτές εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης.....	68
Σχήμα 5.1: Χάρτης πολυγώνων Thiessen για τους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς.....	71
Σχήμα 5.2: Ανάλυση όμβριων καμπυλών βροχομετρικού σταθμού «ΠΥΡΑ»	72
Σχήμα 5.3: Υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 100 ετών... ..	73
Σχήμα 5.4: Αθροιστικό υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 100 ετών.....	73
Σχήμα 5.5: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για ξηρές συνθήκες εδάφους, CN <sub>i</sub> .....	74



Σχήμα 5.6: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για κανονικές συνθήκες εδάφους, CN <sub>ii</sub> .....	74
Σχήμα 5.7: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για υγρές συνθήκες εδάφους, CN <sub>iii</sub> .....	75
Σχήμα 5.8: Περιοχή προσομοίωσης στο πρόγραμμα HEC-RAS .....	76
Σχήμα 5.9: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό ξηρές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου ..	77
Σχήμα 5.10: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό κανονικές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου .....	78
Σχήμα 5.11: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό υγρές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου ..	79
Σχήμα 5.12: Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, βάσει του μοντέλου RUSLE (LS ~ Wischmeier & Smith (1978), R(y) ~ Φλαμπούρης (2008)).....	81
Σχήμα 5.13: Χάρτης εδαφικής απώλειας, βάσει του μοντέλου RUSLE (δεδομένα της ESDAC).....	82
Σχήμα 5.14: Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου RUSLE .....	83
Σχήμα 5.15: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης R, για R1 = -754.72 + 2.11·P, P [mm].....	84
Σχήμα 5.16: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης R, για R2 = 0.7·P, P [mm].....	85
Σχήμα 5.17: Χάρτης συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K, για τα εμφανιζόμενα πετρώματα της περιοχής μελέτης .....	86
Σχήμα 5.18: Χάρτης συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την εξίσωση εκτίμησης των Moore & Burch (1986).....	87
Σχήμα 5.19: Χάρτης συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την εξίσωση εκτίμησης των Wischmeier & Smith (1978) .....	87
Σχήμα 5.20: Χάρτης συντελεστή φυτοκάλυψης C, για τις εμφανιζόμενες κάλυψης/ χρήσης γης της περιοχής μελέτης.....	88
Σχήμα 5.21: Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, βάσει του μοντέλου EPM.....	90
Σχήμα 5.22: Ανάλυση ευαισθησίας μοντέλου EPM.....	91
Σχήμα 5.23: Συσχέτιση βροχόπτωσης με το υψόμετρο του εδάφους .....	92
Σχήμα 5.24: Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, P [mm], στην περιοχή μελέτης.....	93
Σχήμα 5.25: Συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο του εδάφους .....	94
Σχήμα 5.26: Χάρτης μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, T <sub>o</sub> [°C], στην περιοχή μελέτης.....	95
Σχήμα 5.27: Χάρτης συντελεστή θερμοκρασίας, T, για την περιοχή μελέτης ..	95
Σχήμα 5.28: Χάρτης συντελεστή διάβρωσης, Z, για την περιοχή μελέτης.....	96
Σχήμα 5.29: Χάρτης συντελεστή προστασίας φυτοκάλυψης κατά της διάβρωσης, X, για την περιοχή μελέτης .....	97
Σχήμα 5.30: Χάρτης συντελεστή ανθεκτικότητας πετρωμάτων κατά της βροχόπτωσης, Y, για την περιοχή μελέτης .....	98
Σχήμα 5.31: Χάρτης συντελεστή υφιστάμενης διάβρωσης εδάφους, φ, για την περιοχή μελέτης.....	99
Σχήμα 5.32: Χάρτης συντελεστή κλίσης εδάφους, J, για την περιοχή μελέτης .....	99
Σχήμα 5.33: Ανάλυση ευαισθησίας σχέσης Κουτσογιάννη - Ταρλά .....	101



## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τη διηθητικότητά τους (πηγή: floods.ypeka.gr) .....	9
Πίνακας 2.2: Ομάδες διηθητικότητας εδαφών για πετρώματα του ελλαδικού χώρου (πηγή: floods.ypeka.gr) .....	10
Πίνακας 2.3: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής, CN, βάσει της ομάδας διηθητικότητας του εδάφους και της φυτοκάλυψης που υπάρχει (πηγή: floods.ypeka.gr) και τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning (πηγή: Papaioannou G. et al., 2018) [1/2] .....	11
Πίνακας 2.4: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής, CN, βάσει της ομάδας διηθητικότητας του εδάφους και της φυτοκάλυψης που υπάρχει (πηγή: floods.ypeka.gr) και τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning (πηγή: Papaioannou G. et al., 2018) [2/2] .....	12
Πίνακας 3.1: Συντελεστής α για μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελλάδας (πηγή: Φλαμπούρης Κ., 2008) .....	34
Πίνακας 3.2: Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας, K, του μοντέλου RUSLE, για τα εδάφη της περιοχής του Σπερχειού ποταμού, Ελλάδα (πηγή: Sigalos G. et al., 2010) .....	39
Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή X, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την κατάσταση της λεκάνης και το είδος της φυτοκάλυψης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001) .....	51
Πίνακας 3.4: Τιμές συντελεστή Y, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την πετρολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001) .....	52
Πίνακας 3.5: Τιμές συντελεστή φ, του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την υπάρχουσα εδαφική διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001) .....	52
Πίνακας 3.6: Ερμηνεία συντελεστή Z, του μοντέλου Gavrilovic, για τη διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Gavrilovic Z. et al., 2004) .....	52
Πίνακας 3.7: Τιμές συντελεστή K σχέσης Κουτσογιάννη-Ταρλά .....	54
Πίνακας 4.1: Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων των βροχογράφων του ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας .....	57
Πίνακας 4.2: Γενικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους βροχογράφους / βροχομετρικούς σταθμούς .....	59
Πίνακας 4.3: Ειδικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους βροχογράφους / βροχομετρικούς σταθμούς .....	60
Πίνακας 4.4: Ειδικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς .....	61
Πίνακας 4.5: Γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην περιοχή μελέτης .....	64
Πίνακας 4.6: Καλύψεις/ χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης .....	67
Πίνακας 5.1: Υπολογισμός του χρόνου συρροής / συγκέντρωσης μέσω της εξίσωσης Giandotti .....	69
Πίνακας 5.2: Σημειακή βροχόπτωση (d=5h, T=100y) στους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς .....	69
Πίνακας 5.3: Πολύγωνα Thiessen για τους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς .....	70
Πίνακας 5.4: Επιφανειακά ολοκληρωμένη βροχόπτωση, περιόδου επαναφοράς 100 ετών, για την περιοχή μελέτης .....	71
Πίνακας 5.6: Αριθμός καμπύλης απορροής, CN, για την περιοχή μελέτης ....	73





Πίνακας 5.7: Χρονική στιγμή εμφάνισης μέγιστου βάθους ροής, στη γέφυρα Λειανοκλαδίου, σε σχέση με τις συνθήκες του εδάφους.....	76
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα συνδυασμών μεθόδων εκτίμησης συντελεστών του μοντέλου RUSLE .....	80
Πίνακας 5.9: Σύγκριση "επικρατέστερων" μεθόδων εκτίμησης συντελεστή ανάγλυφου LS του μοντέλου RUSLE.....	80
Πίνακας 5.10: Σύγκριση επιλεγμένου συνδυασμού μεθόδων εκτίμησης με την εκτίμηση της ESDAC.....	82
Πίνακας 5.11: Συντελεστές στερεοαπορροής, βάσει διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης, και τελική στερεοαπορροή για τον επιλεγμένο συνδυασμό μεθόδων εκτίμησης των συντελεστών του μοντέλου RUSLE .....	83
Πίνακας 5.12: Συγκριτικά αποτελέσματα εδαφικής διάβρωσης του μοντέλου EPM, για τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις .....	89
Πίνακας 5.13: Συντελεστές στερεοαπορροής / κατακράτησης, βάσει διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης, και τελική στερεοαπορροή του μοντέλου EPM.....	90
Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων εκτίμησης στερεοαπορροής RUSLE και EPM .....	91
Πίνακας 5.15: Μέση ετήσια βροχόπτωση σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού.....	92
Πίνακας 5.16: Μέση ετήσια θερμοκρασία σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού.....	93
Πίνακας 5.17: Υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης σύμφωνα με το μοντέλο Gavrilovic .....	100
Πίνακας 5.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων εκτίμησης στερεοαπορροής RUSLE, EPM και Κουτσογιάννη-Ταρλά.....	101



## List of Figures

Figure 1: Thiessen polygons of the selected rain gauges / stations .....	xviii
Figure 2: HEC-GeoHMS flowchart used in this paper .....	xxiii
Figure 3: HEC-HMS flowchart used in this paper .....	xxiv
Figure 4: HEC-RAS flowchart used in this paper .....	xxv
Figure 5: Soil erosion types caused by water (source: researchgate.net)....	xxvi
Figure 6: Sediment transportation (source: slideplayer.com) .....	xxvii
Figure 7: Digital Elevation Model of the studied area .....	xxxiii
Figure 8: Geology map of the studied area .....	xxxvi
Figure 9: Hydrologic soil groups of the studied area .....	xxxvii
Figure 10: Land use map of the studied area .....	xxxviii
Figure 11: Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years .....	xxxix
Figure 12: Cumulative hyetograph (S-Curve) for rainfall with a return period of 100 years .....	xxxix
Figure 13: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for dry soil conditions, CN <sub>I</sub> .....	xl
Figure 14: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for normal soil conditions, CN <sub>II</sub> .....	xl
Figure 15: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for wet soil conditions, CN <sub>III</sub> .....	xli
Figure 16: Simulation area in HEC-RAS software .....	xlii
Figure 17: Simulation of a flood event under wet soil conditions with the water depth at Leianokladi bridge highlighted.....	xliii
Figure 18: Soil erosion estimated by RUSLE model .....	xliv
Figure 19: Soil erosion estimated by RUSLE model (ESDAC data) .....	xliv
Figure 20: Sensitivity analysis for RUSLE model .....	xliv
Figure 21: Soil erosion estimated by EPM model .....	xlvi
Figure 22: Sensitivity analysis for EPM model .....	xlvi
Figure 23: Sensitivity analysis for the Koutsoyiannis-Tarla model .....	xlvii



## List of Tables

Table 1: IDF curve's parameters for rain gauges located in WD Eastern Central Greece .....	xvii
Table 2: Hydrologic Soil Groups by the Natural Resource Conservation Service (source: usda.gov) .....	xx
Table 3: Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: floods.ypeka.gr) and Manning's n (source: Papaioannou G. et al., 2018) [1/2].....	xx
Table 4: Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: floods.ypeka.gr) and Manning's n (source: Papaioannou G. et al., 2018) [2/2].....	xxi
Table 5: Soil erodibility factor, K, for the geology of the studied area (source: Sigalos G. et al., 2010) .....	xxviii
Table 6: Soil protection coefficient, X, based on the anti-erosion works and measures (source: Kojchevska T. 2014).....	xxx
Table 7: Soil protection coefficient, X, based on the vegetal cover type (source: Efthimiou N. et al., 2016) .....	xxxii
Table 8: Soil erodibility coefficient, Y, based on soil type and landform (source: Efthimiou N. et al., 2016) .....	xxxii
Table 9: Existing erosion coefficient, $\phi$ , based on the type and the extent of the existing erosion of the area (source: Efthimiou N. et al., 2016).....	xxxii
Table 10: Qualitative erosion categories (source: Gavrilovic Z. et al., 2004) .....	xxxii
Table 11: Soil erodibility coefficient based on geological formation .....	xxxii
Table 12: Rain gauges used in catchment's precipitation estimation.....	xxxiv
Table 13: Meteorologic stations of NOA used in catchment's temperature estimation .....	xxxv
Table 14: Geology types in the study area.....	xxxv
Table 15: Land use of the studied area [1/2].....	xxxvii
Table 16: Land use of the studied area [2/2].....	xxxviii
Table 17: Curve numbers, CN for the studied area.....	xl
Table 18: Time of peak water depth at Leianokladi bridge.....	xlii



## Ευρετήριο Αγγλικών Ακρωνύμιων / English Acronyms

- CLMS : Copernicus Land Monitoring Service
- CORINE : Coordination of Information on the Environment
  - DEM : Digital Elevation Model
  - EPM : Erosion Potential Method
- ESDAC : European Soil Data Centre
  - ESRI : Environmental Systems Research Institute
  - EU : European Union
- GAEC : Good Agricultural Environmental Condition
  - GIS : Geographical Information System
- HEC : Hydrologic Engineering Center
- LUCAS : Land Use/ Cover Area Survey
  - MFI : Modified Fournier Index
- MQCE : Method for Quantitative Classification of Erosion
- MUSLE : Modified Universal Soil Loss Equation
  - NOA : National Observatory of Athens
- NRCS : Natural Resources Conservation Service
- NTUA : National Technical University of Athens
- REDES : Rainfall Erosivity Database
- RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation
  - SCS : Soil Conservation Service
  - SDR : Sediment Delivery Ratio
  - SI : Système International
- USACE : United States Army Corps of Engineers
- USDA : United States Department of Agriculture
- USLE : Universal Soil Loss Equation



## Ευρετήριο Ελληνικών Ακρωνύμιων / Greek Acronyms

- ΑΠΕΕΑ : Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Διάβρωσης  
ΓΥΕ : Γεωλογική Υπηρεσία  
ΔΕΗ : Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού  
ΕΑΑ : Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών  
ΕΑΓΜΕ : Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών  
ΕΓΣΑ : Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς  
ΕΕ : Ευρωπαϊκή Ένωση  
ΕΜΥ : Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία  
ΗΠΑ : Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής  
ΙΓΕΥ : Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους  
ΙΓΜΕ : Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών  
ΚΥΑ : Κοινή Υπουργική Απόφαση  
ΠΕΕΑ : Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Διάβρωσης  
ΣΓΠ : Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών  
ΥΠΔΕ : Υπουργείο Δημοσίων Έργων  
ΥΠΑΝ : Υπουργείο Ανάπτυξης & Επενδύσεων  
ΥΠΕΚΑ/  
ΥΠΕΝ : Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας  
ΥΠΕΧΩΔΕ : Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημόσιων Έργων  
ΨΜΕ : Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους





## Abstract

This paper studies the subject of soil transportation by water, as a whole. The study area of the paper is a subdivision of the Sperchios River Basin defined by the outlet at the road bridge south-west of Leianokladi village. Firstly, the cause of the erosion is to be examined by studying the effects of a flood with a return period of 100 years. To do this, the IDF curves are used, which are then areally distributed before creating the hyetograph based on the alternating block method. The hyetograph is then converted into the flood hydrograph of the flood via HEC-HMS software, which is then used in HEC-RAS software in order to simulate the areal expansion of the flood wave. Finally, the mean annual soil erosion is estimated using the American Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), the European Erosion Potential Method (EPM) and the Koutsoyiannis-Tarla Equation specifically created for greek soils, and the sediment yield, at the outlet of the study area, based on different equations found in the international bibliography.



## Extended Summary

### Introduction

Soil erosion and sediment yield are topics that are studied all over the world due to them being highly dependent on the geographic location of the area studied. Their correct estimations are of great value since they affect not only the geomorphology of the general area (Stathopoulos N., Lykoudi E., Vasileiou E., Rozos D., & Dimitrakopoulos D., 2017), but also the proper function of some of the infrastructure of a country such as a hydro-electric power plant (Bureau of Reclamation, 1987).

This paper is constructed in such a way in order to be perceived as a complete approach of the topic of soil erosion. For that, a hydrologic and hydraulic analysis are conducted, and then the sediment yield is calculated using three different methods. To do so, the following methodology is followed:

- Usage of the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for the selected rain gauges of the area, spatial interpolation via the Thiessen Polygons method, creation of the hyetograph using the alternating block method, and, finally, estimation of the precipitation runoff based on the Natural Resources Conservation Service (NRCS) method.
- Hydrologic analysis of the study area, via *HEC-HMS* software, making use of the hyetograph produced and appropriate curve numbers (CN) for the area studied, in order to produce the flood hydrograph.
- Hydraulic (2D) analysis of Sperchios River, downstream of the area studied, via *HEC-RAS* software, using the Digital Elevation Model (DEM) of the Sperchios River Basin and the flow hydrograph produced.
- Estimation of soil erosion and sediment yield using *ArcMap* software for its convenient spatial analysis capabilities.
- Sensitivity analysis of the models used to estimate soil erosion

### Materials and Methods

- Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves

According to Koutsoyiannis D., Kozonis D. & Manetas A. (1998), IDF curves are a mathematical relationship among the rainfall intensity  $i$ , the duration  $d$ , and the return period  $T$  (or, equivalently, the annual frequency of exceedance, typically referred to as “frequency” only). When the return period is over 50 years, then IDF curves are very well approximated by

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

where  $i$  the average rainfall intensity [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ],  $d$  the duration of the event [h],  $T$  the return period [y],  $\theta > 0$ ,  $0 < \eta < 1$  parameters to be estimated, and  $\lambda' = \lambda/\kappa$ ,



$\psi' = \kappa \cdot \psi - 1$ , where  $\kappa > 0$ ,  $\lambda > 0$  and  $\psi$  are shape, scale and location parameters respectively.

It is common practice to use a multiple of the time of concentration of the catchment as the rainfall duration of the event studied. Time of concentration of a catchment, based on Giandotti M. (1934), can be estimated by

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{\Delta z}} \quad (2)$$

where  $t_c$  the time of concentration [h],  $A$  the watershed area [km<sup>2</sup>],  $L$  the length of the main channel [km] and  $\Delta z$  the difference between the mean basin elevation and the outlet elevation [m].

Then, according to Mockus V. (1957), the lag time of the catchment is given by

$$t_L = 0.6 \cdot t_c \quad (3)$$

Based on the studies conducted by the Ministry of Environment and Energy, also known as YPEN, former YPEKA ([floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)), the IDF curves' parameters for the selected rain gauges, or stations, are shown in table 1.

Table 1: IDF curve's parameters for rain gauges located in WD Eastern Central Greece

Rain Gauge	$\theta$	$\eta$	$\kappa$	$\lambda'$	$\psi'$
ATH. DIAKOS	0.33	0.627	0.04	511.5	0.91
GRAMMENI OXIA	0.33	0.627	0.12	92.3	0.57
KRIKELLO	0.33	0.627	0.12	104.1	0.56
PYRA	0.33	0.627	0.12	141.8	0.71
NEOCHORI	0.12	0.622	0.13	146.2	0.4
PITSIOTA	0.12	0.622	0.13	103.2	0.37
TYMFRISTOS	0.12	0.622	0.07	264.3	0.76
TRILOFO	0.12	0.622	0.13	148.9	0.69
ANO YPATI	0.12	0.622	0.07	351.7	0.85
ZILEFTO	0.12	0.622	0.07	261.7	0.84
MAKRYRAXI	0.04	0.639	0.09	434.5	0.74
RENTINA	0.04	0.639	0.09	440.8	0.69
Mean Value	0.180	0.627	0.098	250.1	0.674

- Spatial Interpolation

An IDF curve represent the rainfall intensity measured by a rain gauge (point measurement). A catchment in Greece will always contain more than one rain gauges, hence it is necessary to designate a portion of the total catchment's area to each rain gauge. This is achieved by creating Thiessen Polygons for the selected rain gauges, as proposed by Alfred H. Thiessen in 1911. According



to this method, the rainfall of a catchment with multiple rain gauges can be estimated by

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i \cdot h_i \quad (4)$$

$$w_i = \frac{S_i}{S} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k S_i = S \quad (6)$$

where  $h_s$  the rainfall in a catchment of  $S$  area,  $h_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) the rainfall produced by the IDF curve of the  $i$  station,  $w_i$  the weight of the station of  $S_i$  area.

This method can be easily implemented in GIS, especially in the *ArcMap* software with the *Create Thiessen Polygons* tool (Figure 1).

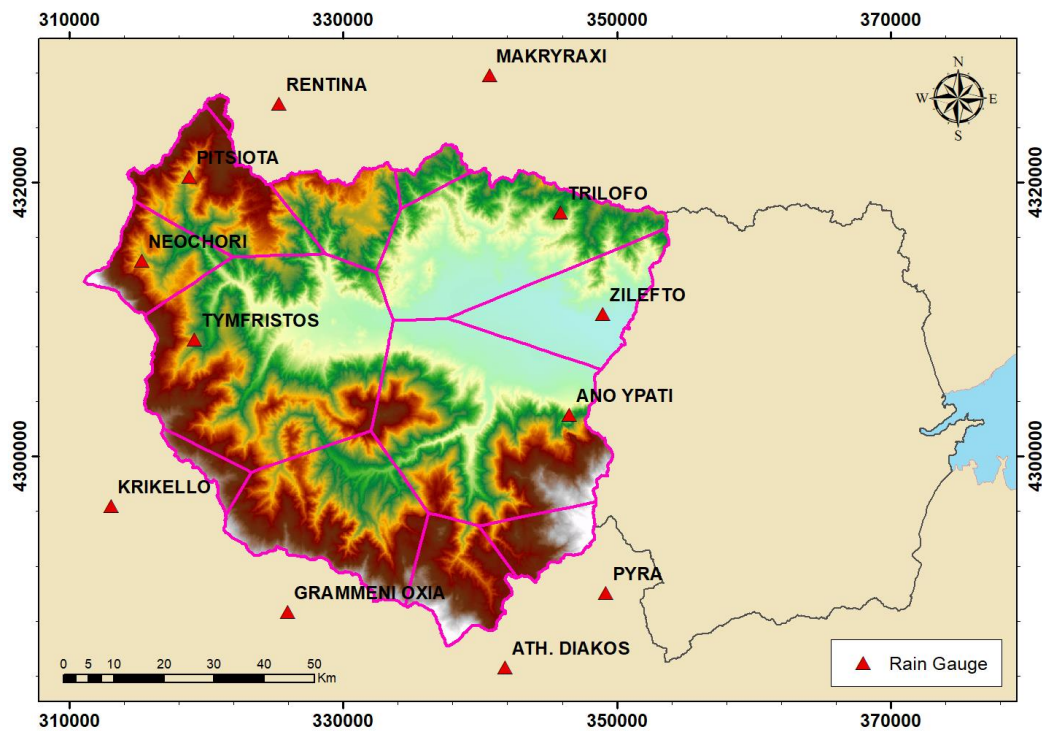


Figure 1: Thiessen polygons of the selected rain gauges / stations



- Alternating Block Method

“The alternating block method is a method to make the rainfall temporal distribution (design hyetograph) using the rainfall intensity-duration-frequency (IDF) curve. After dividing the rainfall duration  $T$  [h] by the  $\Delta t$  time-interval, the rainfall intensities for the rainfall durations  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , ... are estimated from the rainfall IDF curve. By calculating the product of the rainfall intensity and the duration (i.e. the rainfall depth) for each rainfall duration, the cumulative rainfall distribution can be derived. The rainfall intensity data can then be obtained as the difference between the successive cumulative rainfall depths. After locating the rainfall peak at the center, the next largest rainfall intensity is located alternately to the right and left of the rainfall peak in turn”. (Na W. & Yoo C., 2018)

- Curve Number Method

“Runoff or effective rainfall is that portion of the rainfall that flow overland, into channels, and past the basin outlet. The portion that does not reach the outlet is the rainfall loss. 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.” (FEMA, 2018)

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 (Table 2), and then the Ministry of Environment and Energy gave values to CORINE codes based on what type of soil they are on (Table 3), known as Curve Number (CN). Then the CN value of the catchment is given by

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{A} \cdot CN_i \right) \quad (7)$$

where  $CN_{II}$  the catchment's curve number under normal circumstances,  $A_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) the area of the subsurface  $i$  with a curve number of  $CN_i$ , and  $A$  the catchment's area.

However, studying a flood event requires to account for extreme conditions too. This can be achieved by accounting for dry and wet conditions, which are respectively calculated by

$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}} \quad (8)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}} \quad (9)$$





Then the runoff is calculated as follows

$$h_e = 0, \quad h \leq h_{a0} \quad (10)$$

$$h_e = \frac{(h - 0.2 \cdot S)^2}{h + 0.8 \cdot S}, \quad h > h_{a0} \quad (11)$$

where  $h_e$  the depth of runoff [mm],  $h$  the depth of rainfall [mm].  $h_{a0}$  the initial abstraction [mm] and  $S$  the maximum potential retention [mm]. The last two parameters are thought to be equal to

$$h_{a0} = 0.2 \cdot S \quad (12)$$

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (13)$$

Table 2: Hydrologic Soil Groups by the Natural Resource Conservation Service (source: [usda.gov](http://usda.gov))

Group	Description
A	Soils with low runoff potential. Soils in this group typically have less than 10 percent clay and more than 90 percent sand or gravel and have gravel or sand textures
B	Soils with moderately low runoff potential. Soils in this group typically have between 10 percent and 20 percent clay and 50 percent to 90 percent sand and have loamy sand or sandy loam textures
C	Soils with moderately high runoff potential. Soils in this group typically have between 20 percent and 40 percent clay and less than 50 percent sand and have loam, silt loam, sandy clay loam, clay loam and silty clay loam textures
D	Soils with high runoff potential. Soils in this group typically have greater than 40 percent clay, less than 50 percent sand, and have clayey textures

Table 3: Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)) and Manning's  $n$  (source: Papaioannou G. et al., 2018) [1/2]

Code	Description	Hydrologic Soil Group				Manning $n$
		A	B	C	D	
111	Continuous urban fabric	69	80	87	90	0.013
112	Discontinuous urban fabric	66	77	83	86	0.013
121	Industrial or commercial units	85	90	93	94	0.013
122	Road and rail networks and associated land	87	92	94	95	0.013
123	Port areas	85	90	93	94	0.013



Table 4: Curve Numbers based on the Hydrologic Soil Groups and the CORINE codes (source: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)) and Manning's  $n$  (source: Papaioannou G. et al., 2018) [2/2]

Code	Description	Hydrologic Soil Group				Manning $n$
		A	B	C	D	
124	Airports	85	90	93	94	0.013
131	Mineral extraction sites	69	80	87	90	0.013
132	Dump sites					0.013
133	Construction sites	69	80	87	90	0.013
141	Green urban areas	44	65	62	82	0.025
142	Sport and leisure facilities	50	70	80	85	0.025
211	Non-irrigated arable land	67	76	83	86	0.03
212	Permanently irrigated land	67	76	83	86	0.03
213	Rice fields	59	72	81	85	0.03
221	Vineyards	63	72	79	82	0.08
222	Fruit trees and berry plantations	44	66	77	83	0.08
223	Olive groves	49	59	72	82	0.08
231	Pastures	54	70	80	85	0.35
241	Annual crops associated with permanent crops	67	76	83	86	0.04
242	Complex cultivation patterns	67	76	83	86	0.04
243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	67	76	83	86	0.05
244	Agro-forestry areas					0.06
311	Broad-leaved forest	35	61	74	80	0.1
312	Coniferous forest	35	61	74	80	0.1
313	Mixed forest	35	61	74	80	0.1
321	Natural grasslands	49	69	79	84	0.04
322	Moors and heathland	42	62	74	80	0.05
323	Sclerophyllous vegetation	42	62	74	80	0.05
324	Transitional woodland-shrub	42	62	74	80	0.06
331	Beaches, dunes, sands	42	62	74	80	0.025
332	Bare rocks	76	86	90	92	0.035
333	Sparsely vegetated areas	42	62	74	80	0.027
334	Burnt areas					0.025
335	Glaciers and perpetual snow					0.01
411	Inland marshes	95	95	95	95	0.04
412	Peat bogs					0.04
421	Salt marshes	95	95	95	95	0.04
422	Salines	95	95	95	95	0.04
423	Intertidal flats					0.04
511	Water courses	100	100	100	100	0.05
512	Water bodies	100	100	100	100	0.05
521	Coastal lagoons	100	100	100	100	0.07
522	Estuaries					0.07
523	Sea and ocean	100	100	100	100	0.07



- ArcMap (version 10.4)



*ArcMap* is the main component of the ArcGIS suite provided by the Environmental Systems Research Institute (ESRI), and is used primarily to view, edit, create and analyze geospatial data. The importance of Geographical Information Systems (GIS) is huge in multiple fields since they have improved significantly the ability to work with spatial data.

A complete Geographical Information System consists of:

- the hardware and the operating system
- the software
- the data
- the data management system
- the user

- HEC-GeoHMS (version 10.2)

The field of Hydrology has been significantly enhanced by GIS technology and the toolkits that have been created. Geospatial Hydrologic Modeling Extension by the Hydrologic Engineering Center, also known as [HEC-GeoHMS](#), is one of those toolkits. It has been developed for engineers and hydrologists with limited GIS experience, hence making it very user-friendly and easy to follow a flowchart (Figure 2). The toolkit uses *ArcGIS* and Spatial Analyst extension to develop a number of hydrologic modeling inputs for the Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System, *HEC-HMS*.

- HEC-HMS (version 4.5)



The Hydrologic Modeling System by the Hydrologic Engineering Center, also known as [HEC-HMS](#), is designed to simulate the complete hydrologic processes of dendritic watershed systems. The software includes many traditional hydrologic analysis procedures such as even infiltration, unit hydrograph, and hydrologic routing. The flowchart (Figure 3) followed in this paper is shown below.

- HEC-RAS (version 5.0.7)



The River Analysis System by the Hydrologic Engineering Center, also known as [HEC-RAS](#), is used to perform one-dimensional steady flow, one and two-dimensional unsteady flow calculations, sediment transport/mobile bed computations, and water temperature/water quality modeling. The flowchart (Figure 4) followed in this paper is shown below.

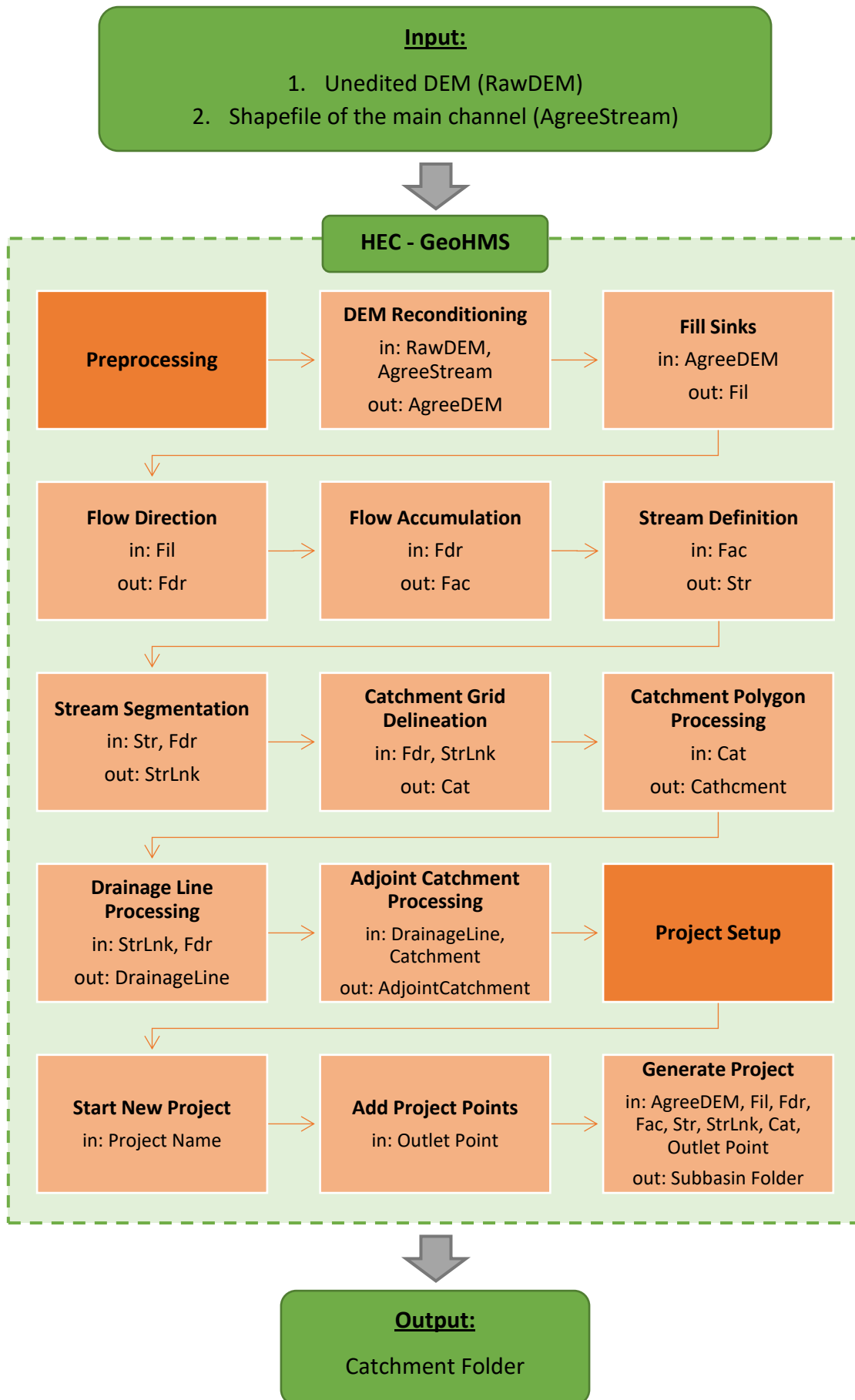


Figure 2: HEC-GeoHMS flowchart used in this paper

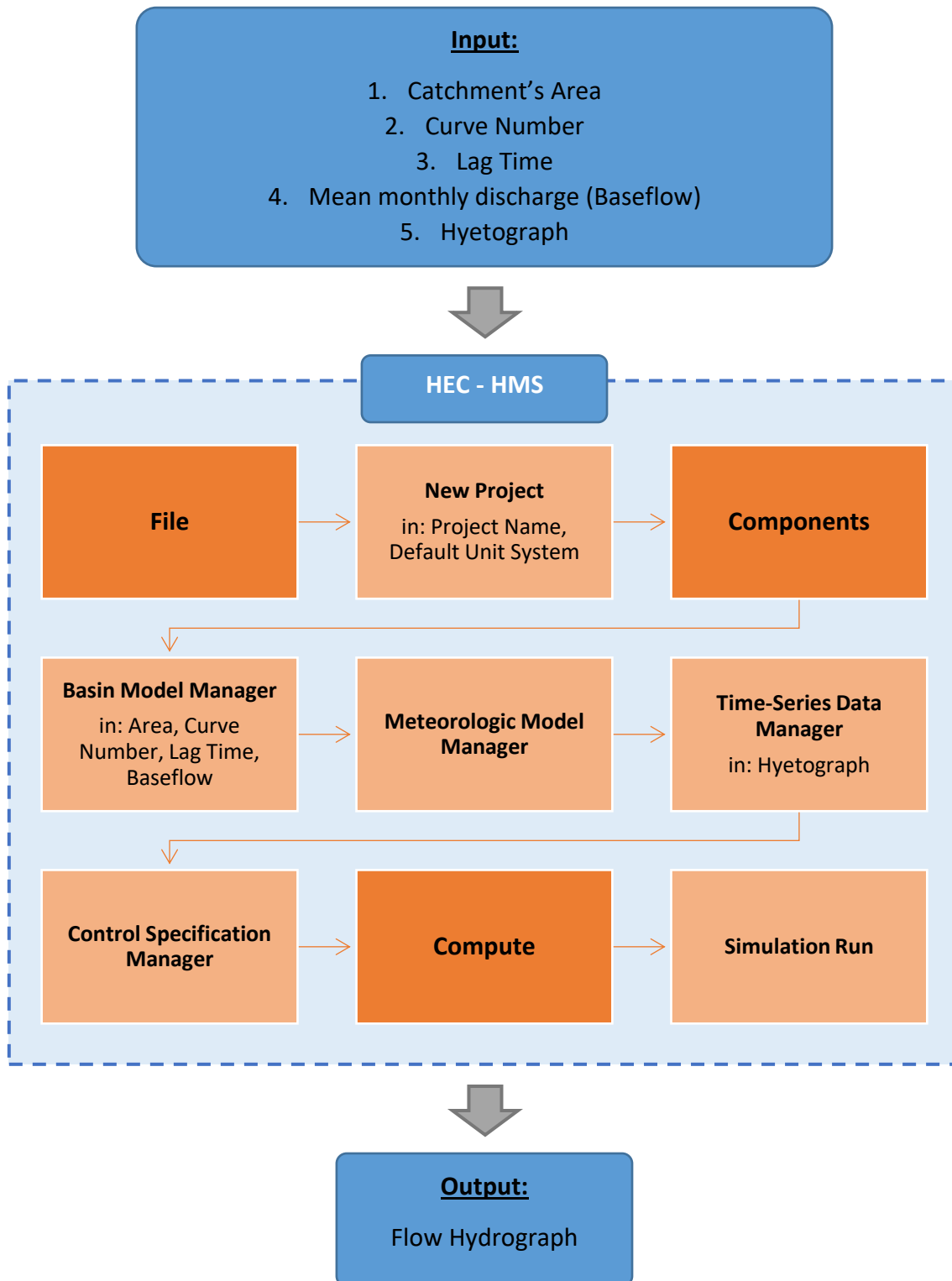


Figure 3: HEC-HMS flowchart used in this paper





Figure 4: HEC-RAS flowchart used in this paper



## ▪ Soil Erosion

“Soil erosion is a gradual process that occurs when the impact of water or wind detaches and removes soil particles, causing the soil to deteriorate.” (Al-Kaisi M., 2000)

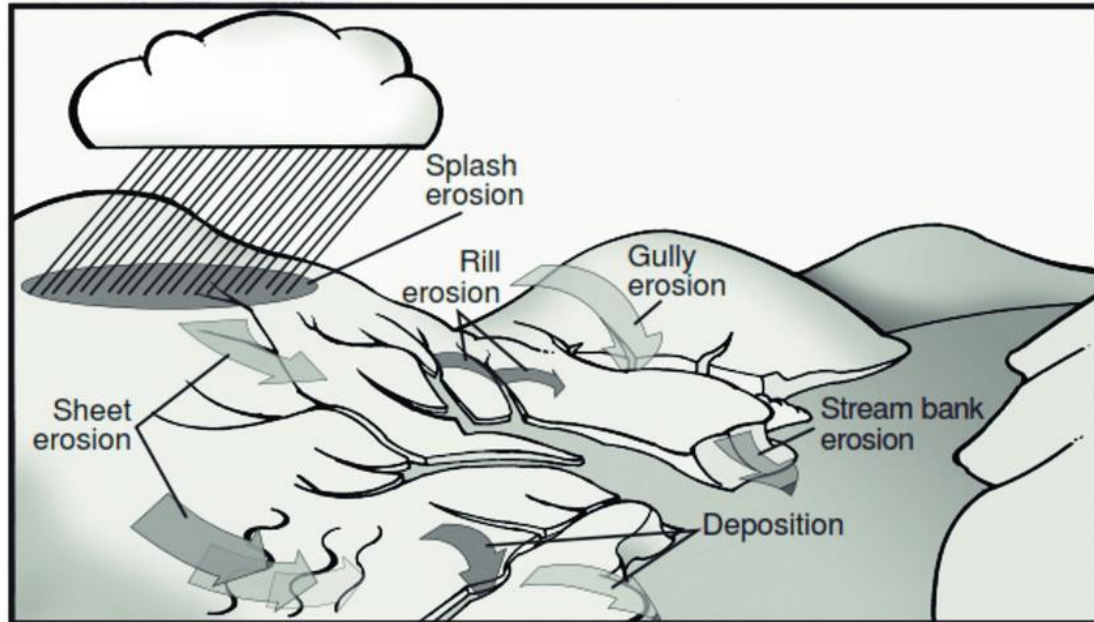


Figure 5: Soil erosion types caused by water (source: [researchgate.net](http://researchgate.net))

In this paper, for the subject of soil erosion, some important terms to keep in mind are:

- **Sediment yield,  $S_Y$** , 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. Represents the efficiency of the watershed in moving soil particles from areas of erosion to the point where sediment yield is measured” (USDA, 1998)
- **Suspended load** is the portion of the sediment that is carried by a fluid flow which settle slowly enough such that it almost never touches the bed.
- **Bed load** describes particles that are transported along the bed

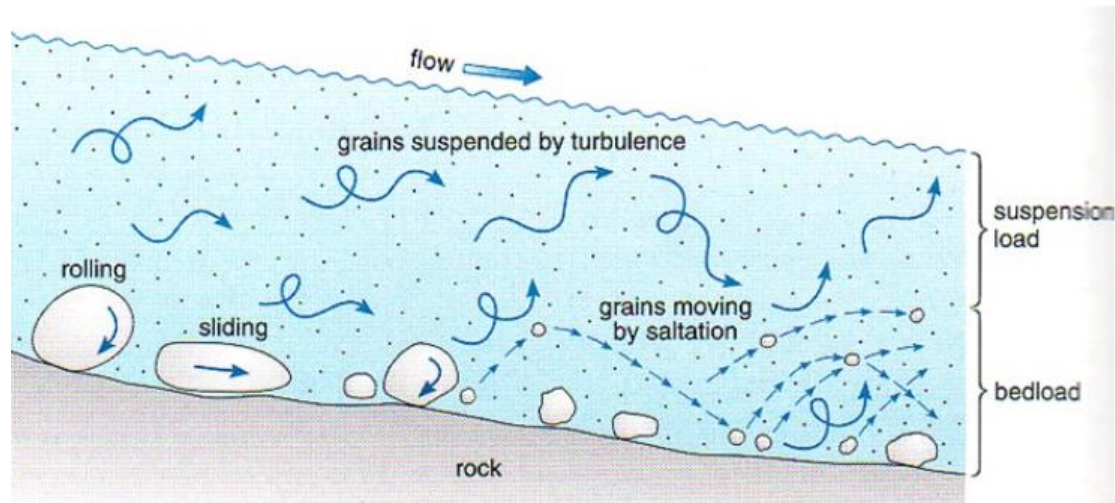


Figure 6: Sediment transportation (source: [slideplayer.com](http://slideplayer.com))

- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

One of the most used soil (gross) erosion estimation models is the RUSLE model developed by Renard K. G, Foster G. R, Weesies G. A and Porter G. P., in 1991, and then upgraded, in 1994, by Renard K. G., Foster G. R., Yoder D. C. and McCool D. K.. The model accounts for sheet and rill but not gully erosion.

The equation used in this model is the one found in the Universal Soil Loss Equation (USLE) model, developed by Wischmeier W. H. and Smith D. D. for agricultural areas of the United States of America, in 1965 and 1978. Soil loss is estimated by

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (14)$$

where **A** the mean annual soil erosion in the catchment [ $t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$ ], **R** the rainfall erosivity factor [ $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot y^{-1}$ ], **K** the soil erodibility factor [ $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ], **LS** the topographic factor, **C** the cover and management factor and **P** the erosion control practice factor.

Over the years, there have been many equations and value tables developed for the calculation of each factor. For the purposes of this paper, the factors were calculated via the following:

- Rainfall Erosivity Factor, R**

Rainfall erosivity was calculated using the equation that Van der Knijff J. M., Jones R. J. A. and Montanarella L. came up with, in 2000:

$$R = a \cdot P \quad (15)$$



where **R** the rainfall erosivity factor [ $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ], **P** the mean annual precipitation [mm] and  **$\alpha$**  appropriate coefficient [ $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ].

Flampouris K., in 2008, investigated the values of  $\alpha$  coefficient in Greece, using measurements from gauging stations, and came up with 1<sup>st</sup> degree polynomial expressions between the rainfall erosivity factor R(P) and the mean annual precipitation P of the location. For the study area of this paper the polynomial expression was used since it provided results with better correlation between the results and the measurements.

- **Soil Erodibility Factor, K**

The soil erodibility factor was calculated by using typical values (Table 5) for the geology found in the studied area, as shown in page 119.

Table 5: Soil erodibility factor, K, for the geology of the studied area (source: Sigalos G. et al., 2010)

Geological Formation	Soil Erodibility Factor, K
Ophiolites	0.0005
Limestones / dolomites	0.00055~0.00085
Conglomerates	0.003
Alluvia	0.0035
Sandstone	0.015
Flysh	0.02~0.03
Schist	0.025
Breccia	0.045

- **Topographic Factor, LS**

Based on the Agriculture Handbook 537 (1978), the topographic factor is to be calculated by the Wischmeier W. H. and Smith D. D. equation:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2(\beta) + 4.56 \cdot \sin(\beta) + 0.065) \quad (16)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{S}{100}\right) \quad (17)$$

where **LS** the topographic factor,  **$\lambda$**  the slope length [m],  **$\beta$**  the slope angle [°], **S** the slope [%] and **m** an appropriate coefficient with values 0.2 for  $S \leq 1\%$ , 0.3 for  $1\% < S \leq 3\%$ , 0.4 for  $3\% < S \leq 5\%$  and 0.5 for  $S > 5\%$ .

Instead of slope length,  $\lambda$ , the upslope contributing area,  $A_s$ , was used which is considered to be equivalent to the former, and can be calculated in *ArcMap* by multiplying the result of *Flow Accumulation* tool with the map's cell size.



- **Cover and Management Factor, C**

Similar to the soil erodibility factor, typical values (ranging from 0 to 1) for the cover management factor were given based on the CORINE codes, that can be reviewed on page 131.

- **Erosion Control Practice Factor, P**

Due to such information being extremely scarce in most occasions, it is common practice to consider this factor (ranging from 0 to 1) to be equal to 1 as if there are no erosion control practices taking place at all.

The European Commission, through the European Soil Data Centre ([ESDAC](#)) of the Joint Research Centre, offers GIS maps of the RUSLE model implementation its researchers did for the area of the European Union.

In order to calculate the sediment yield at the outlet of the studied area, the **Sediment Delivery Ratio (SDR)** needs to be calculated as it is defined as

$$SDR = \frac{S_Y}{A_S} \quad (18)$$

where **SDR** the sediment delivery ratio, **S<sub>Y</sub>** the sediment yield and **A<sub>S</sub>** the gross erosion of the studied area.

According to Vanoni's V. A. work, in 1975, studying 300 catchments worldwide, concluded that the sediment delivery ratio can be estimated by the equation

$$SDR = 0.42 \cdot A^{-0.125} \quad (19)$$

where **SDR** the sediment delivery ratio and **A** the catchment's area [mi<sup>2</sup>].

- Gavrilovic Method / Erosion Potential Method (EPM)

Based on the soil erosion measurements, since 1947, by the Jaroslav Černi Institute and the Method for the Quantitative Classification of Erosion (MQCE), Gavrilović S. (1962,1970,1972) developed what is now known as Gavrilovic Method or Erosion Potential Method (EPM):

$$w = \pi \cdot T \cdot P \cdot \sqrt{Z^3} \quad (20)$$

where **w** the mean annual soil erosion in the catchment [m<sup>3</sup>·(km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>·y<sup>-1</sup>], **T** the temperature coefficient, **P** the mean annual precipitation [mm] and **Z** the erosion



coefficient. For the calculation of soil erosion in mass units, an average density of 2.67 t/m<sup>3</sup> for Greek soils was used.

The temperature coefficient is given by

$$T = \sqrt{\left(0.1 + \frac{T_o}{10}\right)} \quad (21)$$

where  $T_o$  the mean annual temperature of the studied area [°C].

The erosion coefficient is given by

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + \sqrt{J}) \quad (22)$$

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),  $\varphi$  the erosion and stream network development coefficient (ranging from 0 to 1) and  $J$  the average slope of the studied area [%].

Respectively to the soil erodibility factor  $K$  and cover and management factor  $C$  of the RUSLE model,  $X$ ,  $Y$  and  $\varphi$  coefficients, for the studied area, are given typical values taken from the following tables.

Table 6: Soil protection coefficient,  $X$ , based on the anti-erosion works and measures (source: Kojchevska T. 2014)

α/α	Κατάσταση Λεκάνης και Είδος Φυτοκάλυψης	X
<b>RIVER BASIN BEFORE UNDERTAKING ANTI-EROSION WORKS AND MEASURES</b>		
1	Completely bare, untilled land	1.00
2	Orchard land tilled by plowing through	0.90
3	Fruit and vineyards without ground vegetation	0.70
4	Degraded forest eroded land	0.60
5	Meadow areas under clover and similar perennial crops	0.40
6	Forests with good structure and growth	0.05
<b>RIVER BASIN AFTER UNDERTAKING ANTI-EROSION MEASURES</b>		
1	Maintenance of the river bed with technical facilities	0.70
2	Orchard, tilled by contour treatment processing (contour plowing)	0.63
3	Plow land protected with good care and protected with mulch	0.54
4	Contour processing in strips and crop rotation (plowed land)	0.45
5	Terraced land, terraces and cordons	0.36
6	Fruit and vineyards with contour treatment processing	0.32
7	Grass lands on barren pastures and reclamation	0.30
8	Maintained waterways and micro-accumulations	0.27
9	Afforestation in contour trenches and contour furrows	0.10



Table 7: Soil protection coefficient,  $X$ , based on the vegetal cover type (source: Efthimiou N. et al., 2016)

α/α	Κατάσταση Λεκάνης και Είδος Φυτοκάλυψης	$X$
VEGETAL COVER TYPE		
1	Mixed and dense forest or thin forest with grove	0.05-0.20
2	Coniferous forest with little grove, scarce bushes, bushy prairie	0.20-0.40
3	Damaged forest and bushes, pasture	0.40-0.60
4	Damaged pasture and cultivated land	0.60-0.80
5	Areas without vegetal cover	0.80-1.00

Table 8: Soil erodibility coefficient,  $Y$ , based on soil type and landform (source: Efthimiou N. et al., 2016)

α/α	Soil type and landform	$Y$
1	Hard rock, erosion resistant	0.20-0.60
2	Rock with moderate erosion resistance	0.60-1.00
3	Weak rock, schistose, stabilized	1.00-1.30
4	Sediments, moraines, clay and other rock with little resistance	1.30-1.80
5	Fine sediments and soils without erosion resistance	1.80-2.00

Table 9: Existing erosion coefficient,  $\varphi$ , based on the type and the extent of the existing erosion of the area (source: Efthimiou N. et al., 2016)

α/α	Type and extent of erosion	$\varphi$
1	Little erosion on watershed	0.10-0.20
2	Erosion in waterways on 20%-50% of the catchment area	0.30-0.50
3	Erosion in river, gullies and alluvial deposits, karstic erosion	0.60-0.70
4	50%-80% of catchment area affected by surface erosion and landslides	0.80-0.90
5	Whole watershed affected by erosion	0.90-1.00

Erosion and stream network development coefficient,  $\varphi$ , is supposed to take values from field measurements. However, such measurements were not available, so for the purposes of this paper the coefficient was estimated by

$$\varphi = 0.7 \cdot X + 0.3 \cdot Y \quad (23)$$

This equation when applied to a GIS map, it leads to values above 1, hence it should be divided by the maximum value of the results for it to have values between 0 and 1.

Classification of erosion is possible, in the cartographic sense, only in the form of qualitative categories, as shown in table 10.





Table 10: Qualitative erosion categories (source: Gavrilovic Z. et al., 2004)

Erosion Category	Qualitative Name of Erosion Category	Z
I	Excessive erosion – deep erosion process (gullies, rills, rockslides and similar)	>1.00
II	Heavy erosion – milder forms of excessive erosion	0.71-1.00
III	Medium erosion	0.41-0.70
IV	Slight erosion	0.20-0.40
V	Very slight erosion	<0.19

Respectively to the Sediment Delivery Ratio (SDR) for the RUSLE model, in order to calculate the sediment yield at the outlet of the studied, the **Retention Coefficient (R)** is used in EPM model. Zemljic M., in 1971, proposed an updated version of the equation originally proposed in EPM model, that calculates the coefficient as

$$R_{Zemljic} = \frac{\sqrt{O \cdot D}}{(L + 10)} \cdot \frac{(L + L_i)}{F} \quad (24)$$

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], **L<sub>i</sub>** the length of the secondary tributaries and **F** the catchment's area [km<sup>2</sup>].

- Koutsoyiannis-Tarla Equation

The Koutsoyiannis and Tarla model was developed, in 1987, based on field data from 7 gauging stations located in Northwestern Greece. After investigating the impact of “the climatic (temperature), hydrological (precipitation, discharge), topographic (river mean slope, catchment area etc.) and geological (bedrock erodibility) attributes on sediment discharge, the researchers concluded that the discharge is strongly affected only by their hydrological and geological components” (Efthimiou N., Lykoudi E. E., & Karavitis C. A., 2017).

Considering this, the geological coefficient,  $\gamma$ , was introduced, defined by the erodibility of every different soil type included. Subsequently, soil types were grouped into categories shown below.

Table 11: Soil erodibility coefficient based on geological formation

Erodibility	Geological Formation	K
High	Alluvial deposits, Flysch	K <sub>1</sub> = 1.0
Medium	Marls, Sandstones, Schists	K <sub>2</sub> = 0.5
Low	Limestones, Dolomites, Metamorphic, Igneous	K <sub>3</sub> = 0.1



The final form of the equation is

$$G = 15 \cdot \gamma \cdot e^{3 \cdot P} \quad (25)$$

$$\gamma = K_1 \cdot p_1 + K_2 \cdot p_2 + K_3 \cdot p_3 \quad (26)$$

where **G** the mean annual (suspended) sediment discharge [ $t \cdot (km^2)^{-1}$ ], **P** the mean annual precipitation [m], **γ** the geological coefficient, **K<sub>1</sub>**, **K<sub>2</sub>**, **K<sub>3</sub>** empirical coefficients for the high, medium and low susceptibility classes and **p<sub>1</sub>**, **p<sub>2</sub>**, **p<sub>3</sub>** the corresponding soil type occurrence proportions [%].

## Study Area

The study area consists of the subbasin ( $1003km^2$ ) of Sperchios River basin ( $2318km^2$ ) defined by the downstream point of Leianokladi Bridge. This is considered a point of interest due to the river's free surface flooding the bridge hence the use of the bridge comes to a halt.

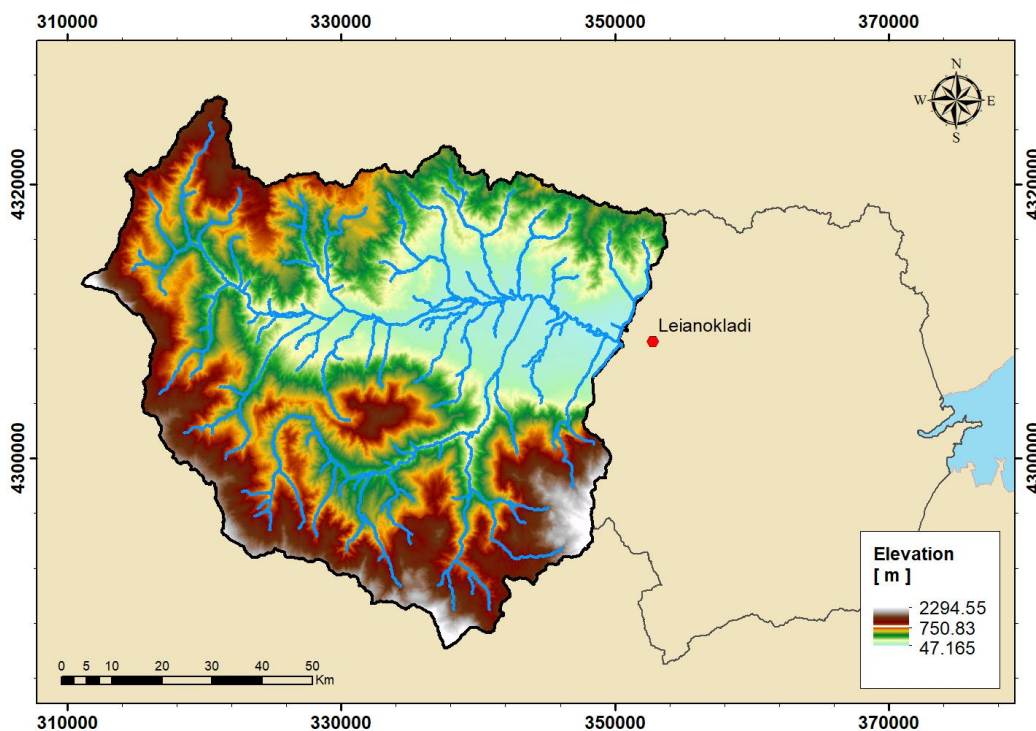


Figure 7: Digital Elevation Model of the studied area

Sperchios River has a length of 82km and is located in the water district of Eastern Central Greece (WD07). The river is surrounded by Tymfristos Mountain (2316m) from West, the mountains Vardousia (2437m), Oiti (2152m) and Kalidromo (1372m) from South, and Orthris Mountain (1727m) from North.



The runoff of Sperchios River ends up in Maliakos Gulf, the coastline of which is the eastern limit of Sperchios basin.

- Precipitation

Based on the rain gauges used in a project ran by the Ministry for the Environment Physical Planning and Public Works in collaboration with the National Technical University of Athens, in 1992, and the Hellenic National Meteorological Service ([www.hnms.gr](http://www.hnms.gr)), a trendline ( $R^2 \approx 0.71$ ) between the elevation and the mean annual precipitation was extracted:

$$P = 0.8136 \cdot z + 529.66 \quad (27)$$

where  $P$  the mean annual precipitation [mm] at the elevation  $z$  [m].

Table 12: Rain gauges used in catchment's precipitation estimation

$\alpha/\alpha$	Rain Gauge	Longitude	Latitude	Elevation [ m ]	Mean Annual Precipitation [ mm ]
1	ATH. DIAKOS	22° 11'	38° 42'	1050	1431.2
2	GRAMMENI OXIA	22° 00'	38° 44'	1160	1324
3	KRIKELLO	21° 51'	38° 48'	1120	1367.9
4	PYRA	21° 16'	38° 30'	1140	1379.4
5	LAMIA	22° 24'	38° 54'	12	573.8
6	ZILEFTO	22° 16'	38° 56'	120	521.7
7	NEOCHORI	21° 52'	38° 58'	800	1710.6
8	PITSIOTA	21° 54'	39° 01'	800	1264
9	TRILOFO	22° 13'	39° 00'	580	655.2
10	YPATI	22° 14'	38° 52'	286	819.1

- Climatic Data

Temperature measurements are scarce in Greece. However, using the meteorologic stations of the National Observatory of Athens (NOA) located in Central Greece a trendline ( $R^2 \approx 0.83$ ) between the elevation and the mean annual temperature was extracted:

$$T_o = -0.0068 \cdot z + 17.989 \quad (28)$$

where  $T_o$  the mean annual temperature [°C] at the elevation  $z$  [m].



Table 13: Meteorologic stations of NOA used in catchment's temperature estimation

α/α	Meteorologic Station	Longitude	Latitude	Elevation	Mean Annual Temperature
				[ m ]	[ °C ]
1	LAMIA	22° 26'	38° 54'	107	18.8
2	MAKRAKOMI	22° 07'	38° 56'	236	16.3
3	KARPENISI - CITY	21° 47'	38° 54'	998	11.9
4	KARPENISI - VOUTYRO	21° 45'	38° 52'	700	11.2
5	KARPENISI - MIRIKI	21° 49'	38° 53'	1045	11.5

#### ▪ Geological Data

The geomorphology of Greece is extremely complex as shown in the sheets of Geological Map of Greece constructed by the Institute for Geology and Subsurface Research. The sheets, that refer to the catchment studied in this paper, are digitized (Figure 8) and then the soils are assigned to a hydrologic group (Figure 9) as they were defined by Natural Resource Conservation Service (Table 2).

Table 14: Geology types in the study area

α/α	Geology Type	Area	
		[ km <sup>2</sup> ]	[ % ]
1	Average-bedded limestones	0.43	0.04
2	Marly formations	128.27	12.75
3	East Pindos flysch	542.64	53.94
4	Schist	12.34	1.23
5	Limestones	21.36	2.12
6	Transgressive formations	2.00	0.20
7	Olistholites	4.11	0.41
8	Deposits (fluvial, alluvial, valley, terrace etc.)	204.52	20.33
9	Radiolarites	1.93	0.19
10	Shale-Chert formations	4.63	0.46
11	Igneous rocks (be eryption)	69.98	6.96
12	Igneous rocks	13.75	1.37
<b>Sum</b>		1003.06	100.0

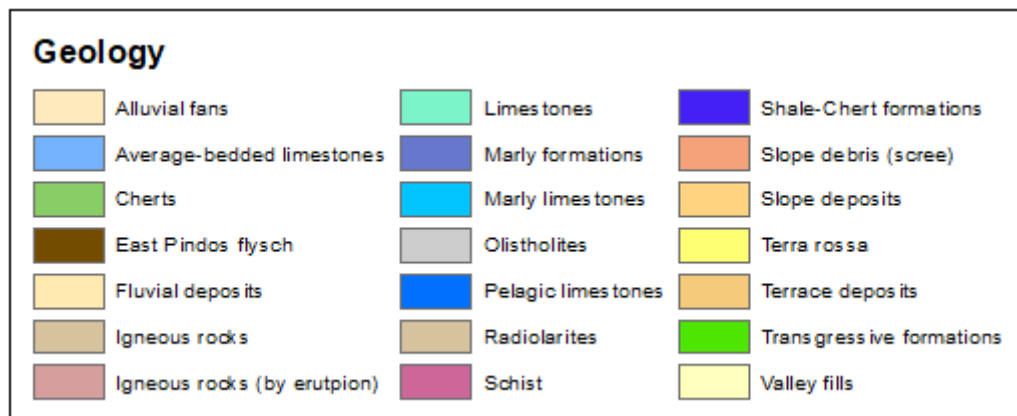
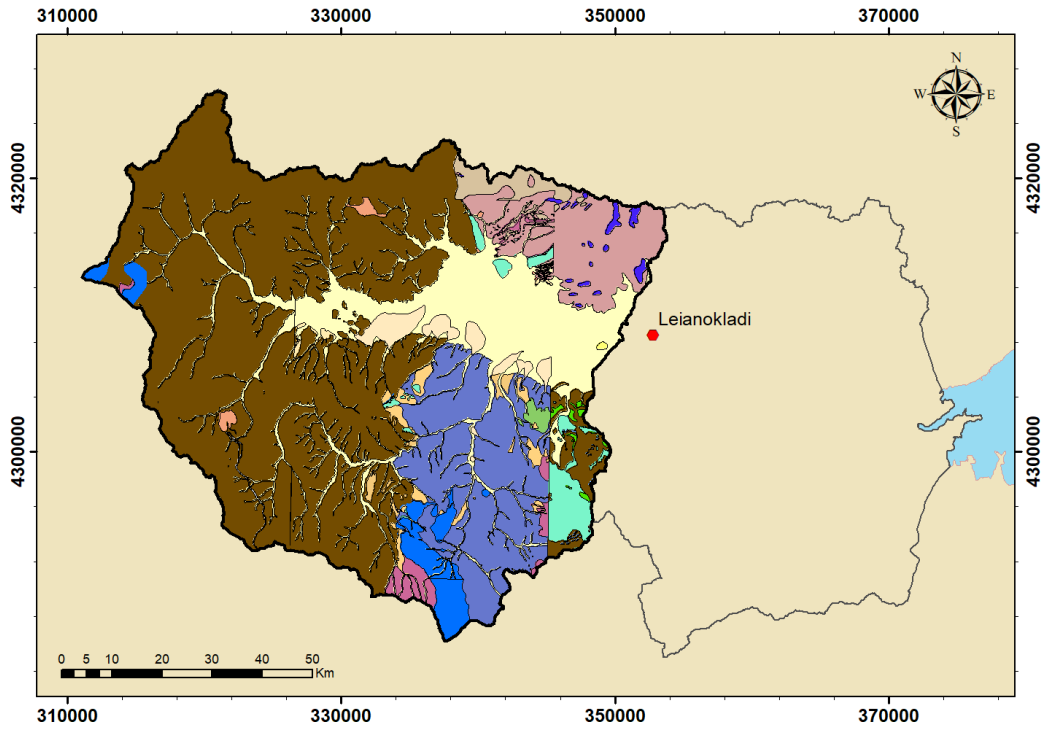


Figure 8: Geology map of the studied area

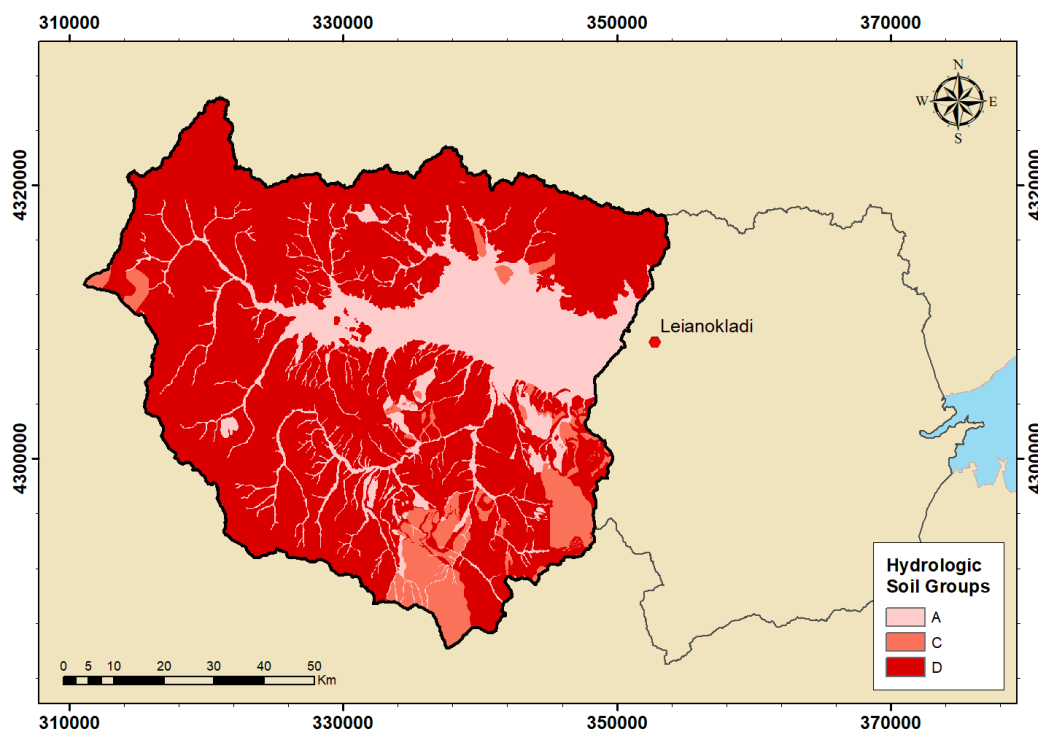


Figure 9: Hydrologic soil groups of the studied area

#### ▪ Land Use Data

Using the products of the European program Copernicus Land Monitoring Service ([land.copernicus.eu](http://land.copernicus.eu)), the land use in the studied area, respectively to the 2018 version of the CORINE Land Cover inventory, is shown below.

Table 15: Land use of the studied area [1/2]

α/α	Code	Description	Area	
			[ km <sup>2</sup> ]	[ % ]
1	112	Discontinuous urban fabric	12.11	1.21
2	133	Construction sites	0.51	0.05
3	142	Sport and leisure facilities	0.25	0.02
4	211	Non-irrigated arable land	50.44	5.03
5	212	Permanently irrigated land	37.11	3.70
6	222	Fruit trees and berry plantations	2.80	0.28
7	223	Olive groves	3.20	0.32
8	231	Pastures	1.78	0.18
9	242	Complex cultivation patterns	43.95	4.38
10	243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	107.52	10.72
11	311	Broad-leaved forest	159.23	15.88
12	312	Coniferous forest	111.68	11.14



Table 16: Land use of the studied area [2/2]

13	313	Mixed forest	146.08	14.57
14	321	Natural grassland	26.65	2.66
15	322	Moors and healthland	47.98	4.78
16	323	Sclerophyllous vegetation	105.31	10.50
17	324	Transitional woodland / shrub	136.16	13.58
18	331	Beaches, dunes, sands	8.32	0.83
19	333	Sparsely vegetated areas	1.87	0.19
<b>Sum</b>			1003.06	100.0

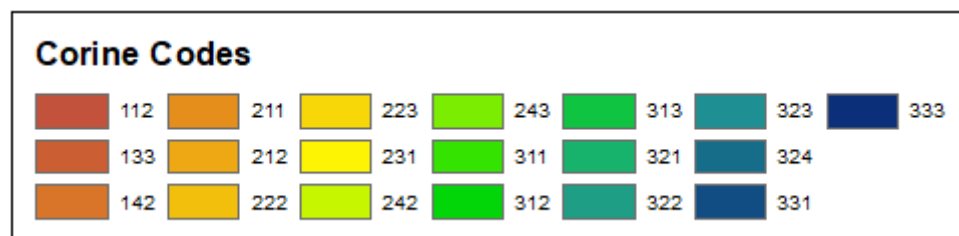
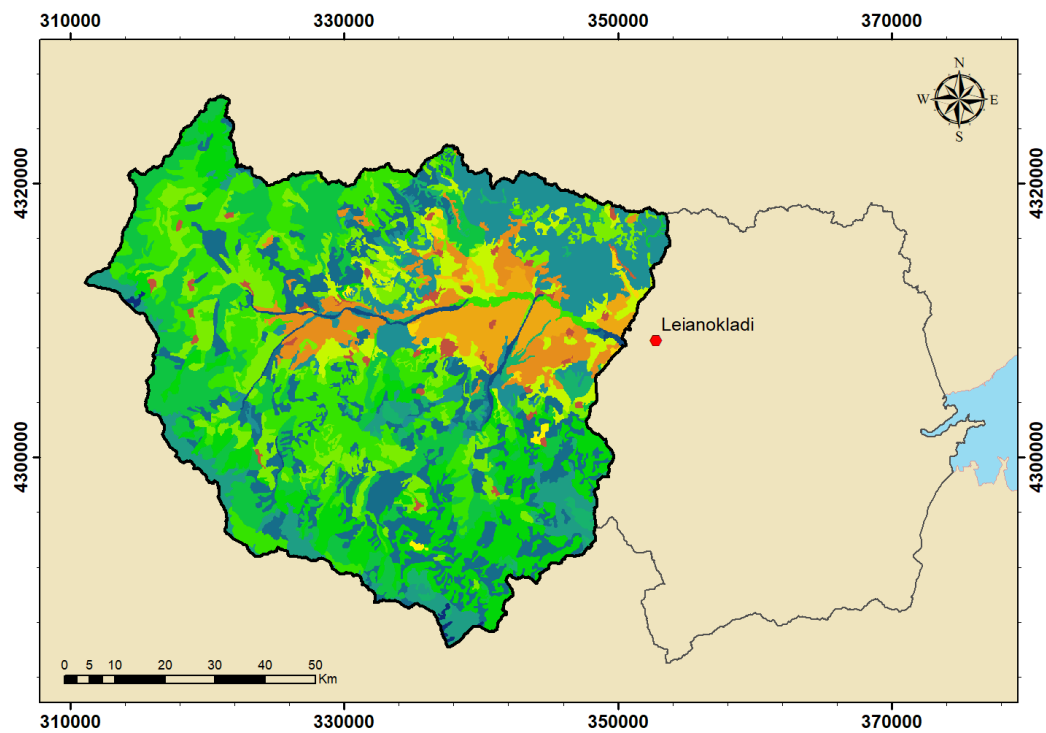


Figure 10: Land use map of the studied area





## Results

### Hyetograph

Following the steps of the previous chapters, for a rainfall event of 24 hours (almost 2.5 times the catchment's concentration time), the hyetograph, produced by the Alternating Block Method, and the respective S-Curve are:

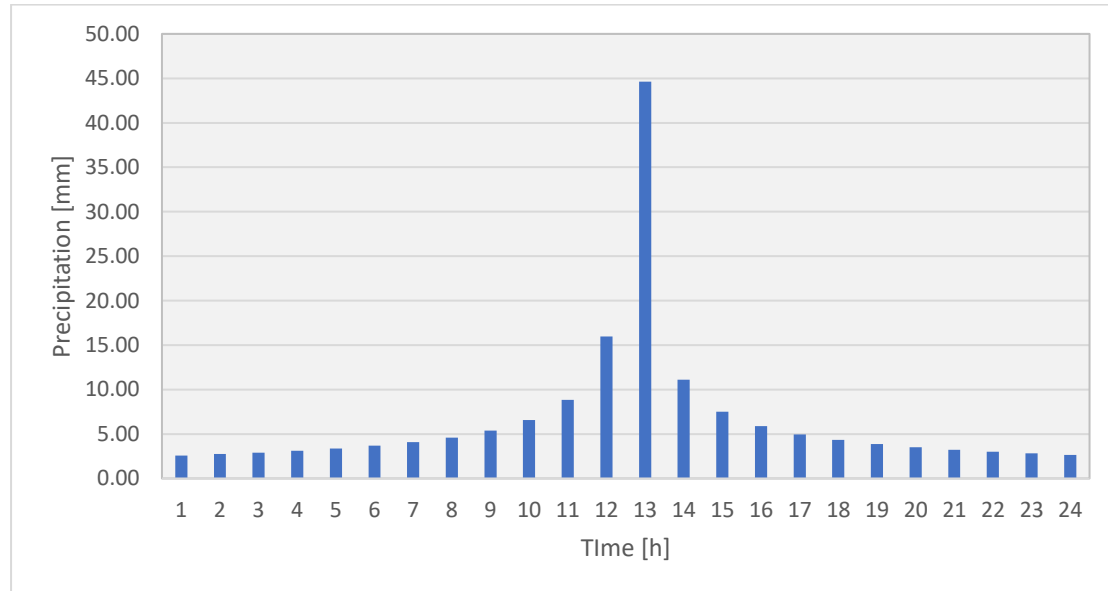


Figure 11: Hyetograph for rainfall with a return period of 100 years

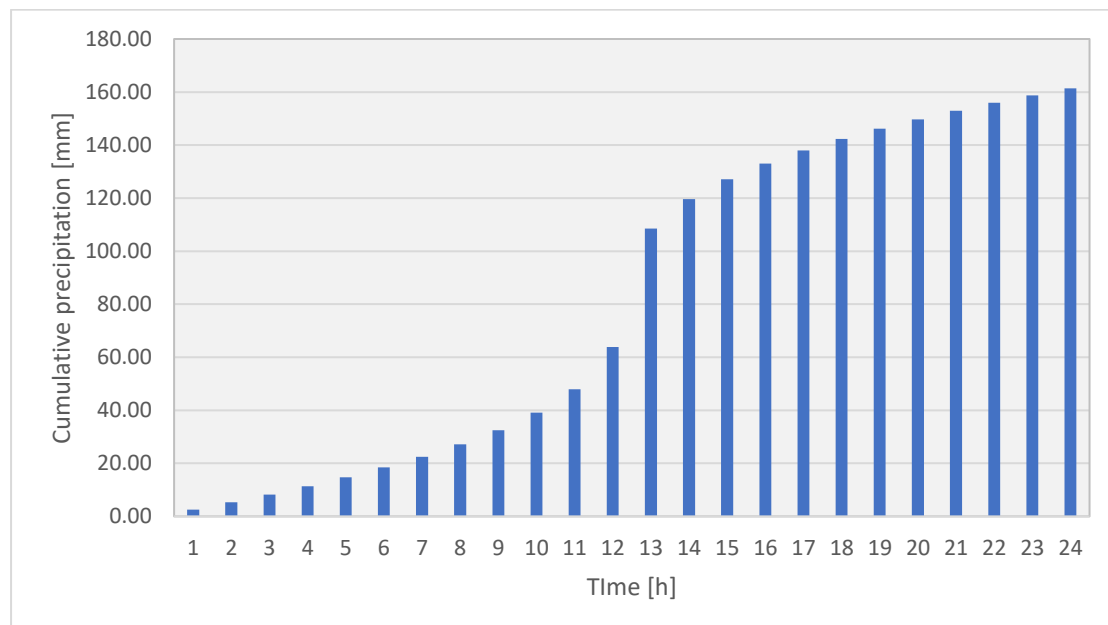


Figure 12: Cumulative hyetograph (S-Curve) for rainfall with a return period of 100 years



Using the Natural Resources Conservation Service (NRCS) method, formerly known as Soil Conservation Service (SCS) method, the Curve Numbers estimated for the studied area are shown in table 17.

Table 17: Curve numbers, CN for the studied area

Soil Conditions	Dry	Normal	Wet
CN	53.3049	73.1037	86.2095

▪ Flow Hydrograph

Following the flow diagram for HEC-HMS software (Figure 3), the hyetograph above (Figure 11) was transmuted into the following flow hydrographs, based on the soil conditions above (Table 17).

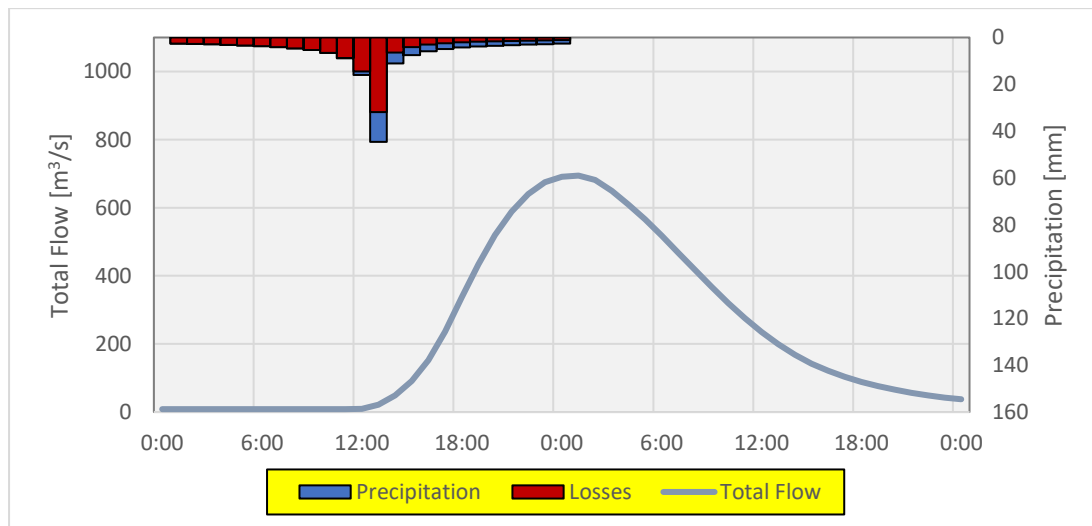


Figure 13: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for dry soil conditions, CN<sub>I</sub>

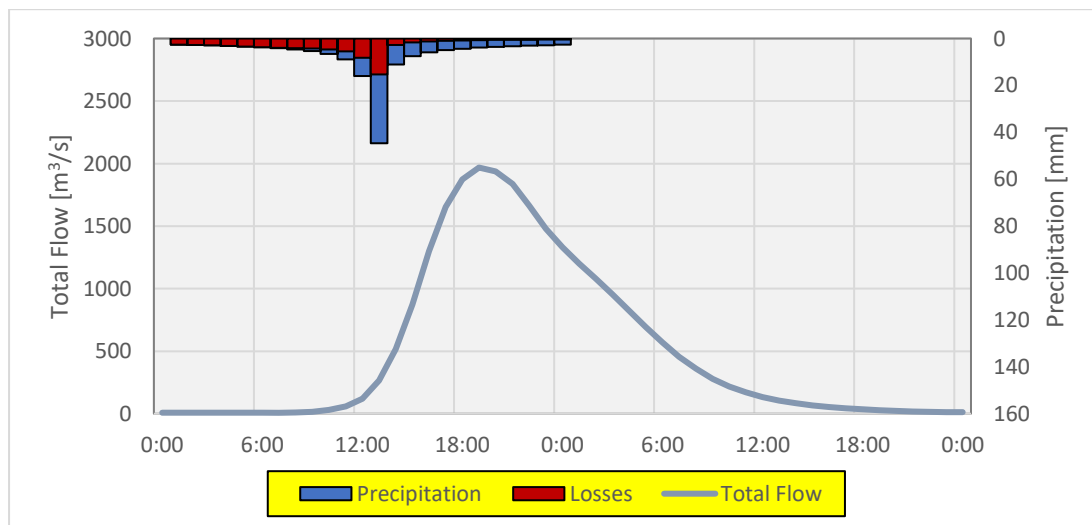


Figure 14: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for normal soil conditions, CN<sub>II</sub>

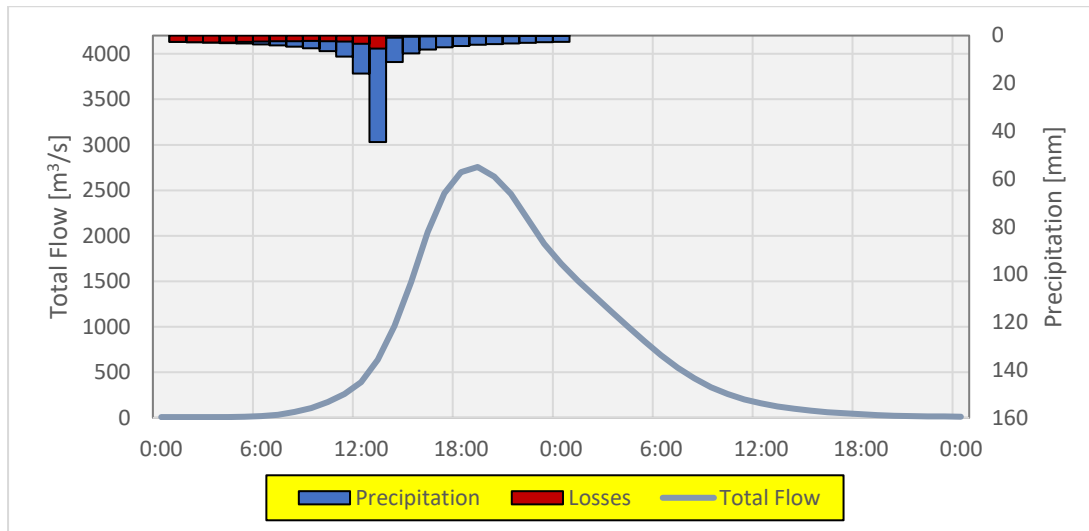


Figure 15: Flow hydrograph at the outlet of the studied area for wet soil conditions,  $CN_{III}$

As it was expected, the higher the soil moisture is, prior to the event, the bigger the discharge peak is and the lesser the losses of the rainfall to it are.

#### ▪ Hydraulic Simulation

The previously downstream point of the studied area, at the bridge located South-West of Leianokladi village, is now the upstream point, and the downstream for the area of simulation is shifted 3km downstream just before the junction with another river that has an inflow of significant volume and is located South-East of Leianokladi village. The area used for the simulation is thought to be of practical use as it contains a road bridge and two villages, making it important to simulate the water depth in a flood event as it poses a threat in human life aside from the material damages that may occur.

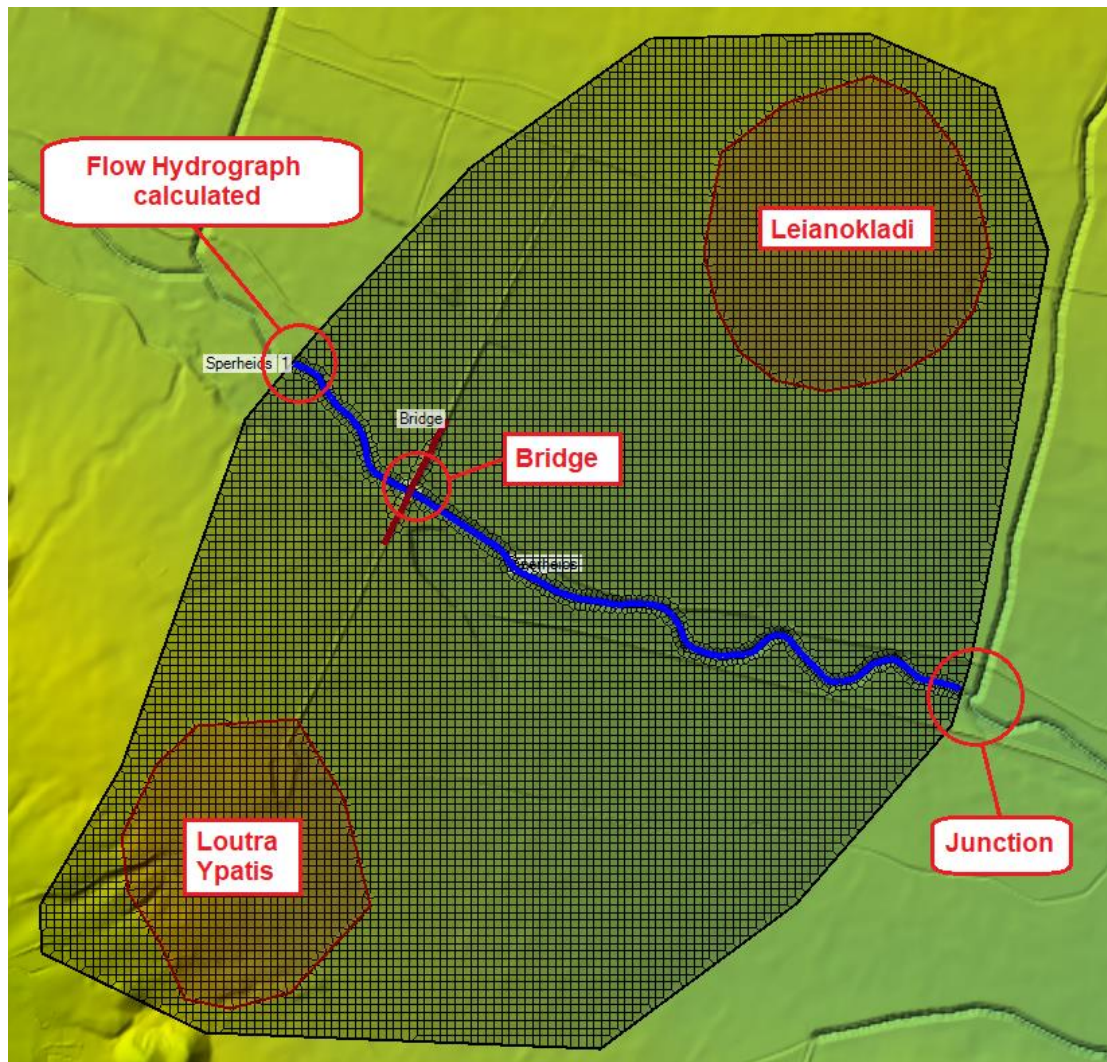


Figure 16: Simulation area in HEC-RAS software

For the hydraulic simulation, the flow diagram for *HEC-RAS* software (Figure 4) was followed and the results are given in the table below.

Table 18: Time of peak water depth at Leianokladi bridge

Soil Conditions	Time [ h:m ]	Water Depth [ m ]
Dry	01:00	8.4
Normal	19:05	9.3
Wet	19:00	10.5



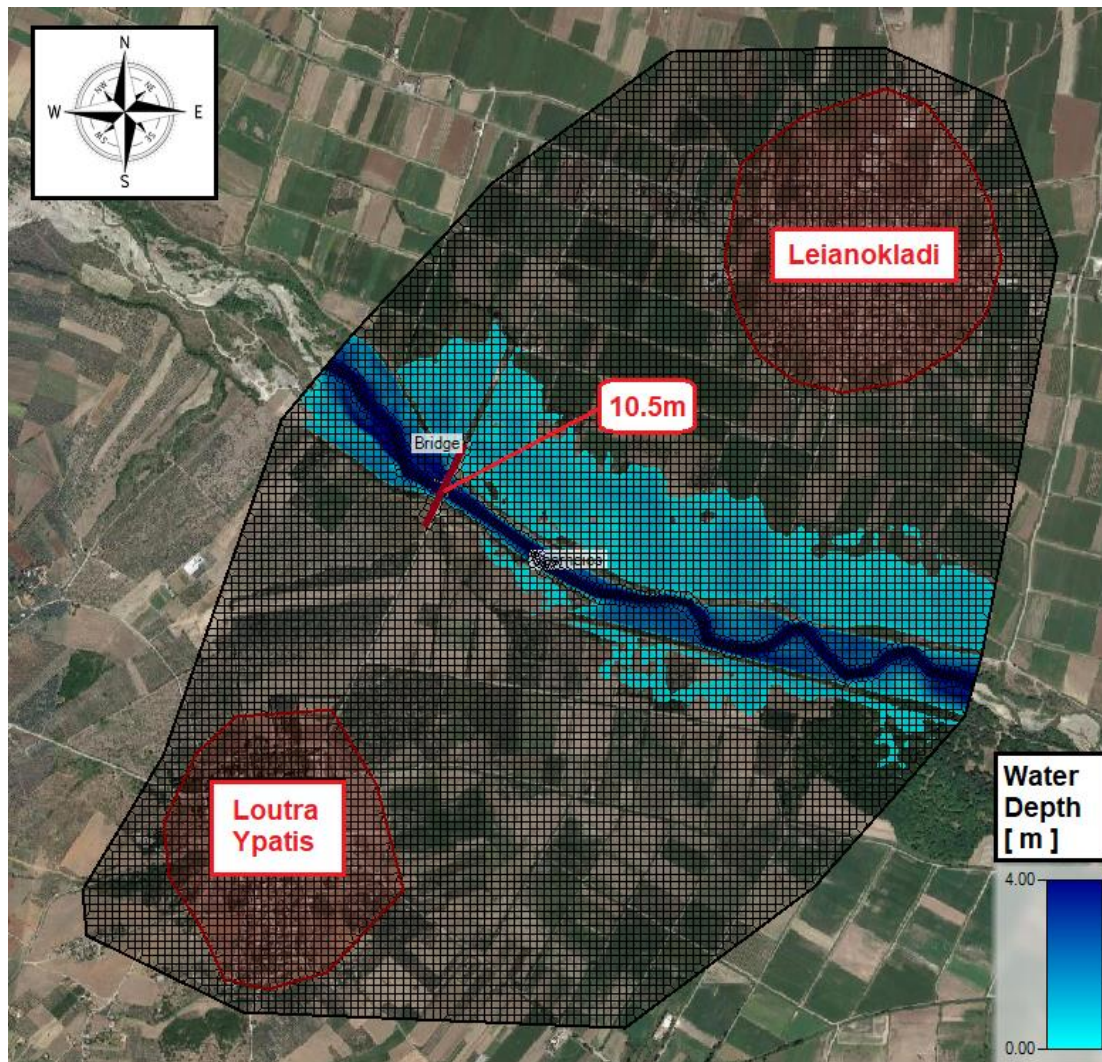


Figure 17: Simulation of a flood event under wet soil conditions with the water depth at Leianokladi bridge highlighted

Based on the results of the simulations (Table 18), the rise of the flooding water's free surface along with the increase of the soil moisture prior to the flood event can be observed. Furthermore, the discharge under dry soil conditions peaks later than the other two conditions, as expected. This might imply the existence of an exponential relation between time of peak discharge and soil moisture, with the former reaching its upper limit from the normal conditions' levels. A final observation to be made is that overflowing water does not affect urban areas, while the water depth reaches levels of 80cm with a flow speed of 0.8 m/s on the area 0.5km on the left side of the riverbed.

- Soil Transport

- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Using data and information derived from the international bibliography, RUSLE model was implemented in the GIS environment provided by



ArcMap software, for the area studied of 100306ha, and gave the following results:

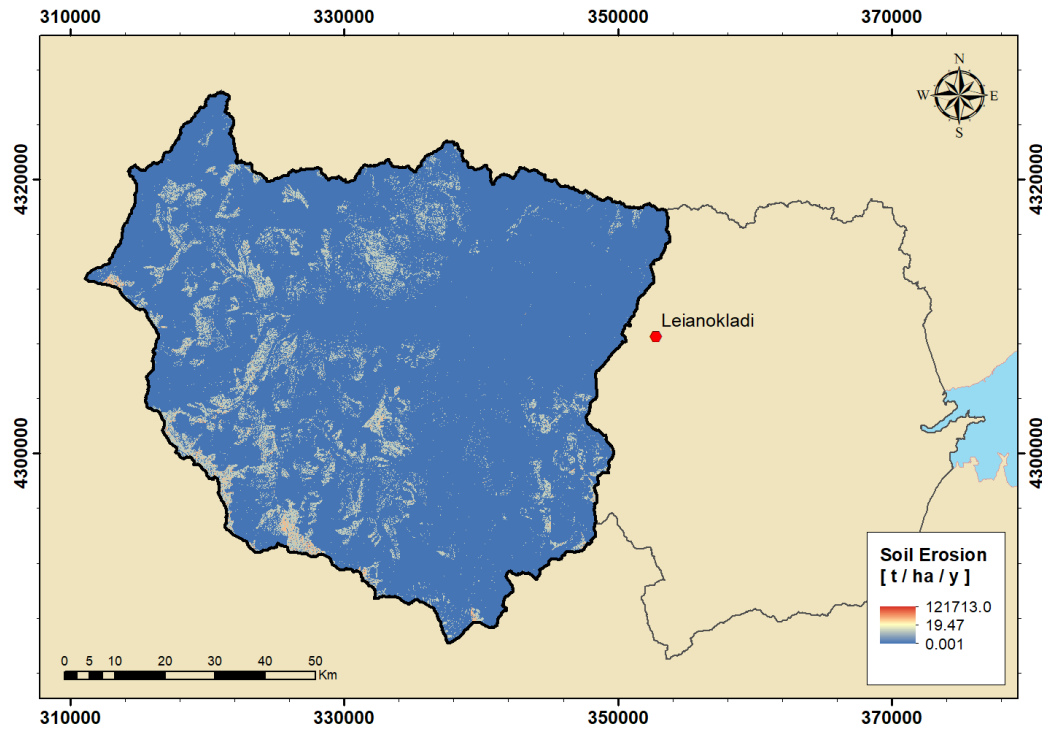


Figure 18: Soil erosion estimated by RUSLE model

Soil erosion was then calculated using the open data provided by ESDAC:

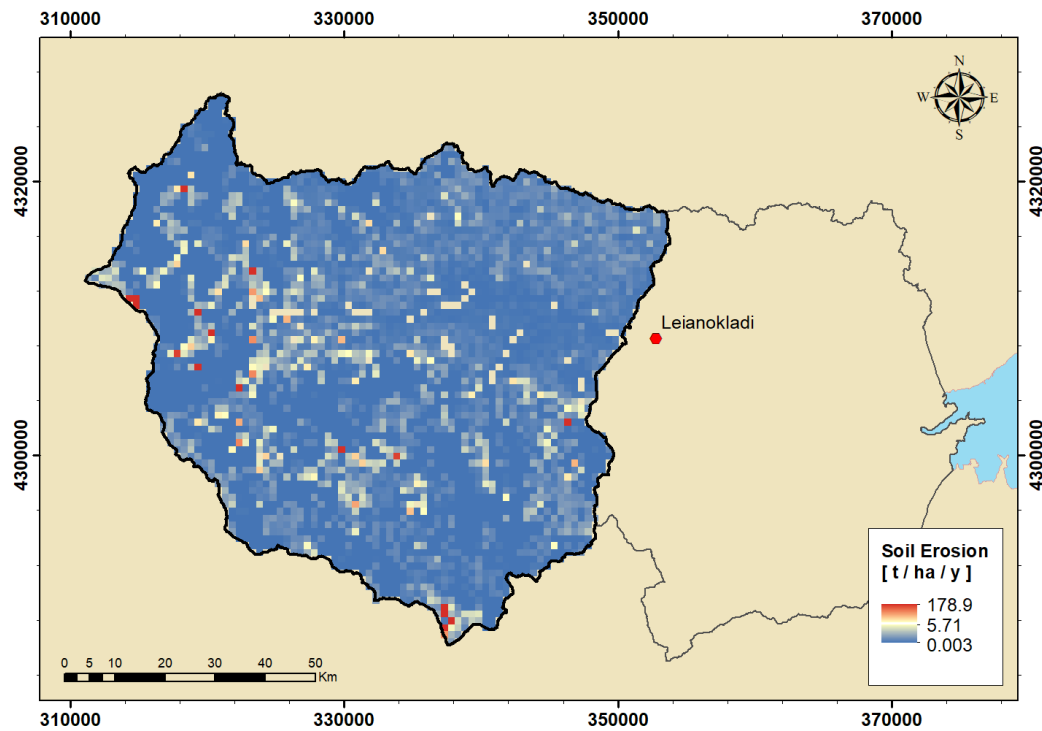


Figure 19: Soil erosion estimated by RUSLE model (ESDAC data)



The maps given by ESDAC are of low resolution (cell size: 25mx25m, 100mx100m, 500mx500m), compared to the resolution of the maps created (cell size: 5mx5m), hence the estimations, that the former make, are expected to be of less accuracy.

Then, using Vanoni's equation (1975) the Soil Delivery Ratio is calculated to be 0.199 and, therefore, the sediment discharge at the outlet of the studied area, of 100306ha, is 388,709 t/y.

Finally, after a sensitivity analysis of  $\pm 10\%$  was conducted on RUSLE model for the data available, the parameter of slope angle affects the soil erosion estimation the most.

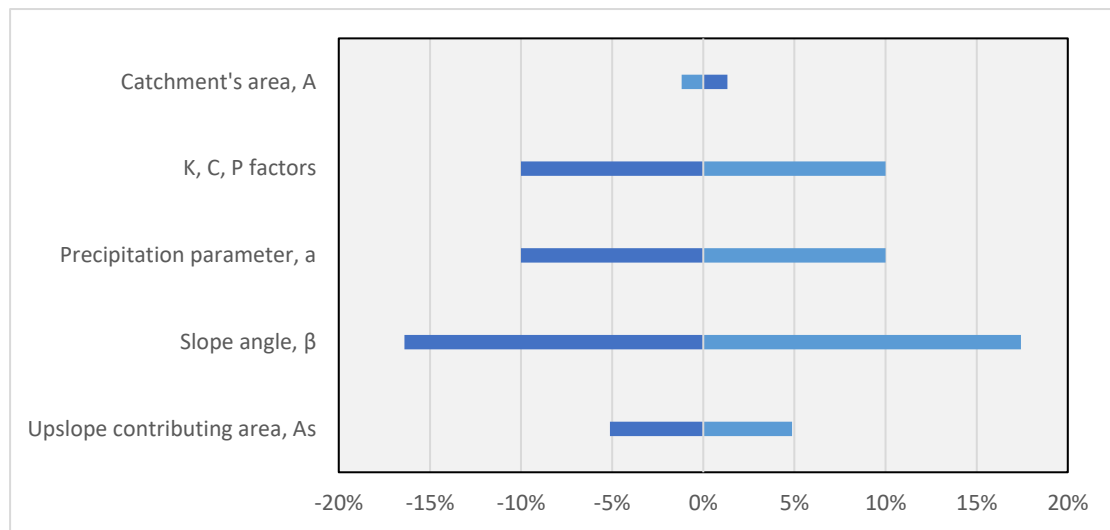


Figure 20: Sensitivity analysis for RUSLE model

- Gavrilovic Method / Erosion Potential Method (EPM)

Following the equations and tables of the corresponding chapter above, the EPM model was implemented for the study area, of 1003.06km<sup>2</sup>, and gave the following results:



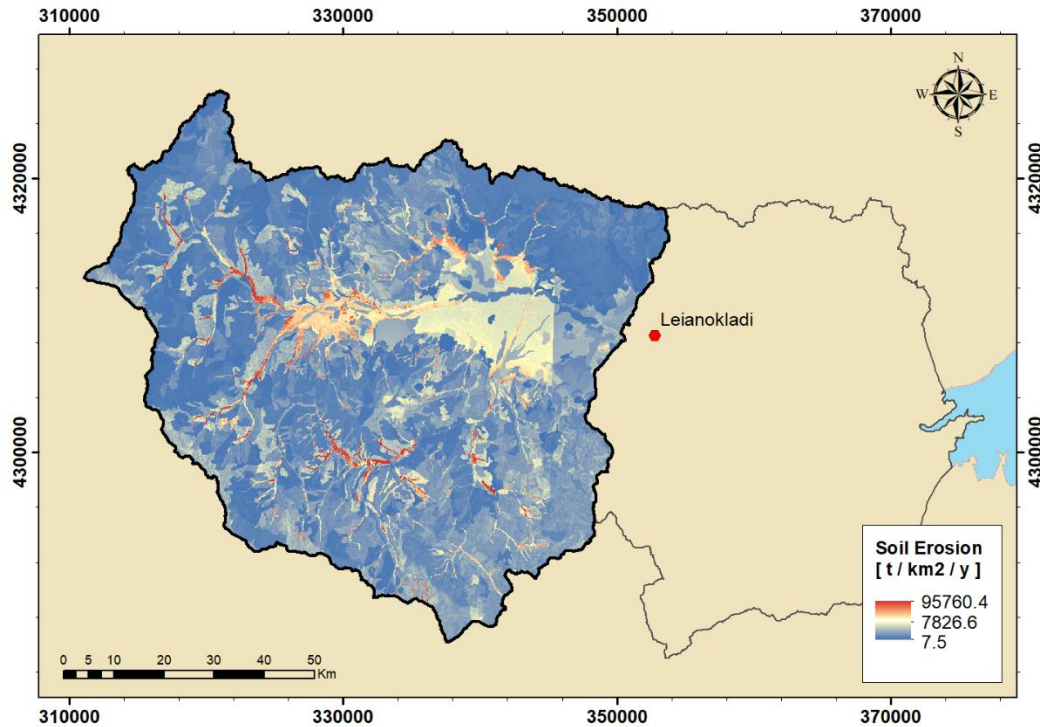


Figure 21: Soil erosion estimated by EPM model

Then, using Zemljic's version (1971) of the Retention coefficient equation, the sediment discharge at the outlet of the studied area, of 1003.06km<sup>2</sup>, is 816,460 t/y for a retention coefficient of 0.104.

Finally, a sensitivity analysis of ±10% was conducted on the EPM model which concluded that soil erodibility, Y, and soil protection, X, coefficients are equally important for the estimations of the model.

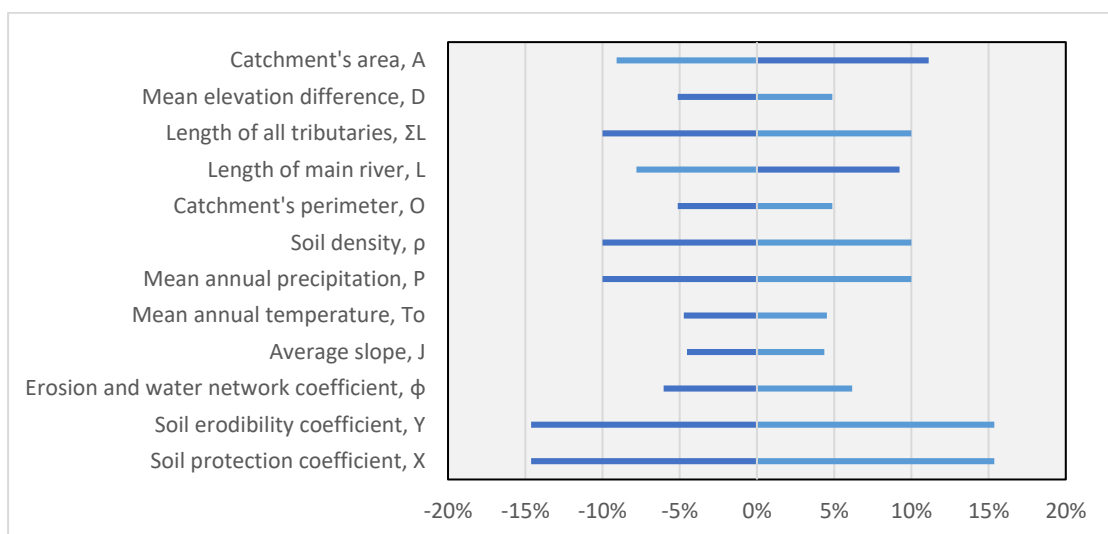


Figure 22: Sensitivity analysis for EPM model



- Koutsoyiannis - Tarla Equation

Koutsoyiannis and Tarla equation directly estimates the sediment discharge, at the outlet of the studied area, to be 564,697 t/y. Despite it being a fairly easy model to implement, it returns fairly good estimations of the sediment discharge at the outlet of the studied area, assuming that EPM gives the most realistic estimations.

A sensitivity analysis of  $\pm 10\%$  was conducted to the Koutsoyiannis-Tarla model which concluded that the mean annual precipitation, at the studied area, significantly affects the results of it.

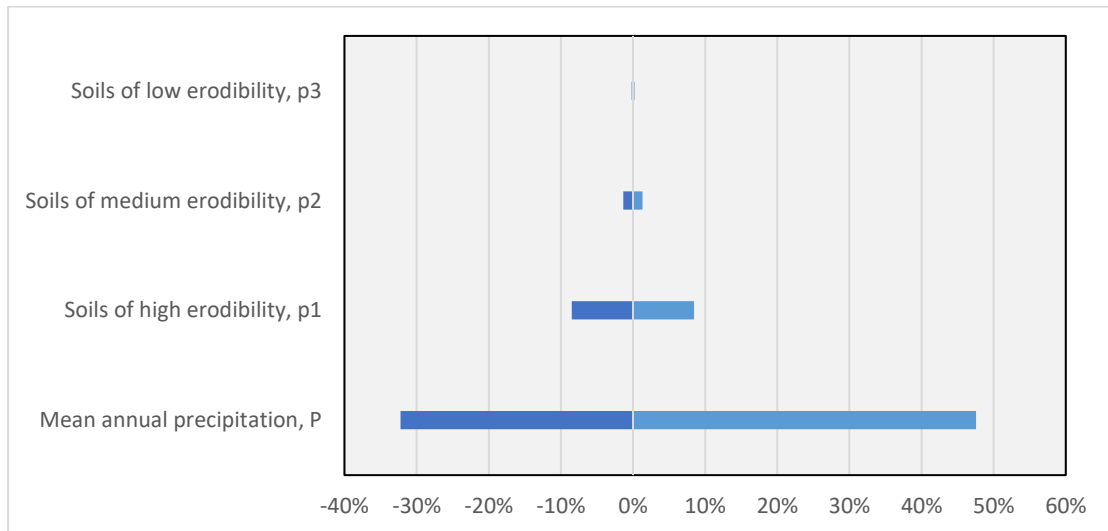


Figure 23: Sensitivity analysis for the Koutsoyiannis-Tarla model

## Conclusions

This paper attempted the study of soil transportation as a whole, in a subbasin of Sperchios River. The main steps for the completion of this task were: the hydrologic analysis of the subbasin, the hydraulic analysis downstream of the subbasin and the soil erosion caused by the event studied inside the subbasin. The main findings are summarized below:

- Generic Conclusions

Conclusions in regard to the materials and methods used in this paper are:

- Soil moisture levels play an important role in flood discharges. It affects not only water depth but also the time of peak discharge.
- The results of this paper indicate the strong correlation between soil erosion estimations, of the models used, and the geographic location of the area studied. International bibliography research showed that soil erosion estimation varied depending on the research team.
- Gavrilovic model was developed for geomorphologic conditions similar to the ones observed in Greece, hence assuming that its estimations



are realistic, different models used (RUSLE, Koutsoyiannis-Tarla) are underestimating the soil erosion and sediment discharge of the studied area.

- It is obvious that the topographic factor, LS, is the one with the biggest computational cost for estimating soil erosion with RUSLE model.
- Sensitivity analysis of  $\pm 10\%$ , to the models used, revealed that each model is affected the most by completely different parameters: RUSLE model is changed the most by changing slope angle  $\beta$ , EPM model is changed the most by changing soil erodibility  $Y$  and soil protection  $X$ , and Koutsoyiannis-Tarla model is changed the most by changing mean annual precipitation  $P$  in the area studied.

#### ▪ Specific Conclusions

Conclusions made specifically for the area studied are:

- Surface runoff under normal soil moisture conditions is the equivalent to 66% of the total rainfall. However, while under dry conditions it equals to 29% of the total rainfall (37% decrease), under wet conditions it equals to 88% of the total rainfall (22% increase).
- Flow hydrograph under normal soil moisture conditions peaks at 1969  $\text{m}^3/\text{s}$ . Accordingly, while a decrease of the surface runoff by 37%, under dry conditions, leads to a peak of 694  $\text{m}^3/\text{s}$  (35% decrease), an increase of the surface runoff by 22%, under wet conditions, leads to a peak of 2756  $\text{m}^3/\text{s}$  (40% increase).
- Under normal soil moisture conditions, the flooding water's free surface, at the bridge of Leianokladi, is 9.3m above the riverbed. A decrease of 37% to the surface runoff, under dry conditions, leads to a water depth of 8.4m (9.7% decrease), while an increase of 22% to the surface runoff, under wet conditions, leads to a water depth of 10.5m (12.9% increase).
- The road bridge that is located South-West of Leianokladi village, is considered a point of interest due to it being a part of the main provincial road system. The bridge stands at 9m above the riverbed, hence taking into consideration the results of the hydraulic analysis under different conditions for a flood event of 100 years return period, local authorities preventing the passage from the bridge under such events is thought to be justified.
- For the catchment studied, with an area of 1003.06 $\text{km}^2$ , the mean annual soil erosion under suspensions is estimated to be 1950  $\text{t}/\text{km}^2/\text{y}$  (1953310  $\text{t}/\text{y}$ ) and 7827  $\text{t}/\text{km}^2/\text{y}$  (7850579  $\text{t}/\text{y}$ ) by RUSLE and EPM models respectively. The two models' estimates differ by 300%.
- At the outlet of the studied area, the sediment discharge estimated by RUSLE, EPM and Koutsoyiannis-Tarla models are 388709  $\text{t}/\text{y}$ , 816460  $\text{t}/\text{y}$  and 564697  $\text{t}/\text{y}$  respectively. Assuming EPM model is the most



realistic one, RUSLE model leads to an underestimation of 52%, while Koutsoyiannis-Tarla model leads to an underestimation of 31%.

- Sensitivity analysis of  $\pm 10\%$  to the models used lead to fluctuations on the Koutsoyiannis-Tarla model from -32% to +48% by changing the precipitation parameter, on the EPM model from -15% to +15% by changing the soil erodibility and soil protection parameter, and on the RUSLE model from -16% to +17% by changing the slope angle parameter.

#### ▪ Further research

The research done, for the purposes of this paper, lead to the conclusion that the topic of soil transport is extremely complicated and, comparatively, new since it requires multiple complex calculations which have not been easy to implement before the development of GIS software.

Therefore, there is a lot of room for improvements and research, especially for the complicated geomorphology of Greece. Based on this paper, future research on the topic can be conducted for:

- Repetition of the hydrologic and hydraulic simulations using the hyetograph produced by the Worst Profile Method and comparison between the results
- Expansion of the area used for the hydraulic simulations in order to include the city of Lamia. The population density there is much higher compared to all the other areas near the river, hence making it important to know the effects of such an event for the safety of the people.
- Investigate the soil erosion caused by the other mechanisms (Aeolic etc.) and methods for estimating soil erosion (stochastic models, estimation of the dead volume of a reservoir, etc.)
- Improvements on the maps provided by ESDAC for the implementation of RUSLE model in the general area of Greece.
- Usage of advanced software developed for the RUSLE model, such as [GISus-M](#) extension for *ArcMap* and [RUSLE2](#).

An important note for future researchers is to be extremely cautious when using references since there are many inaccuracies. This was observed in both RUSLE and EPM model. It is strongly recommended to confirm information used, if possible, by its original author or, at least, by different sources before implementing them.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται συνολικά το φαινόμενο της στερεομεταφοράς στην υπολεκάνη απορροής του Σπερχείου ποταμού με έξοδο στη γέφυρα Λειανοκλαδίου. Αρχικά διεξάγεται η παραγωγή του υετογραφήματος μελέτης, δηλαδή της αναμενόμενης κατακρήμνισης, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει το χειρισμό των όμβριων καμπυλών, την επιφανειακή αναγωγή της σημειακής βροχόπτωσης και τελικά τη «μέθοδο εναλλασσόμενων μπλοκ». Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μετάφραση της βροχόπτωσης που πέφτει εντός της λεκάνης απορροής, σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο αυτής, μέσω της μοντελοποίησης του προγράμματος HEC-HMS, και ύστερα παρουσιάζεται πώς διαχέεται αυτό στην εγγύτερη περιοχή της γέφυρας, μέσω της μοντελοποίησης του προγράμματος HEC-RAS. Τέλος, διερευνάται η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση εντός της λεκάνης απορροής, εξετάζοντας το Αμερικάνικο μοντέλο εκτίμησης «Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)», το Ευρωπαϊκό μοντέλο εκτίμησης «Erosion Potential Method (EPM)», και το Ελληνικό μοντέλο εκτίμησης «Σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά». Επίσης υπολογίζεται και η στερεοαπορροή που πρακτικά θα παρατηρηθεί στην έξοδο της λεκάνης απορροής, εξετάζοντας τις εξισώσεις εκτίμησης του συντελεστή στερεοαπορροής που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία.



## 1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας πτυχιακής διατριβής είναι να παρέχει στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πρόβλημα της στερεομεταφοράς. Αυτό, σημαίνει ότι αναλύονται η υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής, η υδραυλική απόκριση του ποταμού, και τελικά η εδαφική διάβρωση και στερεοαπορροή που προκαλείται. Γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης διάφορων μεθόδων προσέγγισης των παραπάνω διεργασιών, εντός και εκτός προγραμματιστικού περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και τα βήματα για την αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων από ερευνητές που επιχειρούν να μελετήσουν κάποιο αντίστοιχο πρόβλημα.

Η εδαφική απώλεια και η τελική στερεοαπορροή αποτελεί ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές και μελετητές ανά την υφήλιο, λόγω της υψηλής μεταβλητότητας που παρουσιάζεται από περιοχή σε περιοχή. Η διεθνής εμπειρία (Nearing M. A., 2000; Σαπουντζής Μ., Μυρωνίδης Δ., Στάθης Δ., & Στεφανίδης Π., 2009; Efthimiou N., Lykoudi E. E., & Karavitis C. A., Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models, 2017; Batista P. V., Davies J., Silva M. L., & Quinton J. N., 2019) δείχνει πως τα περισσότερα μοντέλα υποεκτιμούν τη συνολική ποσότητα εδαφικού υλικού που τελικά καταλήγει στον αποδέκτη με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα πρακτικά και λειτουργικά. Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι η αναδιαμόρφωση των μαιανδρισμών ή του δέλτα ενός ποταμού σε βάθος χρόνου (Stathopoulos N., Lykoudi E., Vasileiou E., Rozos D., & Dimitrakopoulos D., 2017), με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι αστικές ή αγροτικές κινήσεις της εγγύτερης περιοχής, και η πλήρωση του νεκρού όγκου ενός ταμιευτήρα συντομότερα από τις εκτιμήσεις που είχαν γίνει κατά τον σχεδιασμό του, αντίστοιχα (Bureau of Reclamation, 1987).

Το ζήτημα της στερεομεταφοράς είναι ένα πολυσύνθετο ζήτημα, με πολλές και δύσκολα υπολογίσιμες, παραμέτρους. Ο δείκτης αβεβαιότητας του εκάστοτε υπολογίσιμου μεγέθους είναι αρκετά υψηλός καθώς οι ίδιες οι παράμετροι εξαρτώνται από άλλους δύσκολα εκτιμήσιμους παράγοντες (π.χ. το ύψος πτώσης των σταγόνων της βροχόπτωσης μετά την πρόσκρουσή τους στην φυτοκάλυψη). Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια σύγκρισης τριών από τις επικρατέστερες εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης στα ελληνικά δεδομένα, και συγκεκριμένα για την λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού της Κεντρικής Ελλάδας.

Συνοπτικά η μεθοδολογία που θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια, εστιάζει στα παρακάτω σημεία:

- Χρήση όμβριων καμπυλών για εξαγωγή της μέγιστης έντασης σημειακής βροχόπτωσης και αναγωγή της σε επιφανειακή σύμφωνα με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και τον μειωτικό συντελεστή επιφανειακής αναγωγής φ. Μέσω της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ παράγεται το υετογράφημα μελέτης, και χρησιμοποιείται η μέθοδος της Natural Resources Conservation Service (NRCS) για τον υπολογισμό της ενεργής βροχόπτωσης.
- Εισαγωγή του παραπάνω υετογραφήματος μαζί με τον αριθμό καμπύλης CN στο υδρολογικό μοντέλο *HEC-HMS* για την προσομοίωση



της υδρολογικής απόκρισης της υπό εξέταση λεκάνης, με τελικό εξαγώμενο το πλημμυρογράφημα μελέτης.

- Εισαγωγή του παραπάνω πλημμυρογραφήματος μαζί με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ΨΜΕ (Digital Elevation Model, DEM) της περιοχής μελέτης στο υδραυλικό πρόγραμμα *HEC-RAS* για τη διδιάστατη (2D) υδραυλική προσομοίωση απόκρισης του υδρογραφικού δικτύου κατάντη του σημείου εξόδου της υπό εξέταση λεκάνης απορροής.
- Εκτίμηση της εδαφικής απώλειας, εντός της λεκάνης απορροής, και τελικής στερεοαπορροής, στην έξοδο της λεκάνης απορροής, μέσω του προγράμματος *ArcMap* για τη χωρική επεξεργασία των παραμέτρων των μοντέλων που θα εξεταστούν και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.
- Διεκπεραίωση ανάλυσης ευαισθησίας σε κάθε μοντέλο για τον προσδιορισμό της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη βαρύτητα.





## 2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

### 2.1 Όμβριες καμπύλες

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  $i$ , συναρτήσεως της χρονικής κλίμακας (ή διάρκειας)<sup>1</sup> καταιγίδας  $d$  και της περιόδου επαναφοράς  $T$ , ενώ έχουν περιγραφεί λεπτομερώς από πολλούς μελετητές (Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A., 1998; Κουτσογιάννης Δ. & Λαζαρίδης Λ., 1998; Koutsoyiannis D. & Baloutsos G., 2000; Κουτσογιάννης Δ., 2011). Οι μετρήσεις (καταγραφές) προέρχονται από καταγεγραμμένα επεισόδια βροχόπτωσης μέσω βροχόμετρων και βροχογράφων.

Είναι συνήθης πρακτική η διάρκεια του επεισοδίου, που μελετάται, να είναι πολλαπλάσιο του χρόνου συρροής, ή συγκέντρωσης, της εκάστοτε λεκάνης απορροής. “Η διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού επιλέγεται ίση με το τριπλάσιο, τουλάχιστον, του χρόνου συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης” (Κουκουβίνος Α., 2014).

Η πιο διαδεδομένη σχέση εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, η οποία προτείνεται και από τις ελληνικές προδιαγραφές ΠΔ 696 (1974), είναι η εμπειρική σχέση που πρότεινε ο Giandotti M., το 1934, σύμφωνα με την οποία:

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{\Delta z}} \quad (2.1)$$

όπου  $t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής [h],  $A$  η επιφάνεια της λεκάνης απορροής [km<sup>2</sup>],  $L$  το μήκος της κύριας μισγάγγειας [km] και  $\Delta z$  η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της [m].

Τότε, ο χρόνος υστέρησης της πλημμυρικής αιχμής, σύμφωνα με τον Mockus V. (1957), μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$t_L = 0.6 \cdot t_c \quad (2.2)$$

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι όμβριες καμπύλες που καταρτίστηκαν από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την Ειδική

---

<sup>1</sup> “Η χρονική κλίμακας αναφοράς αναφέρεται συχνά ως «διάρκεια», αλλά ο συγκεκριμένος όρος είναι εσφαλμένος. Η χρονική κλίμακα  $d$ , στην λαμβάνεται η μέση ένταση βροχής, δεν έχει σχέση με τη διάρκεια βροχής. Όμως, συνήθως, η διάρκεια βροχής και χρονική κλίμακα θεωρούνται ότι ταυτίζονται.” (Κουτσογιάννης Δ., 2011)



Γραμματεία Υδάτων, το 2015, στο «Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (GR07)» κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> φάσης του 1<sup>ου</sup> σταδίου της Προκήρυξης του Έργου.

Η γενική συναρτησιακή εξίσωση όμβριων καμπυλών είναι της μορφής

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (2.3)$$

Όπου η κατάλληλη συνάρτηση της χρονικής κλίμακας  $d$  δίδεται από την εμπειρικά διαπιστωμένη εξίσωση

$$b(d) = \left(1 + d/\theta\right)^\eta \quad (2.4)$$

όπου  $d$  η χρονική κλίμακα (ή διάρκεια) της βροχόπτωσης,  $\theta \geq 0$  παράμετρος προς εκτίμηση με μονάδες χρόνου, και  $0 < \eta < 1$  αδιάστατη παράμετρος προς εκτίμηση.

Όσον αφορά στην κατάλληλη συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς  $T$ , αυτή 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. Μια συνάρτηση κατανομής που αποδεικνύεται κατάλληλη για τη μέγιστη ένταση βροχής, σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων, είναι η κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών, ΓΑΤ (General Extreme Value, GEV distribution) και έχει την έκφραση

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \kappa \cdot \left( \frac{x}{\lambda} - \psi \right) \right]^{-1/\kappa} \right\}, \quad x \geq \lambda \cdot \left( \psi - \frac{1}{\kappa} \right) \quad (2.5)$$

όπου  $\kappa$ ,  $\psi$  ( $> 0$ ) αδιάστατες παράμετροι σχήματος και θέσης, αντίστοιχα, και  $\lambda > 0$  παράμετρος κλίμακας με διαστάσεις έντασης βροχής.

“Για περιόδους επαναφοράς  $T \geq 50$  ετών, η εξίσωση (2.3) μπορεί να αντικατασταθεί από την απλούστερη έκφραση

$$i(d, T) = \frac{\lambda' \cdot (T^\kappa + \psi')}{(d + \theta)^\eta}, \quad \kappa \neq 0 \quad (2.6)$$



$$i(d, T) = \frac{\lambda \cdot (\ln T + \psi)}{(d + \theta)^\eta}, \quad \kappa = 0 \quad (2.7)$$

όπου, για απλοποιητικούς λόγους, ορίζονται  $\lambda' = \lambda/\kappa$  και  $\psi' = \kappa \cdot \psi - 1$ .  
(Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A., 1998)

### 2.1.1 Γεωγραφική Μεταβλητότητα

Η γεωγραφική μεταβλητότητα των κατακρημνισμάτων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, πολλοί από τους οποίους συνδέονται με το χασοτικό χαρακτήρα της εξέλιξης των ατμοσφαιρικών συστημάτων που τα παράγουν. Ωστόσο, “σε υπερετήσια κλίμακα γίνονται εμφανείς οι επιδράσεις τουλάχιστον δύο καθοριστικών παραγόντων: της γειννίασης με τη θάλασσα και της ορογραφίας.” (Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., Τεχνική Υδρολογία, 1999)

Με την αύξηση της απόστασης μιας περιοχής από σημαντική θαλάσσια έκταση είναι λογικό να μειώνεται το μέσο ετήσιο ύψος βροχής και το συνηθισμένο αυτό γεγονός αποτελεί τον κανόνα «της απομάκρυνσης από τη θάλασσα», που όμως επαληθεύεται μόνο όταν οι επικρατούντες άνεμοι πνέουν με διεύθυνση από τη θάλασσα προς την ξηρά. Εκτεταμένες οροσειρές που τυχόν παρεμβάλλονται στην πορεία των εμπλουτισμένων σε υγρασία ανέμων (π.χ. η οροσειρά της Πίνδου) προκαλούν απότομες αλλαγές στο βροχομετρικό καθεστώς.

Μια άλλη επίδραση της ορογραφίας, που επιβεβαιώνεται από πολλές βροχομετρικές παρατηρήσεις, είναι η αύξηση του ύψους βροχής με την αύξηση του τοπογραφικού υψομέτρου. Η «βροχομετρική βαθμίδα», δηλαδή η ανά μονάδα υψομέτρου μέση αύξηση του ετήσιου ύψους βροχής σε mm, μεταβάλλεται σημαντικά από περιοχή σε περιοχή και ενδεικτικά ως συνηθισμένο πεδίο τιμών αναφέρονται μεταβολές από 0.5mm έως 2.0mm ύψους βροχής για αύξηση υψομέτρου 1m. Μάλιστα, σε μερικές περιπτώσεις, ιδίως σε τροπικές περιοχές, “έχει παρατηρηθεί ότι η σχέση του ύψους βροχής με το υψόμετρο μπορεί να αντιστρέφεται πάνω από ένα ορισμένο υψόμετρο εξαιτίας της σχέσης εξατμισοδιαπνοής της χλωρίδας στη στεριά με την εξάτμιση της θαλάσσιας μάζας” (Dingman S.L., 2015).

Πέρα από την πιο πάνω αυξητική επίδραση στο ύψος βροχής, το τοπογραφικό υψόμετρο (λόγω της συσχέτισής του με τη θερμοκρασία) επηρεάζει και ποσοστό της συμμετοχής του χιονιού στο συνολικό ύψος των κατακρημνισμάτων. Προφανώς, το ποσοστό αυτό είναι αύξουσα συνάρτηση του υψομέτρου, εξαρτάται όμως και από άλλους τοπογραφικούς παράγοντες, όπως το γεωγραφικό πλάτος και η απόσταση από τη θάλασσα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι “το ποσοστό αυτό, στις ευρωπαϊκές οροσειρές, κυμαίνεται από 10-25% για υψόμετρο 1.000m και μέχρι 76-90% για υψόμετρο 3.000m”. (Ξανθόπουλος Θ., 1984)



## 2.2 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχόπτωσης

### 2.2.1 Μεθοδολογίες ολοκλήρωσης

Η επιφανειακή ολοκλήρωση μπορεί να γίνει με διάφορες μεθοδολογίες, οι οποίες εμπίπτουν σε δύο γενικές κατηγορίες: «**άμεσης ολοκλήρωσης**», στις οποίες γίνεται άμεση χρήση των σημειακών μετρήσεων, και «**προσαρμογής επιφάνειας**», στις οποίες πριν την επιφανειακή ολοκλήρωση γίνεται αναπαράσταση της γεωγραφικής μεταβολής της βροχόπτωσης. Οι πρώτες μέθοδοι είναι απλούστερες, αλλά οι δεύτερες έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα να αναδεικνύουν τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχής, γεγονός που αποκτά ιδιαίτερη αξία τόσο για την κατανόηση του φαινομένου, όσο και για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων αλλά και του τελικού εξαγομένου.

Η συνηθέστερη μέθοδος επιφανειακής ολοκλήρωσης της βροχόπτωσης, λόγω της απλότητας στην εφαρμογή της, που ακολουθείται, είναι η «**μέθοδος Thiessen**», η οποία προτάθηκε από τον Alfred H. Thiessen το 1911, και ανήκει στις «μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης».

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας εκτιμούν την επιφανειακή βροχόπτωση μιας λεκάνης ως γραμμικό συνδυασμό των σημειακών βροχοπτώσεων, όπως αυτές προκύπτουν από τις όμβριες καμπύλες, στα σημεία των βροχομετρικών σταθμών που βρίσκονται μέσα (ή και πολύ κοντά) στη λεκάνη, με βάση τη εξίσωση:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i \cdot h_i \quad (2.8)$$

όπου  $h_s$  το ύψος βροχής στη λεκάνη απορροής,  $h_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) τα σημειακά ύψη για τους  $k$  σταθμούς της λεκάνης, και  $w_i$  ο συντελεστής βάρους για το σταθμό με αριθμό  $i$ .

Συγκεκριμένα, η «μέθοδος Thiessen» χωρίζει γεωμετρικά τη συνολική επιφάνεια  $S$  σε ζώνες επιρροής  $S_i$ , μία για κάθε επιλεγμένο σταθμό, έτσι ώστε

$$\sum_{i=1}^k S_i = S \quad (2.9)$$

και ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή

$$w_i = \frac{S_i}{S} \quad (2.10)$$



Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού  $i$  να απέχει από τη θέση του σταθμού  $i$  λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Προκύπτουν έτσι τα γνωστά πολύγωνα Thiessen.

Βέβαια, οι εκτιμήσεις της μεθόδου είναι καλύτερες όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών και όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική κλίμακα της μελέτης (π.χ. οι εκτιμήσεις σε υπερετήσια κλίμακα είναι πιο ακριβείς από τις εκτιμήσεις στην κλίμακα ενός επεισοδίου βροχής).

Όσον αφορά τις «μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας», η «**μέθοδος γραφικής χάραξης των ισουΐτιων**», αποτελεί τη συνηθέστερη της κατηγορίας, στην οποία ο μελετητής χαράσσει τις ισουΐτιες καμπύλες γραφικά πάνω σε ένα χάρτη της περιοχής, στον οποίο έχει προηγουμένως σημειώσει τις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών και τα ύψη βροχής σε αυτές. Για τη χάραξη των καμπυλών χρησιμοποιεί κατά βάση γραμμική παρεμβολή πάνω στα ευθύγραμμα τμήματα που ορίζονται από τις θέσεις γειτονικών σταθμών. Παράλληλα αξιοποιεί την εμπειρία και κρίση του, ξεφεύγοντας από την αυστηρή γραμμική παρεμβολή, προκειμένου να βελτιώσει κατά περιοχές τη χάραξη των καμπυλών (π.χ. σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου).

Αξίζει να γίνει αναφορά στη «**μέθοδο βέλτιστης ολοκλήρωσης (kriging)**», η οποία ανήκει στη γενικότερη γενικότερη κατηγορία των «γεωστατιστικών μεθόδων» ή «μεθόδων kriging», όπως αυτές αναλύονται στο «The Theory of Regionalized Variables and Its Applications», Matheron G. (1971). Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η διακύμανση μιας μεταβλητής (εν προκειμένω της βροχόπτωσης) στο χώρο είναι τυχαία, οπότε χρησιμοποιούν στατιστικές μεθοδολογίες για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από σημειακές μετρήσεις μιας μεταβλητής.

Σημαντικό πλεονέκτημα των «μεθόδων kriging» είναι η ποσοτικοποίηση και, τελικά, η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης. Ωστόσο, οι μέθοδοι είναι αρκετά πολύπλοκες στην εφαρμογή τους, η οποία προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων που, συνήθως, εμπεριέχονται σε λογισμικά πακέτα Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ), όπως είναι το Esri's ArcGIS suite.

## 2.2.2 Συντελεστής αναγωγής $\varphi$

Για τη χρήση των πληροφοριών που δίνουν οι όμβριες καμπύλες, είναι απαραίτητη η πρότερη αναγωγή τους σε επιφανειακές, όπως προτείνουν οι «Προδιαγραφές Μελετών» του ΥΠΕΝ. Η αναγωγή, αυτή, επιτυγχάνεται μέσω του **συντελεστή επιφανειακής αναγωγής** (areal reduction factor), ή αλλιώς επιφανειακού μειωτικού συντελεστή ή συντελεστή ομοιομόρφισης,  $\varphi$ . «Στα πινακοποιημένα αποτελέσματα του National Environmental Research Council (1975), τα οποία είναι και τα πληρέστερα σε ό,τι αφορά στο εύρος μεταβολής της διάρκειας (1 min – 25 ημέρες) και της έκτασης (1 – 30000km<sup>2</sup>) προσαρμόστηκε η ακόλουθη αναλυτική εξίσωση:



$$\varphi = 1 - \frac{0.048 \cdot A^{0.36-0.01 \cdot \ln(A)}}{d^{0.35}} \geq 0.25 \quad (2.11)$$

όπου  $\varphi$  ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής,  $A$  η έκταση της λεκάνης [km<sup>2</sup>] και  $d$  η διάρκεια της βροχόπτωσης [h].” (Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., 1999)

## 2.3 Υετογράφημα

Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές μελετών εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για πλημμύρες μέσης πιθανότητας υπέρβασης (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 προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση την όμβρια καμπύλη της υπό εξέταση λεκάνης, που αντιστοιχεί στην περίοδο 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)

Η μέθοδος αυτή, μαζί με τη «**μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης**» (worst profile method) που ενδείκνυται για πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης (1.000 ή 10.000 χρόνια περίοδος επαναφοράς), παρουσιάζουν 3 σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων απλούστερων μεθόδων της πράξης, και συγκεκριμένα:

- 1) Βασίζονται αποκλειστικά σε δεδομένα που έχουν μετρηθεί στην περιοχή μελέτης (όμβριες καμπύλες) και όχι σε διαγράμματα της βιβλιογραφίας
- 2) Οδηγούν σε ένα μοναδικό υετογράφημα σχεδιασμού ή ελέγχου, χωρίς να απαιτείται καμία πρόσθετη παραδοχή
- 3) Τα αποτελέσματά τους είναι πιο εύλογα και συνεπή σε σχέση με αυτά της μεθόδου των αδιάστατων αθροιστικών καμπυλών, όπως φάνηκε ύστερα από σύγκριση με πληρέστερα στοχαστικά μοντέλα στο «A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis», Koutsoyiannis D. (1994).

Η βασική παραδοχή και των δύο μεθόδων είναι ότι, σε κάθε επιμέρους διάρκεια, το προκύπτον ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής. Η παραδοχή αυτή δεν είναι ρεαλιστική, πράγμα που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα των δύο μεθόδων. Μολαταύτα θεωρείται ότι “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)





## 2.4 Ενεργή Βροχόπτωση

Σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο, η κατάσταση του εδάφους, όσον αφορά το πορώδες του, είναι μείζονος σημασίας για την ένταση και τις πιθανές καταστροφές σε αγροτικό και αστικό ιστό, όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 5.3 της παρούσας εργασίας. Προκειμένου, λοιπόν, να συμπεριληφθεί αυτή η παράμετρος του προβλήματος, στις μελέτες πλημμυρών χρησιμοποιείται η ενεργή βροχόπτωση. Με τον όρο «**ενεργή βροχόπτωση**» νοείται το κλάσμα της συνολικής βροχόπτωσης που δεν απορροφάται από το έδαφος και ρέει επάνω σε αυτό.

Σύμφωνα με τις «Προδιαγραφές Μελετών» του ΥΠΕΝ, προβλέπεται η χρήση της εμπειρικής μεθόδου SCS, που δημιουργήθηκε το 1954 από την Αμερικάνικη υπηρεσία Soil Conservation Service ή, όπως ονομάζεται πλέον, Natural Resources Conservation Service, η οποία βασίζεται στον αριθμό καμπύλης απορροής CN (runoff curve number). “Συγκεκριμένα, η μέθοδος 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.” (ΥΠΕΝ)

Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η μέθοδος σε περιβάλλον GIS, όπου γίνεται αδρομερής κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών και των εδαφικών τύπων στις εδαφικές υδρολογικές ομάδες (Α έως D), όπως αυτές ορίζονται στο εγχειρίδιο 104 (1989), του USDA, όπου δημοσιεύτηκε η μέθοδος, και στη συνέχεια εκτιμάται ο συντελεστής CN σε κατά τόπους ομοιογενείς περιοχές, λαμβάνοντας υπόψη και τη φυτοκάλυψη.

Οι ομάδες που κατατάσσονται τα εδάφη, βάσει του ρυθμού διήθησης του βρόχινου νερού σε αυτά, περιγράφονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τη διηθητικότητα τους (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr))

Ομάδα	Περιγραφή
A	Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης (π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου)
B	Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης (π.χ. αμμώδης πηλός)
C	Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης (π.χ. εδάφη με αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό)
D	Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι). Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια

Ωστόσο, η κατηγοριοποίηση του εδάφους αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία με υψηλό δείκτη αβεβαιότητας, κι έτσι, ειδικά για τα συνήθη πετρώματα στον ελλαδικό χώρο, δίνεται ο παρακάτω πίνακας στις οδηγίες του ΥΠΕΝ.



Πίνακας 2.2: Ομάδες διηθητικότητας εδαφών για πετρώματα του ελλαδικού χώρου (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr))

Τύπος	Υφή	Ομάδα
<b>Πλουτώνια πετρώματα</b>		
Γρανίτης	Αμμώδη έως πηλώδη	A
Σηγιίτης	Βαρύτερα του γρανίτη	B
Διορίτης	Αργιλώδη ή αργιλοπηλώδη	D
Γάββρος και Περιδοίτης	Πηλώδη μέχρι αργιλώδη	B, C, D
<b>Εκρηξιγενή πετρώματα</b>		
Διαβάσης	Αργιλώδη	D
Οφείτης	Λεπτή ή μέτρια λεπτή υφή	C, D
Ρυόλιθος	Αμμώδη	A
Τραχείτης	Αμμώδη	A
Ανδεσίτης	Αργιλώδη	D
Βασάλτης	Αργιλώδη	D
<b>Μηχανικά ιζηματογενή πετρώματα</b>		
Αμμόλιθοι και ψαμμίτες	Αμμώδη έως αμμοπηλώδη	A
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστή άργιλος, αργιλίτες	Αργιλώδη	D
Φλύσσης Αδριατικοϊόνιας ζώνης και Ωλονού – Πίνδου	Αμμοαργιλώδη έως αργιλώδη	D
Φλύσσης Πίνδου	Ελαφρύτερα της προηγούμενης	B
Φλύσσης Τριπόλεως – Γαβρόβου	Ενδιάμεση υφή μεταξύ των προηγούμενων	C
<b>Χημικά και βιογενή ιζηματογενή πετρώματα</b>		
Σκληροί ασβεστόλιθοι	Αργιλοπηλώδη έως αργιλώδη	D
Ασβεστολιθικές μάργες	Πηλώδη έως αργιλοπηλώδη	C
<b>Μεταμορφωσιγενή πετρώματα</b>		
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

Στη συνέχεια, προκειμένου να ληφθεί υπόψιν και η φυτοκάλυψη, συσχετίζονται οι ομάδες διηθητικότητας του εδάφους, που ορίστηκαν προηγουμένως, με τους κωδικούς CORINE για την κάλυψη/ χρήση της γης, σύμφωνα με τον πίνακα 2.3.



Πίνακας 2.3: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής, CN, βάσει της ομάδας διηθησιμότητας του εδάφους και της φυτοκάλυψης που υπάρχει (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)) και τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning (πηγή: Ραφαίοπου G. et al., 2018) [1/2]

Κωδικός	Περιγραφή	Ομάδα Διηθησιμότητας				Manning n
		A	B	C	D	
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	69	80	87	90	0.013
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	66	77	83	86	0.013
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94	0.013
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	87	92	94	95	0.013
123	Ζώνες λιμένων	85	90	93	94	0.013
124	Αεροδρόμια	85	90	93	94	0.013
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	69	80	87	90	0.013
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων					0.013
133	Χώροι οικοδόμησης	69	80	87	90	0.013
141	Περιοχές αστικού πράσινου	44	65	62	82	0.025
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	50	70	80	85	0.025
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	67	76	83	86	0.03
212	Μόνιμα αρδεύομενη γη	67	76	83	86	0.03
213	Ορυζώνες	59	72	81	85	0.03
221	Αμπελώνες	63	72	79	82	0.08
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	44	66	77	83	0.08
223	Ελαιώνες	49	59	72	82	0.08
231	Λιβάδια	54	70	80	85	0.35
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	67	76	83	86	0.04
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86	0.04
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	67	76	83	86	0.05
244	Γεωργο-δασικές περιοχές					0.06
311	Δάσος πλατύφυλλων	35	61	74	80	0.1
312	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80	0.1
313	Μικτό δάσος	35	61	74	80	0.1
321	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84	0.04
322	Θάμνοι και χερσότοποι	42	62	74	80	0.05
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	74	80	0.05
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80	0.06
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	42	62	74	80	0.025
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92	0.035
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80	0.027
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις					0.025
335	Παγετώνες και αιώνιο χιόνι					0.01
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	95	95	95	95	0.04
412	Τυρφώνες					0.04
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	95	95	95	95	0.04
422	Αλυκές	95	95	95	95	0.04



Πίνακας 2.4: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής,  $CN$ , βάσει της ομάδας διηθητικότητας του εδάφους και της φυτοκάλυψης που υπάρχει (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)) και τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning (πηγή: Ραφαϊοαννου G. et al., 2018) [2/2]

Κωδικός	Περιγραφή	Ομάδα Διηθησιμότητας				Manning n
		A	B	C	D	
423	Ζώνες που καλύπτονται από παλιορροιακά ύδατα					0.04
511	Υδατορρέυματα	100	100	100	100	0.05
512	Επιφάνειας στάσιμου ύδατος	100	100	100	100	0.05
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	100	100	100	100	0.07
522	Εκβολές ποταμών					0.07
523	Θάλασσες και ωκεανοί	100	100	100	100	0.07

Έτσι, σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές (Πίνακας 4.6) και σε περιβάλλον GIS, δημιουργείται ένας χάρτης του αριθμού καμπύλης απορροής,  $CN$ , για το σύμπλοκο εδάφους – φυτοκάλυψης. Στη συνέχεια, προκειμένου να προκύψει ένας σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης απορροής, για την εκάστοτε λεκάνη απορροής που μελετάται, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$CN_{II} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{A} \cdot CN_i \right) \quad (2.12)$$

όπου  $A_i$  η έκταση της υποπεριοχής  $i$ ,  $A$  η έκταση της συνολικής λεκάνης απορροής και  $CN_i$  ο αριθμός καμπύλης απορροής της υποπεριοχής  $i$ .

Ο προσδιορισμός αυτός αφορά μια μέση κατάσταση του εδάφους, **τύπου II**, όσον αφορά την υγρασία του. Είναι σκόπιμο, επομένως να γίνει έλεγχος στις ακραίες φάσεις του ακόρεστου (ξηρού), **τύπου I**, ή πλήρως κορεσμένου (υγρού), **τύπου III**, εδάφους, οι οποίες συνυπολογίζονται, αντίστοιχα, από τις εξισώσεις:

$$CN_I = \frac{0.42 \cdot CN_{II}}{1 - 0.0058 \cdot CN_{II}} \quad (2.13)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 \cdot CN_{II}}{1 + 0.013 \cdot CN_{II}} \quad (2.14)$$



Τελικά, η ενεργή βροχόπτωση προκύπτει από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$h_e = 0, \quad h \leq h_{a0} \quad (2.15)$$

$$h_e = \frac{(h - 0.2 \cdot S)^2}{h + 0.8 \cdot S}, \quad h > h_{a0} \quad (2.16)$$

όπου  $h_e$  το ενεργό ύψος βροχής [mm],  $h$  το ολικό ύψος βροχής [mm],  $h_{a0}$  το ύψος του αρχικού ελλείματος [mm] και  $S$  η μέγιστη δυνητική κατακράτηση του εδάφους [mm].

Το «αρχικό έλλειμμα» ορίζεται ως η βρόχινη ποσότητα που απορροφείται πλήρως από το έδαφος χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση, και συνήθως γίνεται η παραδοχή ότι:

$$h_{a0} = 0.2 \cdot S \quad (2.17)$$

όπου η μέγιστη δυνητική κατακράτηση του εδάφους,  $S$  [mm], προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.18)$$

όπου  $CN$  ο εξεταζόμενος αριθμός καμπύλης απορροής (τύπου I, II ή III).

Αξίζει να γίνει αναφορά στην Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων ([European Soil Database](http://www.esdb.eu)), ESDB, η οποία παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να γίνει η κατηγοριοποίηση των εδαφών στις ομάδες διηθητικότητας βάσει την υψής των πετρωμάτων, όπως δηλαδή αυτή ορίζεται στο εγχειρίδιο 104 (1989) του USDA. Περισσότερες πληροφορίες, για τον υπολογισμό, μπορούν να αντληθούν από τις σχετικές οδηγίες του ΥΠΕΝ ([floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)).

## 2.5 Εδαφική Διάβρωση

### 2.5.1 Βασικές έννοιες – Ορολογία

Σύμφωνα με την Soil Science Society of America (2001), ως εδαφική διάβρωση ορίζεται η φθορά της εδαφικής επιφάνειας εξαιτίας της δράσης δυνάμεων όπως η βροχόπτωση και/ ή η επιφανειακή απορροή (υδατική διάβρωση), ο άνεμος



(αιολική διάβρωση), ο πάγος, η μεταβολή της θερμοκρασίας, η βαρύτητα ή άλλοι φυσικοί ή ανθρωπογενείς παράγοντες (άροση/ μηχανική διάβρωση) οι οποίοι συντελούν στην κατάτμηση, την αποκόλληση και την απομάκρυνση εδάφους ή γεωλογικού υλικού από ένα σημείο της επιφάνειας του εδάφους σε κάποιο άλλο.

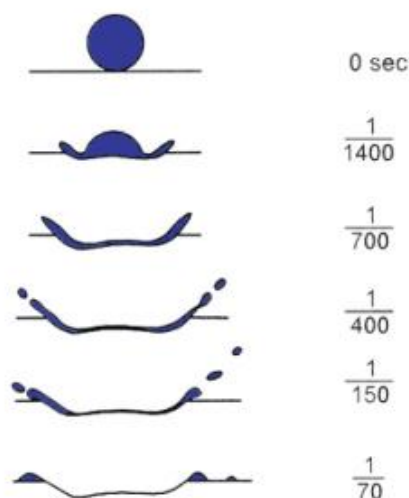
Για την ποσοτική περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιούνται οι όροι (Ζαρρής Δ., Λυκούδη Ε., & Κουτσογιάννης Δ., 2001):

- **Στερεοαπορροή (Sediment Yield,  $S_y$ ):** είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή αναφοράς (π.χ. διατομή υδατορεύματος) σε μια καθορισμένη χρονική διάρκεια, συνήθως κατάντη της υπό μελέτης λεκάνης. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας ανά χρόνο [μάζα / χρόνος] και συχνά ανάγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της διατομής αναφοράς [μάζα / χρόνος / επιφάνεια]. “Είναι το φυσικό μέγεθος που εκφράζει και τις τρεις σχετικές φυσικές διεργασίες της εδαφικής διάβρωσης, της στερεομεταφοράς και της απόθεσης”. (Vanoni V. A., 1975)
- **Στερεοπαροχή (Sediment Discharge,  $Q_s$ ):** είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομής αναφοράς στη μονάδα του χρόνου χωρίς αναφορά στη λεκάνη απορροής [μάζα / χρόνος].
- **Ολική Διάβρωση (Gross Erosion):** περιγράφει την ποσότητα του υλικού που αποκολλάται από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της δράσης της βροχής ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας [μάζα/ χρόνος/ επιφάνεια].
- **Συντελεστής Στερεοαπορροής (Sediment Delivery Ratio, SDR):** είναι ο λόγος της στερεοαπορροής (sediment yield) προς την ολική διάβρωση (gross erosion). Εκφράζει τη μειωμένη ποσότητα φερτών υλικών που καταλήγουν στην διατομή αναφοράς ενός υδατορεύματος λόγω ενδιάμεσων αποθέσεων (επί της επιφάνειας της λεκάνης, στις βάσεις των κλιτύων, στην κοίτη και τις ανάντη όχθες του υδρογραφικού δικτύου), έχοντας παραχθεί στα ανάντη της εν λόγω θέσης αναφοράς, μετακινούμενα μέσω της επιφανειακής απορροής. Είναι αδιάστατο μέγεθος και πάντα μικρότερο της μονάδας.

### 2.5.2 Υδατική διάβρωση

Η «υδατική διάβρωση», σύμφωνα με τον Ευθυμίου Ν. (2016), περιγράφεται από τη συνδυασμένη δράση της βροχόπτωσης, η οποία προκαλεί την απόσπαση των εδαφικών σωματιδίων (Σχήμα 2.1), 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.





Σχήμα 2.1: Μηχανισμός υδατικής διάβρωσης εδάφους από τη βροχόπτωση

(πηγή: Παυλόπουλος Κ. Π., 2011)

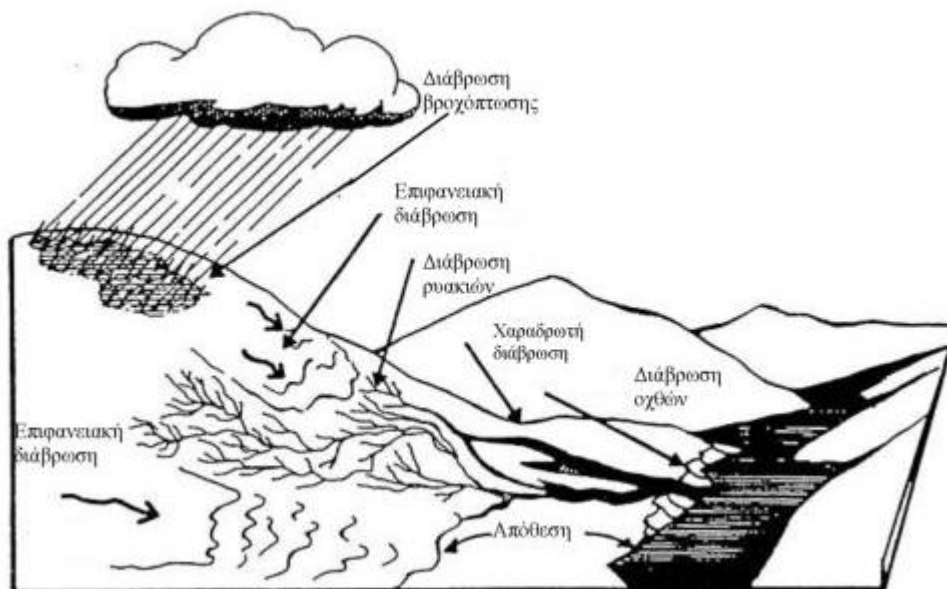
Η υδατική διάβρωση διακρίνεται σε α) εδαφική διάβρωση και β) διάβρωση των υδατορευμάτων (Σχήμα 2.2):

α) Σύμφωνα με τους Vanoni V.A. (1977) και Kirkby & Morgan (1980) στην πρώτη περιλαμβάνονται:

- **Επιφανειακή ή Φυλλοειδής Διάβρωση (Sheet, Inter-rill Erosion):** είναι το τελικό αποτέλεσμα των δύο φάσεων:
  - **Φάση απόσπασης (soil detachment)** εδαφικών σωματιδίων διαμέτρου  $\leq 0.250\text{mm}$  από την επιφάνεια του εδάφους με την αναπήδηση της σταγόνας της βροχής.
  - **Φάση μεταφοράς** εδαφικών σωματιδίων 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).
- **Διάβρωση Ρυακιών ή Αυλακωτή Διάβρωση (Rill Erosion):** Κατά τη διαδρομή του νερού πραγματοποιείται γραμμική αύξηση της παροχής. Όταν η ταχύτητα ροής αυξηθεί σχηματίζονται σχετικά αβαθή αυλάκια ή ρυάκια (rills), καθώς η ροή γίνεται τυρβώδης (μεγαλύτερη διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα).



- **Διάβρωση Χαντακιών ή Χαραδρωτική Διάβρωση (Gully Erosion):** Ακόμη μεγαλύτερες τιμές παροχής σχηματίζουν χαντάκια που προκαλούν μόνιμη κατάτμηση του εδάφους (ροή σε σαφώς σχηματισμένη κοίτη/ σχετικά βαθιές χαράδρες βάθους μεγαλύτερου του 1m).
- b) Η **διάβρωση των υδατορευμάτων ή αξονική διάβρωση** οφείλεται στην κινητική ενέργεια που αναπτύσσει το νερό κατά τη ροή του μέσα στο υδατόρευμα, η οποία προκαλεί διάβρωση του πυθμένα της κοίτης και της βάσης των κλιτύων (υποσκαφή/ κατάρρευση υψηλότερων τμημάτων των κλιτύων). “Η αξονική διάβρωση ευνοείται κυρίως από υδρολογικούς (υψηλή παροχή/ ταχύτητα του ρέοντος ύδατος), γεωμορφολογικούς (μεγάλη κλίση της κοίτης) και λιθολογικούς (ευδιάβρωτα γαιώδη υλικά, εδάφη, πετρώματα) παράγοντες”. (Λυκούδη Ε. Ε., Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής του άνω ρου του Αχελώου, Διδακτορική Διατριβή, 2000)



Σχήμα 2.2: Μορφές υδατικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής (πηγή: Ζαρής Δ., 2019)

### 2.5.3 Ρυθμιστικοί παράγοντες διάβρωσης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της διάβρωσης του εδάφους 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 φυτοκόμηση, 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

#### 2.5.4 Μορφές στερεομεταφοράς

Υπάρχουν δύο βασικές θεωρητικές προσεγγίσεις στη διαδικασία μεταφοράς των φερτών υλών

- I. **Η θεωρία της συρτικής δύναμης (tractive force theory)**, όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Lane E. W. (1937; 1955), αποτελεί τη βάση για τις υδροδυναμικές μεθόδους υπολογισμού της στερεοπαροχής (αρχή διατήρησης μάζας και ορμής/ εξίσωση συνέχειας) και αναπτύχθηκε για οριακές συνθήκες μεταφοράς φερτών. Υποθέτει ότι κατά μήκος του καναλιού και της περιφέρειάς του υπάρχουν συνθήκες οριακών κρίσιμων διατμητικών τάσεων (για ένα αλλουβιακό κανάλι ορίζεται ως η δύναμη η οποία επαρκεί να προκαλέσει την κίνηση σωματιδίων τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα παρέμεναν στην κοίτη ή τις όχθες του). Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει γίνει με εργαστηριακά πειράματα.
- II. **Η θεωρία των φερτών σε ισορροπία (regime theory)**, όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Lindley E. S. (1919), αποτελεί τη βάση των εμπειρικών κυρίως μεθόδων υπολογισμού της στερεοπαροχής. Σύμφωνα με αυτή, ένα αλλουβιακό κανάλι μπορεί να «ρυθμίσει» τα χαρακτηριστικά του (πλάτος, βάθος, κλίση) δημιουργώντας μια δυναμική κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία να μπορεί να μεταφέρει μια ποσότητα νερού που περιέχει μια δεδομένη ποσότητα φερτών. Κατά τη διάρκεια ενός κλιματικού κύκλου θεωρείται πως το άθροισμα της καθαρής επιχωμάτωσης και διάβρωσης είναι μηδέν. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει διεξαχθεί στην ύπαιθρο.

Η μεταφορά του υλικού διάβρωσης εντός της υδρολογικής λεκάνης γίνεται με την απορροή της λεκάνης. Η μεταφορά και απόθεση των φερτών υλών εντός του υδατορεύματος εξαρτάται από την ταχύτητα του ρέοντος ύδατος, κατά τη Λυκούδη E. E. (2000), όντας συνάρτηση:

- της κλίσης της κοίτης (μορφομετρική παράμετρος)
- του βαθμού κορεσμού του νερού σε φερτές ύλες (γεωλογική παράμετρος)
- του ειδικού βάρους, του μεγέθους και του σχήματος των στερεών υλικών
- του όγκου του ρέοντος ύδατος
- της επιφάνειας διατομής της κοίτης



- της ποιότητας και ποσότητας των μεταφερόμενων φερτών (δρουν ως μέσο διάβρωσης κατά τη σύρση τους στον πυθμένα)
- της αντοχής του υλικού του πυθμένα του υδατορεύματος

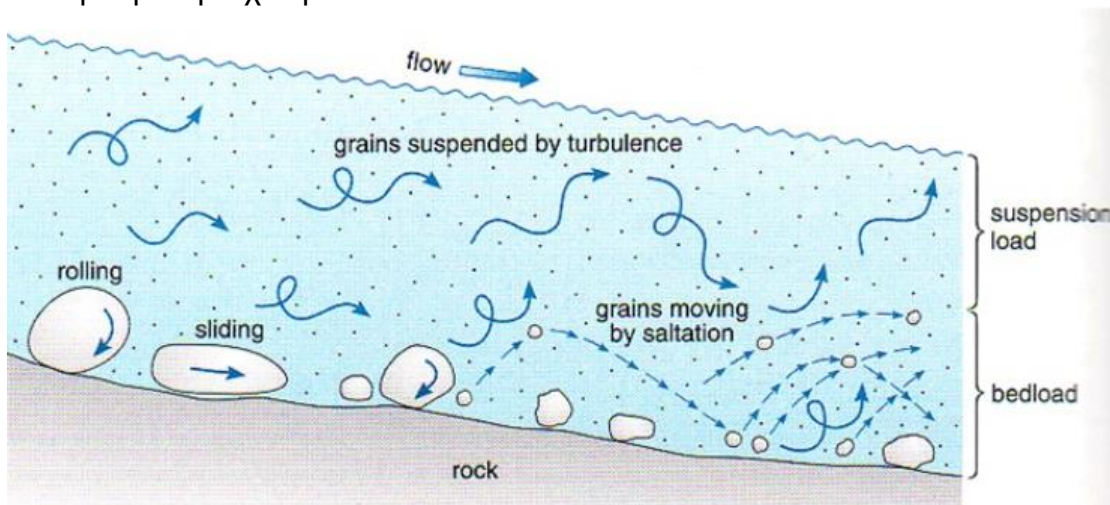
Όταν οι δυνάμεις δράσης εξασθενίσουν και η μεταφορά δεν είναι πλέον δυνατή, το υλικό εναποτίθεται.

Τα φερτά υλικά, σύμφωνα με τους Ζαρρή Δ., Λυκούδη Ε. και Κουτσογιάννη Δ. (2001), μπορούν να διακριθούν βάσει των παρακάτω:

a) Τρόπος μεταφοράς:

- **Φορτίο σε αιώρηση (suspended load)**: τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα
- **Φορτίο σε σύρση (bed load)**: τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη

Η διάκριση αυτή δε μπορεί να είναι απολύτως διακριτή καθώς φερτά υλικά του ίδιου μεγέθους και της ίδιας ορυκτολογικής σύστασης μπορεί να μεταφερθούν είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας ροής (π.χ. ταχύτητα ροής, τύρβη κτλ.). Χονδροειδώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ως “φερτά υλικά σε σύρση είναι εκείνα με μέγεθος άνω των 0.85mm” (Vanoni V. A., 1975). Η διάκριση αυτή βασίζεται στο κριτήριο που αναφέρει ότι η ταχύτητα καθίζησης γίνεται ίση με τη συρτική ταχύτητα.



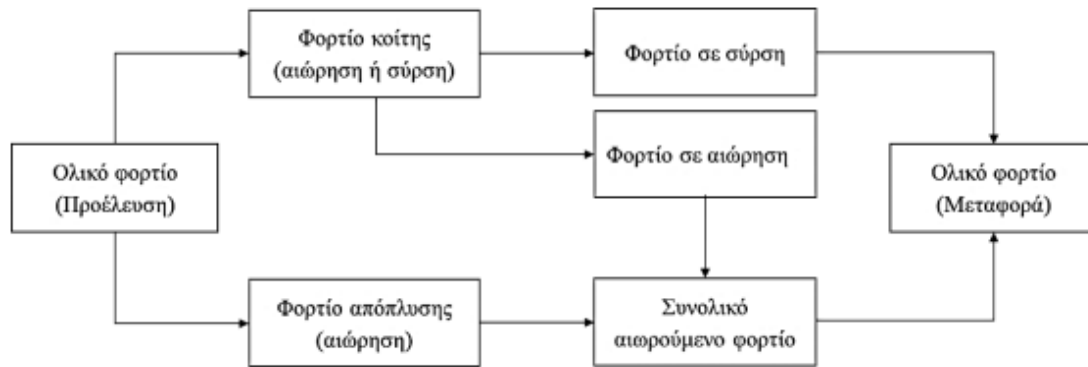
Σχήμα 2.3: Μηχανισμός στερεομεταφοράς (πηγή: [slideplayer.com](http://slideplayer.com) )

b) Προέλευση:

- **Φορτίο κοίτης (bed material load)**: μπορεί να είναι είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση και αναφέρεται σε φερτά υλικά που βρίσκονται ήδη στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου, αποτελώντας τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους
- **Φορτίο απόπλυσης (wash load)**: παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων, προερχόμενο 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



καταμεμημένο 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 στις Μεσογειακές χώρες, αποτελεί το συντριπτικό ποσοστό της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης και συνήθως μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων έντονων πλημμυρικών επεισοδίων το χρόνο



Σχήμα 2.4: Σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς (πηγή: Λυκούδη Ε. Ε. & Ζαρρής Δ., 2006)

## 2.5.5 Εκτιμήσεις εδαφικής διάβρωσης και στερεοαπορροής

“Η εκτίμηση της διάβρωσης με εργασίες υπαίθρου είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που δύσκολα μπορεί να καλύψει το σύνολο μιας λεκάνης απορροής, αλλά περιορίζεται σε πειραματικές επιφάνειες της λεκάνης” (Stefanidis P., Sarpountzis M., & Stathis D., 2002). Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη μεθόδων σχετικά με την πρόβλεψη της διάβρωσης και της υποβάθμισης του εδάφους είναι πλούσια τις τελευταίες δεκαετίες.

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

“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 περιεκτικότητας 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)





Οι δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων για την εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής είναι οι εμπειρικές (επαγωγικές) συσχετίσεις (και τα αντίστοιχα μοντέλα) και τα προσδιοριστικά/ εννοιολογικά μοντέλα, που και αυτά όμως, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, περιέχουν κάποια εμπειρική συσχέτιση που υποβλήθηκε στην ανάπτυξή τους. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι πάντα εφικτός ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ των δύο κατηγοριών.

“Γενικά, η μέτρηση αποθέσεων σε ταμειυτήρες θεωρείται από τις πλέον ενδεδειγμένες επιλογές για την εκτίμηση ποσοτήτων διάβρωσης και στερεομεταφοράς. Παρά τα συγκριτικά της πλεονεκτήματα, δε χρήζει διευρυμένης εφαρμογής εξ αιτίας της χαμηλής ιεράρχησης που καταλαμβάνει η εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους στη διαχείριση φυσικών πόρων αλλά και των υψηλών τεχνοοικονομικών απαιτήσεων.” (Βαχαβιώλος Θ. Κ., 2014)

### 2.5.5.1 Εμπειρικά μοντέλα

Με τον όρο «εμπειρικά μοντέλα στερεοαπορροής» χαρακτηρίζονται οι άμεσες συσχετίσεις της στερεοαπορροής με άλλα φυσικά μεγέθη ή χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Οι εμπειρικές συσχετίσεις προκύπτουν από κατάλληλα δεδομένα μετρήσεων και τις περισσότερες φορές χαρακτηρίζονται από έντονη τοπικότητα και όχι σημαντική αξιοπιστία. Είναι εξαιρετικά χρήσιμες στην περίπτωση εγγύτητας των συνθηκών (κλιματολογικών, υδρολογικών, γεωλογικών κτλ.) μεταξύ της περιοχής αναφοράς των σχέσεων και της υπό εξέταση περιοχής. Το σημαντικό πλεονέκτημα των εμπειρικών σχέσεων και μοντέλων είναι η απλότητα και η ευκολία στη χρήση τους.

Βασικός τύπος εμπειρικού (επαγωγικού) μοντέλου στερεοαπορροής είναι οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής (sediment discharge rating curves), που καταρτίζονται από ταυτόχρονες μετρήσεις της παροχής και της στερεοπαροχής σε μια συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος.

Η τυπική μορφή έκφρασης των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής είναι μια εξίσωση δύναμης της μορφής:

$$Q_s = a \cdot Q^b \quad (2.19)$$

όπου  $Q_s$  η στερεοπαροχή,  $Q$  η παροχή και  $a$ ,  $b$  οι παράμετροι της συσχέτισης όπως αυτοί προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Παρόμοια λογική έχουν ακολουθήσει ερευνητές για την εκτίμηση της στερεοαπορροής και με άλλους παράγοντες, όπως υδρολογικούς (βροχόπτωση, απορροή) ή και γεωλογικούς – γεωμορφολογικούς.

Μια τέτοια περίπτωση για τα ελληνικά δεδομένα είναι η σχέση των Κουτσογιάννη και Ταρλά (1987) που συσχετίζει τη στερεοαπορροή με τη γεωλογία της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.5.1.



Αντίστοιχη λογική ακολούθησαν και οι Dendy F. E. και Bolton G. C. το 1976, συσχετίζοντας την ετήσια στερεοαπορροή με την αντίστοιχη απορροή και την επιφάνεια της λεκάνης απορροής με δεδομένα αποθέσεων φερτών υλών από 800 λεκάνες κατανεμημένες σε όλην την επικράτεια των ΗΠΑ. Οι εξισώσεις της συσχέτισης που κατέληξαν, με ακρίβεια  $R^2 \approx 0.75$ , έχουν τη μορφή:

$$S_Y = 1965 \cdot Q^{0.46} \cdot (1.43 - 0.11 \cdot \log(A)), \quad Q \leq 5\text{cm} \quad (2.20)$$

$$S_Y = 1958 \cdot e^{-0.14Q} \cdot (1.43 - 0.11 \cdot \log(A)), \quad Q > 5\text{cm} \quad (2.21)$$

Μια ακόμα, απλούστερη, εξίσωση συσχέτισης, μόνο με την επιφάνεια απορροής, με ακρίβεια  $R^2 \approx 0.68$ , που κατέληξαν οι ίδιοι είναι της μορφής:

$$S_Y = 674 \cdot A^{-0.16} \quad (2.22)$$

όπου  $S_Y$  η μέση ετήσια στερεοαπορροή [ $t \cdot (km^2)^{-1}$ ],  $Q$  η μέση ετήσια απορροή [cm] και  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής [ $km^2$ ].

Το πιο διαδεδομένο από τα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης είναι η **USLE** (Universal Soil Loss Equation) που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ από τους Wischmeier W. H. και Smith D. D. (1965, 1978). Το μοντέλο αναπτύχθηκε αξιοποιώντας μεγάλη βάση δεδομένων διάβρωσης στις ΗΠΑ, βασιζόμενο και σε εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση των διάφορων παραγόντων. Η αρχική μορφή της εξίσωσης, έχει επιδεχθεί μέχρι σήμερα αρκετές προσαρμογές και βελτιώσεις. Η αναθεωρημένη της μορφή, **RUSLE** (Revised Universal Soil Loss Equation), των Renard et al. (1991, 1994), περιλαμβάνει τροποποιήσεις σε αρκετούς από τους παράγοντες της αρχικής εξίσωσης, τη βάση δεδομένων και το θεωρητικό υπόβαθρο βασικών υδρολογικών διεργασιών και διεργασιών διάβρωσης. Η τελευταία έκδοσή της, γνωστή ως **RUSLE2**, αναπτύχθηκε κυρίως από την αμερικάνικη υπηρεσία Agricultural Research Service (2002), και αποτελεί εργαλείο λογισμικού, ελεύθερα προσβάσιμο από το διαδίκτυο με τις κατάλληλες υποστηρικτικές βάσεις δεδομένων για την επικράτεια των ΗΠΑ. Η τροποποιημένη της μορφή, **MUSLE** (Modified Universal Soil Loss Equation), του Williams J. R. (1975), αφορά τον υπολογισμό της στερεοαπορροής ύστερα από μοναδιαίο επεισόδιο απορροής/ μεμονωμένη καταιγίδα.

Βασισμένο σε δεδομένα από λεκάνες απορροής των Βαλκανίων, το μοντέλο **Gavrilovic** ή **EPM** (Erosion Potential Method), του Gavrilović S. (1972), είναι ένα παραμετρικό εμπειρικό μοντέλο και χρησιμοποιείται για την ετήσια πρόβλεψη των ποσοστών εδαφολογικής διάβρωσης και της παραγωγής ιζημάτων σε μεγάλη κλίμακα. Η μέθοδος αναπτύχθηκε για την προστασία από τη διάβρωση, κυρίως στη δασική διαχείριση και τον έλεγχο των ρευμάτων.





### 2.5.5.2 Προσδιοριστικά μοντέλα

“Η ανάπτυξη τους οφείλεται στην ανάγκη υπέρβασης των αδυναμιών των εμπειρικών ομοιωμάτων. Διακρίνονται σε «φυσικά θεμελιωμένα (physically based)» (Nearing M. A., Foster G. R., Lane L. J., & Finkner S. C., 1989; Wicks J. M. & Bathurst J. C., 1996) και «εννοιολογικά ή παραμετρικά (conceptual)» (Singh V. P., 1983; Hrisanthou V., 1988)” (ΥΠΑΝ, 1999).

Τα γνωστότερα προσδιοριστικά ομοιώματα είναι το **WEPP** της USDA (Nearing M. A., Foster G. R., Lane L. J., & Finkner S. C., 1989), **CREAMS** (Knisel W. G., 1980), **KINEROS** της USDA (Woolhiser D. A., Smith R. E., & Goodrich D. C., 1990), **KINEROS: A kinematic runoff and erosion model**, 1990), **WGHM** (Lane L. J., Hernandez M., & Nichols M., 1997), **ANSWERS** (Beasley D. B., Huggins L. F., & Monke E. J., 1980), **EUROSEM** (Morgan R. P. C., et al., 1998), **SHETRAN** (Wicks J. M. & Bathurst J. C., 1996)

### 2.5.5.3 Στοχαστικά ομοιώματα

Η ανάπτυξη τους οφείλεται κατά βάση στην ανάγκη υπέρβασης των αδυναμιών των προσδιοριστικών ομοιωμάτων, κυρίως σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας.

Η έλλειψη δεδομένων στερεοπαροχής μικρού χρονικού βήματος (π.χ. ωριαία ή ημερήσια) και για μεγάλες χρονικές περιόδους, υπαγορεύει την ανάγκη «δημιουργίας» τους. Μέσω των συγκεκριμένων ομοιωμάτων, η στερεοπαροχή προσομοιώνεται στοχαστικά, λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά ενός αρχικού, αξιόπιστου, συνεχούς και χρονικά επαρκούς ιστορικού δείγματος στερεοπαροχών, οδηγώντας στη δημιουργία συνθετικών σειρών στερεοπαροχής. Ακολουθώντας, “ο προσδιορισμός της συνάρτησης κατανομής του συνθετικού δείγματος, γεγονός που αποτελείται και το βασικό πλεονέκτημα της στοχαστικής προσομοίωσης, επιτρέπει τον πιθανοτικό υπολογισμό μεγεθών (π.χ. στερεοαπορροή με περίοδο επαναφοράς  $T$  ετών, ή αντίστοιχα πιθανότητα πραγματοποίησης στερεοαπορροής μεγαλύτερης κάποιου συγκεκριμένου μεγέθους) με σημαντική περίοδο επαναφοράς (πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος του παρατηρημένου δείγματος).” (ΥΠΑΝ, 1999)

Τα περισσότερα στοχαστικά ομοιώματα κάνουν χρήση ανάλυσης χρονοσειρών (time series analysis) ή ομοιωμάτων συνάρτησης μεταφοράς (transfer function models). Κάποια από αυτά έχουν αναπτύξει οι Rodriguez-Iturbe & Nordin το 1968, οι Woolhiser & Todorovic το 1971, οι Woolhiser & Renard 1980, ο VanSickle το 1982, και ο Lemke το 1991. Ο τελευταίος ανέπτυξε ομοίωμα συνάρτησης μεταφοράς, “τα οποία γενικά πλεονεκτούν, καθώς επιτρέπουν τη χρονική υστέρηση μεταξύ της εισαγωγής δεδομένων και της απόκρισης του συστήματος, επομένως προσαρμόζονται καλύτερα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες που επικρατούν σε μια λεκάνη απορροής. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζουν την επίδραση χρονικά προηγούμενων συνθηκών της λεκάνης (π.χ. αλλαγή στις χρήσεις γης) στις τιμές των στερεοπαροχών, αποκτώντας έτσι μια πιο ρεαλιστική βάση.” (ΥΠΑΝ, 1999)



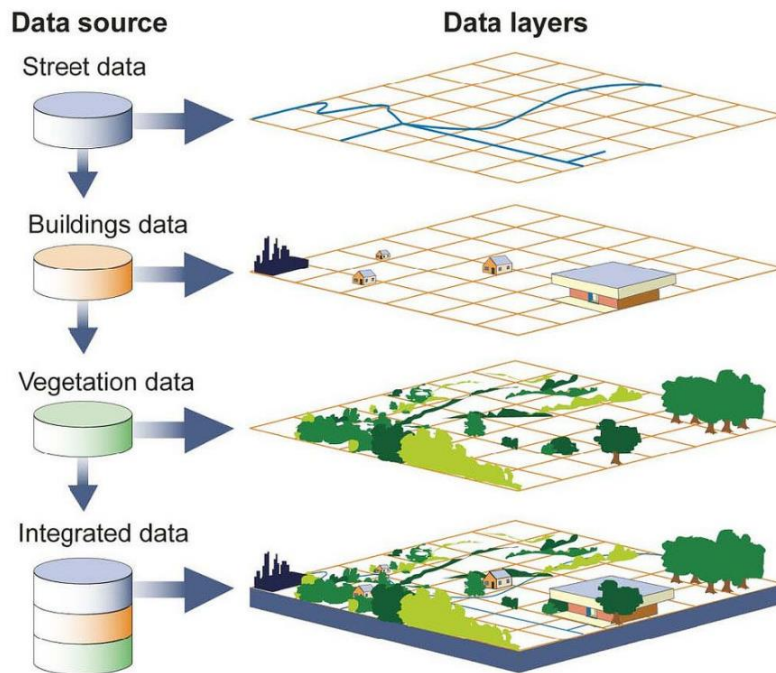
### 3 Επιλογή μεθόδων και εργαλείων

#### 3.1 ArcMap (έκδοση 10.4)



Το *ArcMap* αποτελεί μέρος της σουίτας προγραμμάτων *ArcGIS* που παρέχει το Environmental Systems Research Institute (ESRI), με έδρα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ο όρος GIS ολογράφως είναι Geographical Information System, ή αλλιώς Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ).

“Τα ΣΓΠ 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)



Σχήμα 3.1: Σύνθεση χωρικών πληροφοριών μέσω συστημάτων GIS

(πηγή: [nationalgeographic.org](http://nationalgeographic.org))

Η σημασία της εξέλιξης των ΣΓΠ είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς επέφεραν σημαντικές αλλαγές στους τομείς της σύνδεσης των χωρικών πληροφοριών με τις περιγραφικές πληροφορίες, και στη δυνατότητα πράξεων (λογικών και αριθμητικών) μεταξύ των χαρτών. Τα ΣΓΠ αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για πλήθος εφαρμογών στον τομέα των φυσικών πόρων, των μεταφορών και πολλών ακόμη, ενώ αξιοποιούνται για την εξυπηρέτηση διάφορων επιστημονικών κλάδων όπως οι επιστήμες περιβάλλοντος, οι επιστήμες υγείας, η γεωλογία κ.α.



Ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας αποτελείται από τα εξής:

- το σύστημα (hardware – operating system) του υπολογιστή
- το λογισμικό (software)
- τα χωρικά δεδομένα (data)
- τις διαδικασίες διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων (data management system)
- τους χρήστες (users)

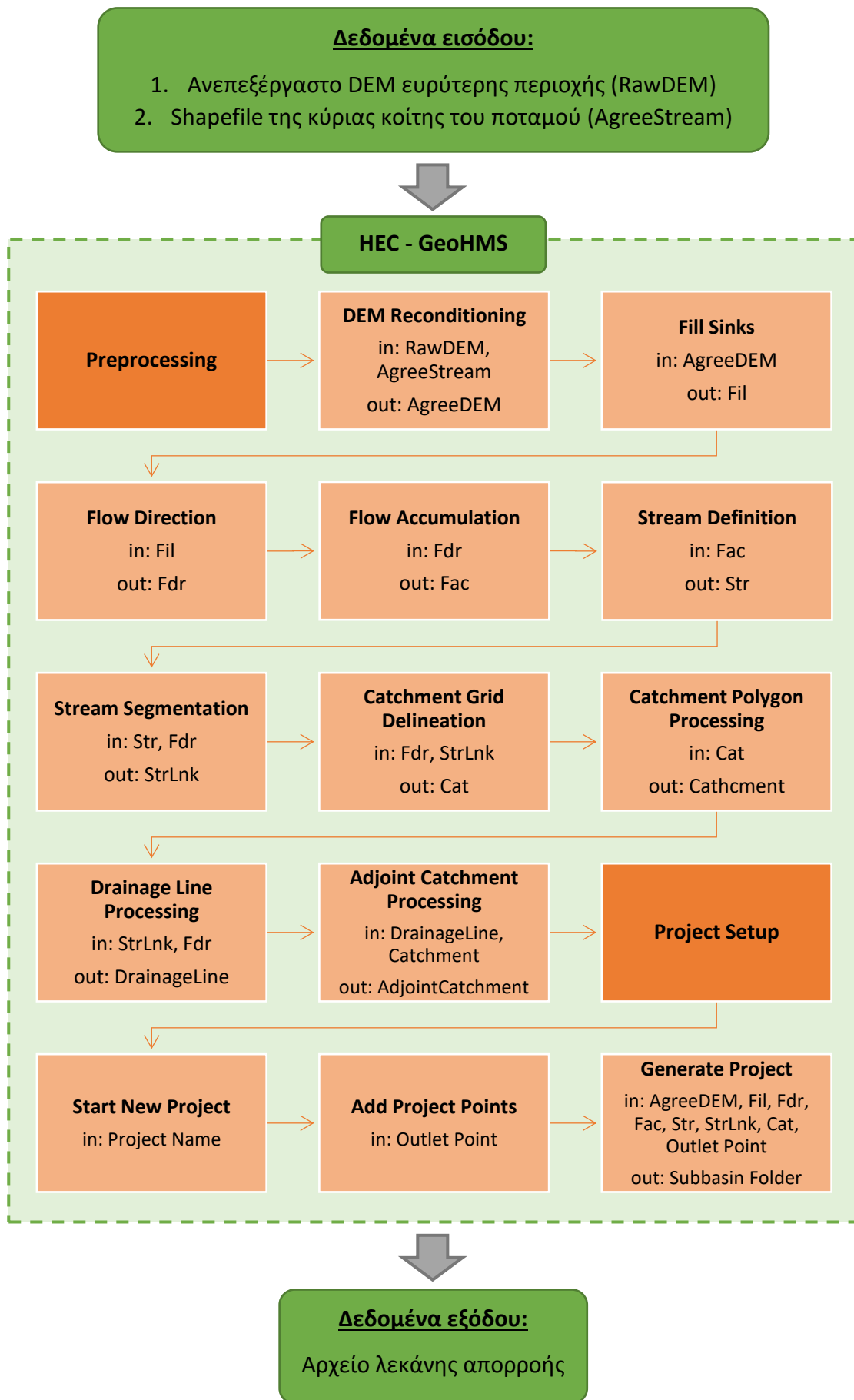
Εξαιτίας της έκτασης των εφαρμογών των ΣΓΠ, είναι φυσικό πως επηρεάζουν και τον κλάδο της Υδρολογίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί και ενταχθεί στο βασικό πρόγραμμα, *ArcMap*, εργαλείοι με κατάλληλα υπολογιστικά βήματα και διεργασίες.

### 3.1.1 HEC-GeoHMS (έκδοση 10.2)

Μία από την πληθώρα των επεκτάσεων του *ArcMap* είναι και το Geospatial Hydrologic Modeling Extension του Hydrologic Engineering Center, ή αλλιώς [HEC-GeoHMS](#), της Αμερικάνικης ομάδας μηχανικών United States Army Corps of Engineers (USACE).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ακολουθήθηκε το παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.2), ενώ τα εργαλεία, που χρησιμοποιήθηκαν για την «Γεωμορφολογική Ανάλυση» όπως είναι γνωστή στην ελληνική βιβλιογραφία, συνοπτικά αφορούν:

- DEM Reconditioning:** «Κάψιμο» του ποταμού στο DEM σε προκαθορισμένο βάθος, με σταδιακή αλλαγή του υψομέτρου γύρω από αυτόν.
- Fill Sinks:** Διόρθωση του DEM με πλήρωση των ταπεινώσεων και τοπικών βυθισμάτων που δημιουργούν ασυνέχειες.
- Flow Direction:** Προσδιορισμός κατεύθυνσης ροής νερού από κάθε κελί
- Flow Accumulation:** Προσδιορισμός πλήθους ανάντη κελιών που απορρέουν σε κάθε κελί
- Stream Definition:** Παραγωγή διακλαδώσεων ποταμού σύμφωνα με μια προκαθορισμένη τιμή (threshold)
- Stream Segmentation:** Τμηματοποίηση του παραπάνω ποταμού σε τμήματα μεταξύ δύο διαδοχικών συμβολών, μεταξύ συμβολής και χωρισμού ροής, ή και συμβολής και σημείου εξόδου της λεκάνης.
- Catchment Grid Delineation:** Προσδιορισμός της λεκάνης απορροής που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα ποταμού.
- Catchment Polygon Processing:** Δημιουργία αρχείου .shp με τις παραπάνω λεκάνες απορροής
- Drainage Line Processing:** Δημιουργία αρχείου .shp με τον ποταμό που ορίστηκε στο βήμα (v).
- Adjoint Catchment Processing:** Βήμα χρήσιμο για μείωση του υπολογιστικού κόστους, χωρίς κάποια υδρολογική σημασία.
- Add Project Points:** Ο χρήστης ορίζει το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για την οποία θέλει να παράξει το φάκελο με τα παραπάνω αρχεία, και ουσιαστικά, θέλει να μελετήσει.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του HEC-GeoHMS για την παρούσα εργασία



### 3.2 HEC-HMS (έκδοση 4.5)

“Η τυχαιότητα και η πολυπλοκότητα που ενέχουν οι υδρολογικές μεταβλητές, καθώς και η δυσκολία για καταγραφή δεδομένων παροχής, οδήγησαν στην κατασκευή μοντέλων για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της βροχής και τον υπολογισμό των παροχών.” (Δήμος Χ. Σ., 2019)



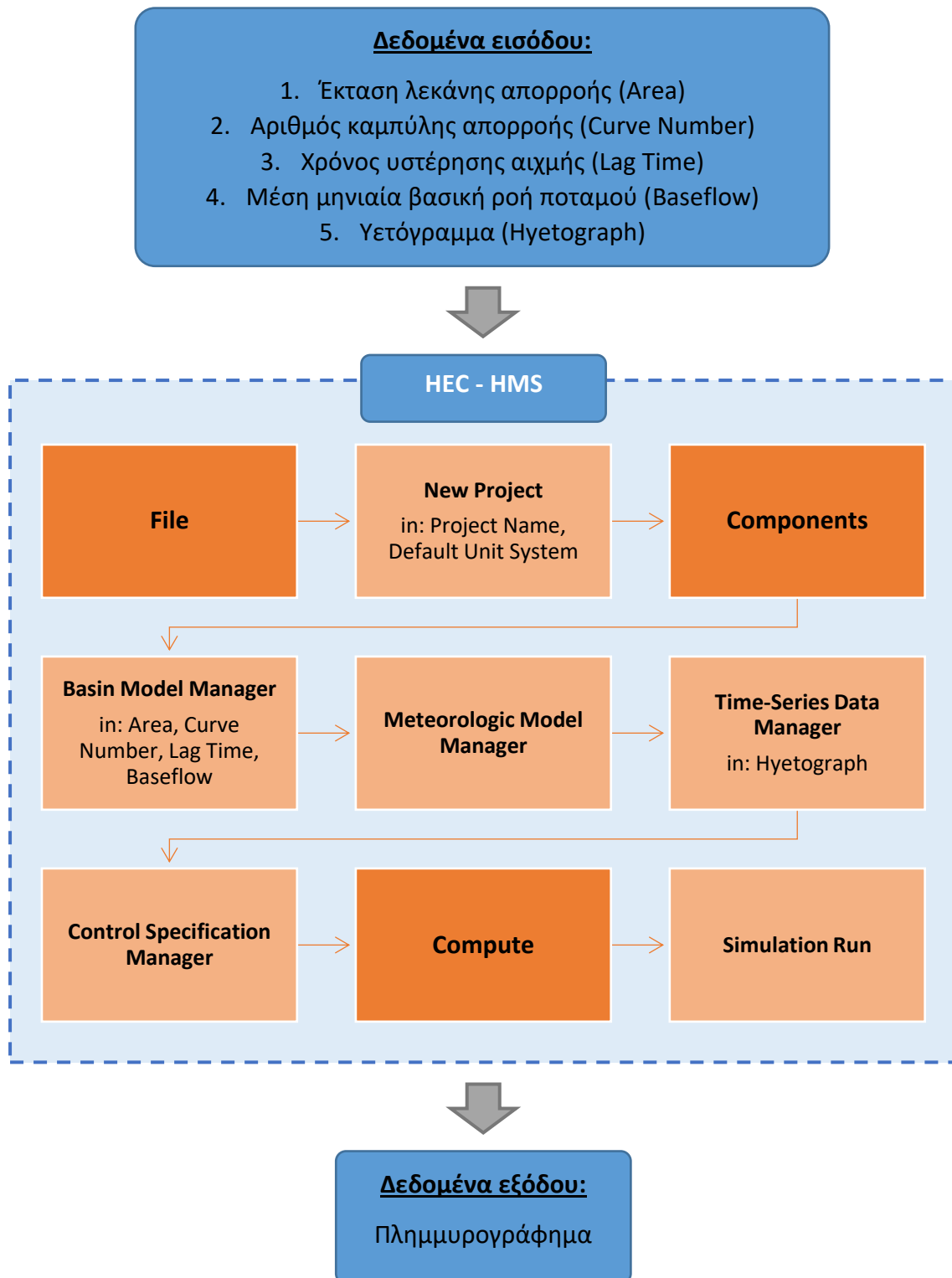
Ένα από αυτά είναι και το ελεύθερο λογισμικό Hydrologic Modelling System, ή αλλιώς [HEC-HMS](#), της USACE, ασχολείται με την προσομοίωση του συνόλου των υδρολογικών διεργασιών που αναπτύσσονται σε λεκάνες απορροής με δενδριτικά συστήματα. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί κλασσικές υδρολογικές έννοιες όπως η διείσδυση και το μοναδιαίο υδρογράφημα και όχι μόνο. Ταυτόχρονα, αποθηκεύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε ένα αρχείο .dss με το οποίο γίνεται, γρήγορα και εύκολα, η μεταφορά και χρήση τους σε άλλα υδρολογικά/ υδραυλικά προγράμματα, όπως το *HEC-RAS*.

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

- ❖ Μοντέλο λεκάνης απορροής
- ❖ Μετεωρολογικό μοντέλο
- ❖ Μοντέλο υπολογισμού υδρολογικών απωλειών
- ❖ Μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής
- ❖ Μοντέλο υπολογισμού βασικής απορροής
- ❖ Μοντέλο υδρολογικής διόδευσης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ακολουθήθηκε το παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.3), ενώ τα στοιχεία/ μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, συνοπτικά, είναι:

- i. **Έκταση** της λεκάνης απορροής, όπως αυτή προκύπτει από το *ArcMap*
- ii. Μέθοδος προσέγγισης της ενεργής βροχόπτωσης κατά **SCS**, σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.4
- iii. **Χρόνος υστέρησης αιχμής** της λεκάνης απορροής σύμφωνα με την εξίσωση (2.2)
- iv. **Υετόγραμμα** που παράχθηκε σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.3



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής του προγράμματος HEC-HMS για την παρούσα εργασία



### 3.3 HEC-RAS (έκδοση 5.0.7)



Για την υδραυλική προσομοίωση ενός πλημμυρικού επεισοδίου έχει αναπτυχθεί ποικιλία λογισμικών, ερευνητικών (LISFLOOD) και μη (TELEMAC, HEC-RAS), ανάλογα με τη λεπτομέρεια που ζητείται. Για ανάλυση του πλημμυρικού επεισοδίου σε επίπεδο λεκάνης απορροής ενδείκνυται η χρήση του ελεύθερου λογισμικού River Analysis System, ή αλλιώς HEC-RAS, της USACE. Το πρόγραμμα δίνει τις δυνατότητες:

- ❖ Μονοδιάστατη (1D) προσομοίωση ομοιόμορφης ροής (Αρχή Διατήρησης Ενέργειας)
- ❖ Μονοδιάστατη (1D) / Διδιάστατη (2D) προσομοίωση ανομοιόμορφης ροής (Αρχή Διατήρησης της Μάζας (Εξίσωση Συνέχειας), Αρχής Διατήρησης της Ορμής (Εξίσωση Navier-Stokes), Θεώρημα Απόκλισης του Gauss)
- ❖ Μοντέλα μεταφοράς ιζήματος
- ❖ Μοντέλα θερμοκρασίας και ποιότητας του νερού

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι εργασίες που εκτελέστηκαν, όπως φαίνονται στο αντίστοιχο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.4), συνοπτικά, αφορούν:

- i. **RAS Mapper:**
  - Ορισμός του προβολικού συστήματος αναφοράς σε ΕΓΣΑ '87
  - Εισαγωγή του DEM και του χάρτη με τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning,  $n$ , της ευρύτερης περιοχής
  - Προσδιορισμός της περιοχής προσομοίωσης και του κανάβου της, των αξόνων ενδιαφέροντος (π.χ. άξονες ποταμών, άξονας γέφυρας) και των θέσεων όπου θα ισχύουν οι οριακές συνθήκες (ανάντη και κατόντη)
- ii. **Geometric Data:**
  - Προσδιορισμός γεωμετρίας θέσεων ενδιαφέροντος (π.χ. κτήρια, γέφυρες)
- iii. **Unsteady Flow Data:**
  - Προσδιορισμός των τιμών του πλημμυρογραφήματος στην είσοδο της περιοχής μελέτης
  - Προσδιορισμός του τύπου της ροής στην έξοδο της περιοχής μελέτης
- iv. **Unsteady Flow Analysis:**
  - Επιλογή χρονικού βήματος υπολογισμών προσομοίωσης και εξαγόμενων στιγμών της πλημμυρικής ροής





Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής του προγράμματος HEC-RAS για την παρούσα εργασία



### 3.4 Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (ΑΠΕΕΑ ή RUSLE)

Το μοντέλο RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) ή ΑΠΕΕΑ (Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας), που αναπτύχθηκε από τους Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A. και Porter G. P. το 1991, και στη συνέχεια βελτιώθηκε από τους Renard K. G., Foster G. R., Yoder D. C. και McCool D. K. το 1994, “θεωρείται το πιο διαδεδομένο μοντέλο εκτίμησης της υδατικής διάβρωσης παγκοσμίως” (Ασλάνης Π., 2018). Επικεντρώνεται στην εκτίμηση της εδαφικής απώλειας που προκαλείται από επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση, χωρίς να συμπεριλαμβάνει τις επιπτώσεις της συγκεντρωμένης απορροής (gully erosion).

Η μαθηματική εξίσωση που διέπει το μοντέλο παραμένει ίδια με εκείνη του αρχικού μοντέλου USLE (Universal Soil Loss Equation) ή ΠΕΕΑ (Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας), που αναπτύχθηκε από τους Wischmeier W. H. και Smith D. D., το 1965 και 1978, για την εδαφική διάβρωση σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Η εν λόγω εξίσωση έχει τη μορφή:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3.1)$$

όπου **A** η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση [ $t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$ ], **R** ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης [ $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot y^{-1}$ ], **K** ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους [ $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ], **L** ο συντελεστής μήκους κλίσης, **S** ο συντελεστής βαθμού κλίσης, **C** ο συντελεστής φυτοκάλυψης και **P** ο συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης.

#### 3.4.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity Factor), R

“Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης θεωρείται πως έχει τη σημαντικότερη επίδραση στο ενδεχόμενο ανάπτυξης εδαφικής διάβρωσης” (Renard K. G. & Freimund J. R., 1994). Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο και ευμετάβλητο μέγεθος, σε ετήσια, εποχική και μηνιαία βάση, ακόμα και στο επίπεδο των επιμέρους επεισοδίων βροχής. Για τον λόγο αυτό, για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστων και αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων είναι επιθυμητή η ύπαρξη πολυετών (> 20 ετών) αναλυτικών βροχομετρικών δεδομένων.

##### 3.4.1.1 Αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή R

Ο μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, σύμφωνα με τους Renard K. G. και Freimund J. R., από το έργο τους, το 1994, πάνω στην εξίσωση των Brown L. C. και Foster G. R. (1987), υπολογίζεται από τη εξίσωση:



$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E \cdot I_{30})_k \right]_j \quad (3.2)$$

όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ],  $n$  τα έτη των διαθέσιμων μετρήσεων,  $m$  τα επεισόδια βροχοπτώσεων,  $E$  η κινητική ενέργεια της βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] και  $I_{30}$  η μέγιστη ένταση μισάωρου [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

Η κινητική ενέργεια της βροχής  $E$  μπορεί να υπολογιστεί από τη:

$$E = \sum_{r=1}^m e_r \cdot \Delta V_r \quad (3.3)$$

όπου  $m$  τα επιμέρους διαστήματα επεισοδίου βροχής με σταθερή βροχόπτωση,  $e_r$  η ειδική κινητική ενέργεια του επιμέρους διαστήματος επεισοδίου βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] και  $\Delta V_r$  το ύψος βροχής του επιμέρους διαστήματος [ $\text{mm}$ ].

Η ειδική κινητική ενέργεια κάθε επιμέρους διαστήματος βροχής σταθερής έντασης, όπως προκύπτει από τη βελτιωμένη εξίσωση της αρχικής, των Brown L. C. και Foster G. R. (1987), σύμφωνα με την οποία:

$$e_r = 0.29 \cdot (1 - 0.72 \cdot e^{-0.05 \cdot i_r}) \quad (3.4)$$

όπου  $e_r$  η ειδική κινητική ενέργεια του επιμέρους διαστήματος [ $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] και  $i_r$  η ένταση της βροχής του επιμέρους διαστήματος [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

### 3.4.1.2 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή R

Για να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω εξισώσεις, είναι απαραίτητη η ύπαρξη επαρκών και αξιόπιστων δεδομένων βροχής, που στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι διαθέσιμα. Για την αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών έχουν αναπτυχθεί πολλές εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή R, συσχετίζοντάς τον είτε με τη μέση ετήσια βροχόπτωση είτε με τον τροποποιημένο δείκτη Fournier.

- Τροποποιημένος δείκτης Fournier (Modified Fournier Index, MFI)

Θεμελιωτής της συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή R και του τροποποιημένου δείκτη Fournier, θεωρείται ο Arnoldus H. M. J. (1977), ο οποίος πέτυχε αρχικά μια φτωχή συσχέτιση ( $R^2 \approx 0.55$ ), μεταξύ του



συντελεστής διαβρωτικότητας  $R$  και του τροποποιημένου δείκτη Fournier, για την περιοχή του Μαρόκο. Ο τροποποιημένος δείκτης Fournier προκύπτει από τη εξίσωση:

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (3.5)$$

$$R = 0.264 \cdot MFI^{1.5} \quad (3.6)$$

όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ],  $MFI$  ο τροποποιημένος δείκτης Fournier [ $\text{mm}$ ],  $p_i$  η μέση μηνιαία βροχόπτωση [ $\text{mm}$ ] και  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση [ $\text{mm}$ ].

Οι Renard K. G. και Freimund J. R. (1994) πέτυχαν σημαντική αύξηση της συσχέτισης ( $R^2 \approx 0.81$  και  $R^2 \approx 0.75$ ) για την περιοχή των ΗΠΑ, καταλήγοντας στις σχέσεις:

$$R = 0.07397 \cdot MFI^{1.847}, \quad MFI \leq 55\text{mm} \quad (3.7)$$

$$R = 95.77 - 6.081 \cdot MFI + 0.477 \cdot MFI^2, \quad MFI > 55\text{mm} \quad (3.8)$$

όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ].

Η συσχέτιση του συντελεστή διαβρωτικότητας με τον τροποποιημένο δείκτη Fournier συνήθως καταλήγει σε πιο ορθές εκτιμήσεις από ότι οι αντίστοιχες σχέσεις με τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Η χρήση του δείκτη MFI λαμβάνει υπόψη την εποχική διακύμανση της βροχής και την εν γένει αυξητική επίδραση που έχει στο συντελεστή διαβρωτικότητας.

Οι Ferro V., Porto P. και Yu B., το 1999, αναγνώρισαν μεν την καλή συσχέτιση μεταξύ του δείκτη MFI με το συντελεστή  $R$  και το γεγονός πως ο δείκτης MFI συνυπολογίζει την εποχική διακύμανση, ανέδειξαν όμως με τη χρήση μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων πως ο τροποποιημένος δείκτης Fournier ενδέχεται να εμφανίζει γραμμική συσχέτιση με τη μέση ετήσια βροχόπτωση.

Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών αυτών γίνεται πιο ισχυρή όσο πιο ομοιογενές παρουσιάζεται το ετήσιο καθεστώς βροχοπτώσεων, όσο δηλαδή η ετήσια βροχόπτωση ισοκατανέμεται στις αντίστοιχες μηνιαίες τιμές. Περιοχές που παρουσιάζουν σχετικά ισοκατανεμημένο καθεστώς βροχοπτώσεων εντοπίζονται σε τροπικές κλιματικές συνθήκες αλλά και, στο επίπεδο της Ευρωπαϊκής ηπείρου, σε περιοχές της κεντρικής «ηπειρωτικής» Ευρώπης.



Αντίθετα, σε περιοχές όπως οι Μεσογειακές, με ως επί το πλείστον ανομοιογενές καθεστώς βροχοπτώσεων, δεν υπάρχει κίνδυνος γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του δείκτη MFI και της μέση ετήσιας βροχόπτωσης, καθώς η εποχική διακύμανση είναι σαφής. Το πρόβλημα που μπορεί να ανακύψει σε αυτήν την περίπτωση είναι ορισμένες ακραίες τιμές του δείκτη Fournier να αυξήσουν υπερβολικά τις ετήσιες τιμές, οδηγώντας έτσι σε υπερεκτιμήσεις τιμών ετήσιας διαβρωτικότητας.

Σε προσπάθεια αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος οι Ferro V., Giordano G. και Iovino M. (1991) εισήγαγαν την έννοια του υπερετήσιου τροποποιημένου συντελεστή Fournier  $F_F$ , του μέσου δηλαδή MFI για ένα σύνολο  $N$  ετών. Μέσω του  $F_F$  είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν τόσο προβλήματα γραμμικής συσχέτισης του MFI με τη μέση ετήσια βροχόπτωση, όσο και περιπτώσεις εξομάλυνσης ακραίων εποχικών διακυμάνσεων. Ο υπερετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier  $F_F$  και ο συντελεστής  $R$  ( $R^2 \approx 0.63$ ), προκύπτει ως:

$$F_F = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N MFI_j \quad (3.9)$$

$$R = 0.5249 \cdot F_F^{1.59} \quad (3.10)$$

όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ],  $F_F$  ο υπερετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier [mm] και  $N$  το πλήθος των ετών.

- Μέση ετήσια βροχόπτωση (Mean Annual Precipitation,  $P$ )

Οι Renard K. G. και Freimund J. R. (1994) σε μια προσπάθεια να συσχετίσουν το συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχής  $R$  με τη μέση ετήσια βροχόπτωση  $P$ , στις ΗΠΑ, κατέληξαν στις σχέσεις με υψηλή συσχέτιση ( $R^2 \approx 0.81$  και  $R^2 \approx 0.73$ ):

$$R = 0.04830 \cdot P^{1.61}, \quad P \leq 850\text{mm} \quad (3.11)$$

$$R = 587.8 - 1.219 \cdot P + 0.004105 \cdot P^2, \quad P > 850\text{mm} \quad (3.12)$$



όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ] και  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση [ $\text{mm}$ ].

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, και συγκεκριμένα για την περιοχή της Τοσκάνης στην Ιταλία, οι Van der Knijff J. M., Jones R. J. A. και Montanarella L. (2000), αξιοποιώντας δεδομένα από 25 σταθμούς με εύρος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από 600 έως 1200mm, κατέληξαν στην εξίσωση, που θεωρείται πως αποδίδει εξαιρετικά για τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου:

$$R = a \cdot P \quad (3.13)$$

όπου  $R$  ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής [ $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ],  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση [ $\text{mm}$ ] και  $a$  κατάλληλος συντελεστής<sup>2</sup> [ $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ ].

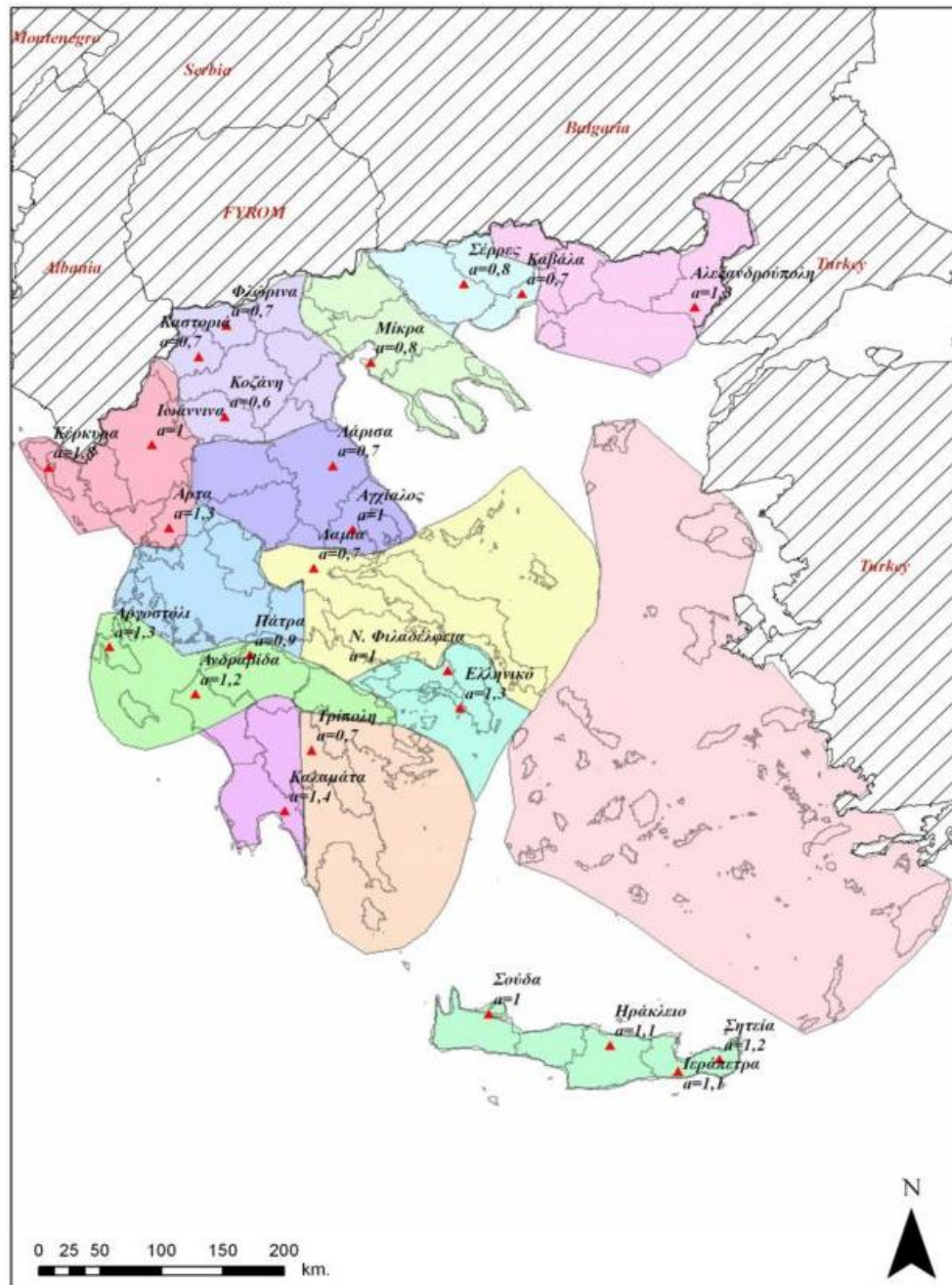
Στον ελληνικό χώρο, ο Φλαμπούρης Κ. Π. το 2008, ακολουθώντας παρόμοια λογική με την παραπάνω εξίσωση, επεξεργάστηκε συσχετίσεις μεταξύ της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και του συντελεστή διαβρωτικότητας  $R$  για διάφορους σταθμούς της Ελλάδας. Από την επεξεργασία, πέρα από γραμμικές σχέσεις της μορφής  $y = a + b \cdot x$  με συσχέτιση  $R^2$ , προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή  $a$  για διάφορες περιοχές της χώρας και ο αντίστοιχος ισοτιμικός χάρτης.

Πίνακας 3.1: Συντελεστής  $a$  για μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελλάδας (πηγή: Φλαμπούρης Κ., 2008)

α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός	$a$	α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός	$a$
1	ΑΓΧΙΑΛΟΣ	1.0	13	ΚΟΖΑΝΗ	0.8
2	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	1.3	14	ΚΕΡΚΥΡΑ	1.8
3	ΑΝΔΡΑΒΙΔΑ	1.3	15	ΛΑΜΙΑ	0.7
4	ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	1.3	16	ΛΑΡΙΣΑ	0.8
5	ΑΡΤΑ	1.3	17	ΜΙΚΡΑ	0.8
6	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	1.3	18	ΠΑΤΡΑ	0.9
7	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	1.1	19	ΣΕΡΡΕΣ	0.8
8	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1.1	20	ΣΗΤΕΙΑ	1.2
9	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	1.0	21	ΣΟΥΔΑ	1.0
10	ΚΑΒΑΛΑ	0.7	22	ΤΡΙΠΟΛΗ	0.7
11	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	1.4	23	Ν. ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑ	1.0
12	ΚΑΣΤΟΡΙΑ	0.7	24	ΦΛΩΡΙΝΑ	0.7

<sup>2</sup> Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 1.3 στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πιο ακριβείς μετρήσεις για την εκάστοτε περιοχή μελέτης.





Εικόνα 3.1: Ισοτιμικός χάρτης συντελεστή  $\alpha$  (πηγή: Φλαμπούρης Κ., 2008)

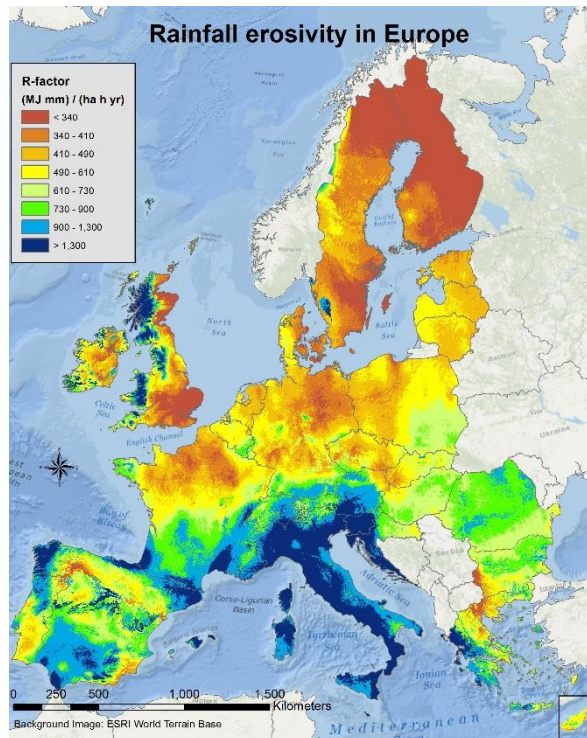
Ανάλογα με τη γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, έχουν παραχθεί ποικίλες εξισώσεις συσχέτισης, από διάφορους μελετητές, και σύμφωνα με τον Βαχαβιώλο Θ. Κ. (2014) “η επιλογή της καταλληλότερης εξίσωσης για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχοπτώσεως, καθορίζεται από τρεις κυρίως παράγοντες:

- i. την εγγύτητα της περιοχής μελέτης με την περιοχή εξαγωγής της εμπειρικής εξίσωσης
- ii. την ενότητα κλιματικών χαρακτηριστικών και καθεστώτος βροχοπτώσεων
- iii. τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα”





Σε μια προσπάθεια προσδιορισμού του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης,  $R$ , στο επίπεδο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., Tadić M. P., Michaelides S., Hrabalíková M., Olsen P. και Aalto J. (2015a), αξιοποιώντας της βάση δεδομένων REDES, παρήγαγαν αντίστοιχο χάρτη, ανάλυσης 500x500 [m], που διατίθεται δωρεάν από την ESDAC.



Σχήμα 3.5: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης,  $R$ , της ESDAC

(πηγή: [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu))

### 3.4.2 Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil Erodibility Factor), $K$

Σύμφωνα με τα εγχειρίδια των USLE και RUSLE, για τα εδάφη των ΗΠΑ, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους  $K$ , προσδιορίζεται μέσω νομογραφημάτων (Σχήμα 3.6), ή στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο είναι <70%, τότε υπολογίζεται από τη εξίσωση που πρότειναν οι Wischmeier W. H. και Smith D. D. (1978):

$$K = \frac{[0.00021(12 - OM)M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]}{100} \quad (3.14)$$

όπου  $K$  ο συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας [ $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ],  $OM$  ποσοστό οργανικής ουσίας,  $M = [(100 - A_c) \cdot (L + A_{rmi})]$  δομή επιφανειακή εδαφικής



στρώσης όπου  $A_c$  ποσοστό αργίλου (<0.002mm),  $L$  ποσοστό ιλύος (0.002~0.05mm),  $A_{rmf}$  ποσοστό άμμου (0.05~0.1mm),  $s$  εδαφική δομή και  $\rho$  διαπερατότητα εδάφους.

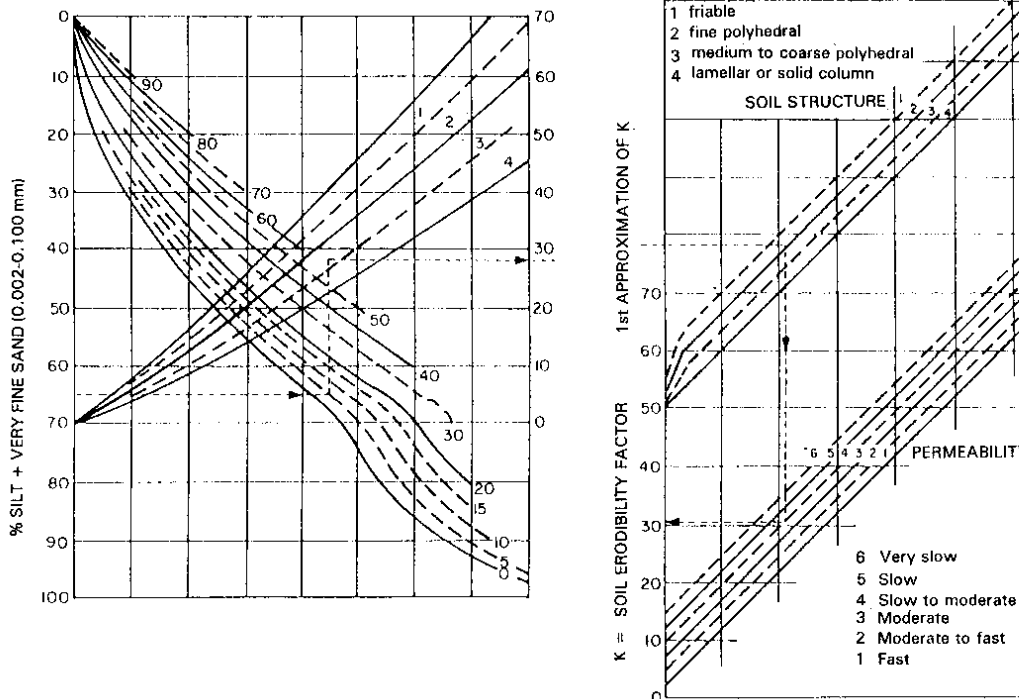
Μεταγενέστερη έρευνα των Römken M. J. M., Prasad S. N. και Poesen J. W. A. (1986), σε παγκόσμιο επίπεδο, κατέληξε σε σχέση, που μπορεί να καλύψει αρτιότερα την ποικιλία των γεωλογικών χαρακτηριστικών, της μορφής:

$$K = 0.0034 + 0.0405 \cdot \exp \left[ -0.5 \cdot \left( \frac{\log(D_g) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

όπου  $D_g$  η μέση διάσταση των σωματιδίων του επιφανειακού εδαφικού στρώματος που προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$D_g = \exp \left( \sum f_i \cdot \ln \left( \frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) \right) \quad (3.16)$$

όπου για κάθε κατηγορία σωματιδίων (άργιλο, ιλύ, άμμο) είναι  $d_i$  η μέγιστη διάσταση σωματιδίου [mm],  $d_{i-1}$  η ελάχιστη διάσταση σωματιδίου [mm] και  $f_i$  το κλάσμα μάζας κατηγορίας σωματιδίων επί της συνολικής εδαφικής μάζας.



Σχήμα 3.6: Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας,  $K$

(πηγή: [fao.org](http://fao.org))



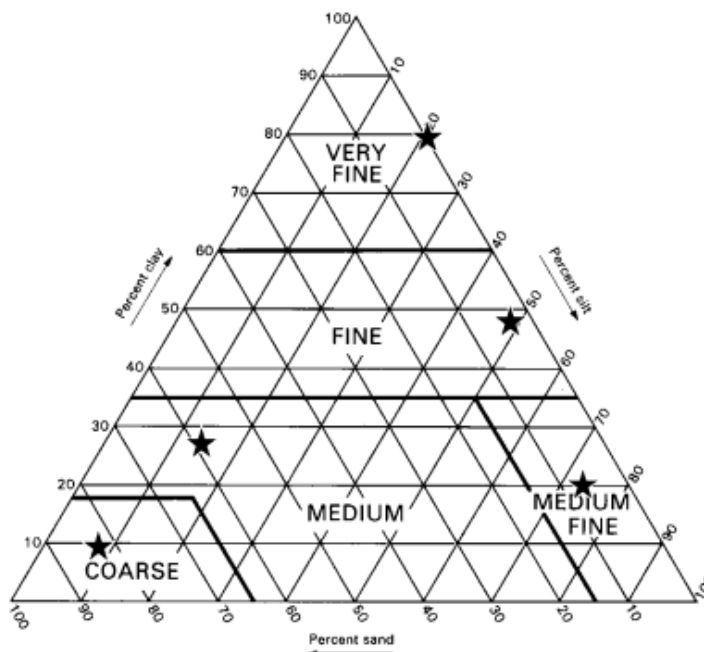
“Η πιο δόκιμη διαδικασία για τον καθορισμό του συντελεστή  $K_m$  σε οποιαδήποτε περιοχή μελέτης, είναι η συλλογή εδαφικών δειγμάτων από κάθε γεωλογική/εδαφική δομή που εμφανίζεται στην περιοχή, ο προσδιορισμός, μέσω εργαστηριακών αναλύσεων των εδαφικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται από τις παραπάνω σχέσεις, και ακόλουθα ο προσδιορισμός των τιμών του  $K$ .” (Βαχαβιώλος Θ. Κ., 2014)

Σε περιπτώσεις αδυναμίας συλλογής και επεξεργασίας εδαφικών δειγμάτων, μπορεί να γίνει επιλογή τιμών εδαφικής διαβρωσιμότητας βιβλιογραφικά, με άντληση τιμών  $K$  για τους ζητούμενους εδαφικούς και γεωλογικούς σχηματισμούς από ερευνητικές εργασίες. Η πρακτική αυτή ακολουθείται ήδη από τις πρώτες δεκαετίες εφαρμογής της USLE, καθώς στο εγχειρίδιο της μεθόδου επισυνάπτονται τιμές  $K$  για μια σειρά εδαφών από τους Wischmeier W. H. και Smith D. D. (1965, 1978). Ανάλογες τιμές παρέχονται για τον Ευρωπαϊκό χώρο από τους Van der Knijff J. M., Jones R. J. A. και Montanarella L. (2000a, b) στον πίνακα του σχήματος 3.7.

TEXT	Dominant surface textural class. (Present in: STU)	% clay	% silt	% sand	K
0	No information	-	-	-	
9	No texture (histosols, ...)	-	-	-	
1	Coarse (clay < 18 % and sand > 65 %)	9	8	83	0.0115
2	Medium (18% < clay < 35% and sand > 15%, or clay < 18% and 15% < sand < 65%)	27	15	58	0.0311
3	Medium fine (clay < 35 % and sand < 15 %)	18	74	8	0.0438
4	Fine (35 % < clay < 60 %)	48	48	4	0.0339
5	Very fine (clay > 60 %)	80	20	0	0.0170

Σχήμα 3.7: Τιμές συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας,  $K$ , για αντιπροσωπευτικά εδάφη

(πηγή: Van der Knijff et al. 2000)



Σχήμα 3.8: Θέσεις αντιπροσωπευτικών εδαφών στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών

(πηγή: Van der Knijff et al. 2000)



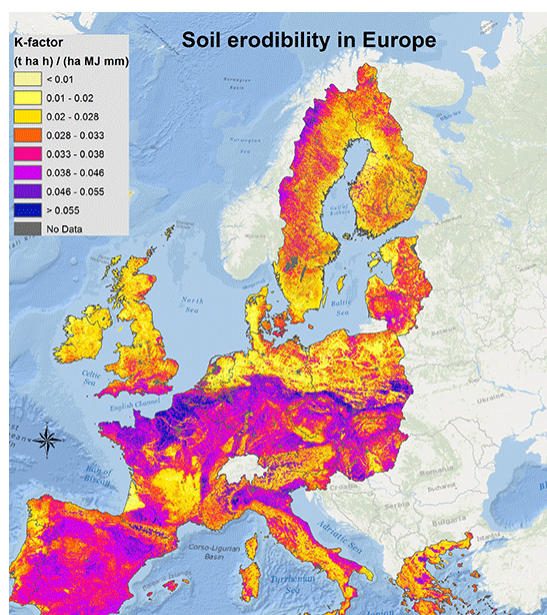
Ειδικά για την περιοχή του Σπερχειού ποταμού στην Ελλάδα, σύμφωνα με τους Sigalos G., Loukaidi V. Dasaklis S. και Alexouli-Livaditi A. (2010), οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής, βάσει όχι μόνο του είδους τους αλλά και της ηλικίας και της γεωτεκτονικής μονάδας που ανήκουν, λαμβάνουν τιμές συντελεστή διαβρωσιμότητας  $K$  όπως στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας,  $K$ , του μοντέλου RUSLE, για τα εδάφη της περιοχής του Σπερχειού ποταμού, Ελλάδα (πηγή: Sigalos G. et al., 2010)

Γεωλογικός Σχηματισμός	Συντελεστής Εδαφικής Διαβρωσιμότητας, $K$
Οφιολίτες	0.0005
Ασβεστόλιθοι/ Δολομίτες	0.00055~0.00085
Συγχωνεύσεις μαζών	0.003
Αλλούβια	0.0035
Ψαμμίτες	0.015
Φλύσχος	0.02~0.03
Σχιστόλιθοι	0.025
Λατυποπαγές	0.045

Όσον αφορά τον Ευρωπαϊκό χώρο, με αφετηρία τις εργασίες των προηγούμενων μελετητών, έχει δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων με τιμές εδαφικής διαβρωσιμότητας ανά την Ευρώπη, υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission) και συγκεκριμένα του Ευρωπαϊκού Γραφείου Εδαφών (European Soil Bureau).

Οι Panagos P., Meusburger K., Ballabio C., Borrelli P. και Alewell C. (2014b), αξιοποιώντας τις βάσεις δεδομένων LUCAS Soil, European Soil Database και LUCAS Earth Observation, κατέληξαν σε χάρτη, ανάλυσης 500x500 [m], με τις διάφορες τιμές του συντελεστή  $K$  για όλα τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. Η ψηφιακή μορφή του χάρτη διατίθεται δωρεάν από την ESDAC (European Soil Data Centre).



Σχήμα 3.9: Χάρτης συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας,  $K$ , της ESDAC

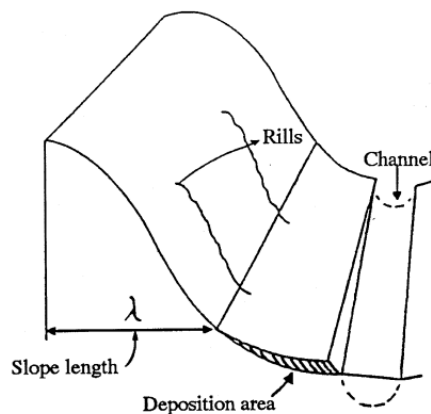
(πηγή: [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu))



### 3.4.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (Slope Length & Steepness Factor), LS

Παρότι το μήκος πλαγιάς και ο βαθμός κλίσης του εδάφους αφορούν ξεχωριστούς αδιάστατους συντελεστές, L και S αντίστοιχα, οι μελετητές τους συνδυάζουν σε έναν, αδιάστατο, τοπογραφικό συντελεστή ή συντελεστή ανάγλυφου, LS. Ο συντελεστής προσδιορίζει την επίδραση της γεωμορφολογίας και του ανάγλυφου στην παραγωγή εδαφικής απώλειας, η οποία “εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές του βαθμού κλίσης έναντι του μήκους κλίσης της πλαγιάς”. (McCool D. K., Brown L. C., Foster G. R., Mutchler C. K., & Meyer L. D., 1987)

Το μήκος της πλαγιάς ( $\lambda$ ), είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής (sheet) ή φυλλοειδούς διάβρωσης (inter-rill erosion) και της διάβρωσης ρυακίων ή αυλακωτής διάβρωσης (rill erosion), και “ορίζεται ως το μήκος που περιγράφει την απόσταση από την κορυφή της πλαγιάς μέχρι το σημείο που ξεκινά η εναπόθεση, κοντά στη βάση της πλαγιάς”. (Ευθυμίου Ν. Γ., 2016)



Σχήμα 3.10: Μήκος πλαγιάς,  $\lambda$  (πηγή: Renard et al. 1996)

Στο εγχειρίδιο 537 (1978) του υπουργείου Γεωργίας της Αμερικής, το οποίο αποτελεί επέκταση του εγχειριδίου 282, οι Wischmeier W. H. και Smith D. D. αναφέρουν πως ο συντελεστής αναγλύφου LS προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2(\beta) + 4.56 \cdot \sin(\beta) + 0.065) \quad (3.17)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{S}{100} \right) \quad (3.18)$$





όπου **LS** ο συντελεστής ανάγλυφου, **λ** το οριζόντιο μήκος κλίσης [m], **β** η γωνία κλίσης του εδάφους [°]<sup>3</sup>, **S** η κλίση του εδάφους [%] και **m** συντελεστής με τιμές 0.2 για  $S \leq 1\%$ , 0.3 για  $1\% < S \leq 3\%$ , 0.4 για  $3\% < S \leq 5\%$  και 0.5 για  $S > 5\%$ .

Μια διαφορετική προσέγγιση υπολογισμού του συντελεστή ανάγλυφου LS έκαναν οι Moore I. D. και Burch G. J., το 1986, λαμβάνοντας υπόψη τη λεκάνη απορροής ανάντη του σημείου υπολογισμού,  $A_s$ , αντί του μήκους κλίσης, λ. Η εξίσωση που κατέληξαν έχει τη μορφή:

$$LS = \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^m \cdot \left( \frac{\sin(\beta)}{0.0896} \right)^n \quad (3.19)$$

όπου **LS** ο συντελεστής ανάγλυφου,  $A_s$  η ανάντη επιφάνεια που συνεισφέρει στη διάβρωση [ $m^2 \cdot m^{-1}$ ], **β** η τοπική γωνία κλίσης [°] και **m**, **n** συντελεστές με τιμές  $0.4 \leq m \leq 0.6$  και  $1.22 \leq n \leq 1.3$ , και προτεινόμενες τιμές 0.4 και 1.3 αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη δουλειά των Griffin M. L., Beasley D. B., Fletcher J. J., και Foster G. R., το 1988, και Moore I. D. και Wilson J. P., το 1993, πάνω στην οποία βασίστηκαν και οι Van der Knijff J. M., Jones R. J. A., & Montanarella L., το 2000, για τη μελέτη τους σε κλίμακα Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο προσδιορισμός του συντελεστή ανάγλυφου LS σε ένα σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$LS = (n + 1) \cdot \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^n \cdot \left( \frac{\sin(\beta)}{0.0896} \right)^m \quad (3.20)$$

όπου **LS** ο συντελεστής ανάγλυφου<sup>45</sup>,  $A_s$  η ανάντη επιφάνεια που συνεισφέρει στη διάβρωση [ $m^2 \cdot m^{-1}$ ], **β** η τοπική γωνία κλίσης [°] και **n**, **m** συντελεστές ανάλογα με τον τύπο διάβρωσης, που συνήθως παίρνουν τιμές  $0.2 \leq n \leq 0.6$  και  $1.0 \leq m \leq 1.3$ , και προτεινόμενες τιμές 0.4 και 1.3 αντίστοιχα. “Μικρές τιμές του συντελεστή m αντιστοιχούν σε επιφανειακή (sheet) επικρατούσα

<sup>3</sup> Σε περιβάλλον GIS πρέπει οι γωνίες που χρησιμοποιούνται να έχουν μετατραπεί πρώτα σε ακτίνια. ( $1^\circ = 0.0174533\text{rad}$ )

<sup>4</sup> Επισημαίνεται πως η σχέση εφαρμόζεται σε περιοχές που συντελείται αποκλειστικά διάβρωση (κατά βάση επιφανειακή). Έτσι, στις συνήθεις περιπτώσεις εφαρμογής της σχέσης σε σύνθετες επιφάνειες, όπως οι λεκάνες απορροής ρεμάτων και ποταμών που συναποτελούνται από επιφάνειες διάβρωσης αλλά και απόθεσης φερτών υλικών, αναμένεται υπερεκτίμηση του συντελεστή ανάγλυφου. Παρόλα αυτά είναι αρκετά σύνηθες να υποεκτιμάται ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πως οι ενδεχόμενες υπερεκτιμήσεις του συντελεστή ανάγλυφου δρουν προς μια κατεύθυνση τελικής εξισορρόπησης των εκτιμώμενων μεγεθών διάβρωσης.

<sup>5</sup> “Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της εξίσωσης των Moore και Wilson γιατί αυτή διαφέρει σημαντικά από την εξίσωση που προτείνουν οι δημιουργοί του RUSLE. Το μοντέλο RUSLE αφορά συνθήκες με περιορισμούς αποκόλλησης και όχι μεταφοράς.” (Moore I. D. & Wilson J. P., 1992)

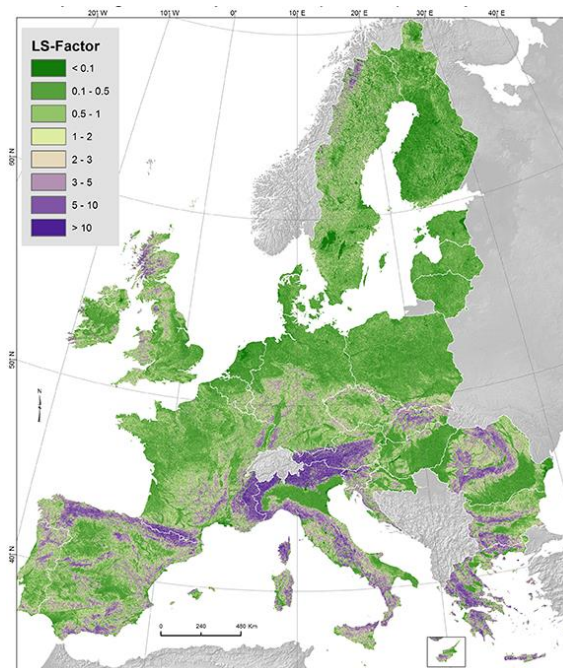




διάβρωση, ενώ μεγάλες τιμές αντιστοιχούν σε επικρατούσα αυλακωτή (rill) διάβρωση.” (Mitasova H. & Mitas L., 2001a)

Οι Hrabalíková M. και Janeček M., το 2017, προσπάθησαν να συγκρίνουν τις δημοφιλέστερες σχέσεις εκτίμησης του συντελεστή ανάγλυφου LS, που έχουν κατασκευασθεί ανά τα χρόνια. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων με πραγματικές μετρήσεις στερεοαπορροής, οι μελετητές συμπέραναν πως η εξίσωση που προτείνεται από τους Wischmeier W. H. και Smith D. D. (1978) είναι η πιο αξιόπιστη με υπερεκτίμηση, μόλις, 6%. Αμέσως επόμενη είναι η ίδια εξίσωση με χρήση της ανάντη λεκάνης απορροής  $A_s$ , αντί του μήκους κλίσης  $l$ , η οποία κατέληξε σε υποεκτίμηση της στερεοαπορροής κατά 6%. Αξιόπιστη κρίθηκε και η εξίσωση των Moore I. D. και Burch G. J. (1986) με υποεκτίμηση της στερεοαπορροής κατά 8%.

Στο επίπεδο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι Panagos P., Borrelli P. και Meusburger K., το 2015c, χρησιμοποιώντας τα DEM των χωρών μελών αυτής, κατασκεύασαν ένα ψηφιακό χάρτη, ανάλυσης 25x25 [m], για το συντελεστή ανάγλυφου, τον οποίο διαθέτει δωρεάν η ESDAC.



Σχήμα 3.11: Χάρτης συντελεστή ανάγλυφου, LS, της ESDAC

(πηγή: [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu))

### 3.4.4 Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management Factor), C

Ο συντελεστής διαχείρισης – κάλυψης γης, ή φυτοκάλυψης όπως συνήθως αποκαλείται, είναι αδιάστατος, και υποδηλώνει την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών στο ρυθμό παραγωγής εδαφικής διάβρωσης. “Το εύρος τιμών του συντελεστή είναι από 0 έως 1, με το κάτω όριο να υποδηλώνει έντονη φυτοκάλυψη, ή αλλιώς ισχυρά προστατευμένο έδαφος



έναντι διάβρωσης, και το άνω όριο να σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάλυψη και η επιφάνεια θεωρείται ως γυμνό έδαφος”. (Pham T. G., Degener J., & Kappas M., 2018)

Σε αντίθεση με την USLE, όπου οι τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης,  $C$ , επιλέγονται από μικρή γκάμα τιμών μέσω πινακοποιημένων δεδομένων, στην RUSLE προκύπτουν μέσω της εξίσωσης:

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM \quad (3.21)$$

όπου **SLR** (*Soil Loss Ratio*) ο ρυθμός απώλειας εδάφους, **PLU** η παράμετρος πρότερης χρήσης γης, **CC** η παράμετρος φυτοκάλυψης, **SC** η παράμετρος επιφανειακής κάλυψης, **SR** η παράμετρος εδαφικής τραχύτητας, **SM** η παράμετρος εδαφικής υγρασίας.

“Η τιμή του λόγου SLR, όπως αυτή υπολογίζεται για κάθε χρονική περίοδο, πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο ποσοστό της ετήσιας τιμής του παράγοντα  $E \cdot I_{30}$  που αναλογεί στην περίοδο αυτή. Στη συνέχεια, ο συντελεστής διαχείρισης – κάλυψης γης,  $C$ , υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων για το σύνολο της εκάστοτε χρονικής περιόδου ενδιαφέροντος.” (Ευθυμίου Ν. Γ., 2016)

Οι εξισώσεις προσδιορισμού των παραπάνω παραμέτρων, όπως αυτές διατυπώθηκαν από τους Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., και Yoder D. C. το 1996, είναι:

- Παράμετρος πρότερης χρήσης γης – Prior Land Use (PLU)  $\in [0,1]$

$$PLU = C_f \cdot C_b \cdot \exp \left[ -(c_{ur} \cdot B_{ur}) + \left( \frac{c_{us} \cdot B_{us}}{C_f^{c_{uf}}} \right) \right] \quad (3.22)$$

όπου  $C_f$  η συνοχή του επιφανειακού εδαφικού στρώματος,  $C_b$  η σχετική αποτελεσματικότητα των φυτικών υπολειμμάτων της επιφανειακής εδαφικής στρώσης στην εδαφική συνοχή,  $c_{ur}$  και  $c_{us}$  συντελεστές διόρθωσης σχετικοί με την επίδραση των φυτικών υπολειμμάτων,  $c_{uf}$  η επίδραση της εδαφικής συνοχής στην αποτελεσματικότητα των φυτικών υπολειμμάτων,  $B_{ur}$  η ποσότητα νεκρών και ζωντανών ριζών στην επιφανειακή εδαφική στρώση [ $\text{lb} \cdot \text{acre}^{-1} \cdot \text{in}^{-1}$ ] και  $B_{us}$  η ποσότητα φυτικών υπολειμμάτων στην επιφανειακή εδαφική στρώση [ $\text{lb} \cdot \text{acre}^{-1} \cdot \text{in}^{-1}$ ]

- Παράμετρος φυτοκάλυψης – Canopy Cover (CC)  $\in [0,1]$

$$CC = 1 - F_c \cdot \exp(-0.1 \cdot H) \quad (3.23)$$

όπου  $F_c$  το κλάσμα της φυτοκάλυψης επί της συνολικής έκτασης και  $H$  το ύψος πτώσης των σταγόνων της βροχόπτωσης μετά την πρόσκρουσή τους στην φυτοκάλυψη [ft]

- Παράμετρος επιφανειακής κάλυψης – Surface Cover (SC)  $\in [0,1]$



$$SC = \exp \left[ -b \cdot S_p \cdot \left( \frac{0.24}{R_u} \right)^{0.08} \right] \quad (3.24)$$

όπου **b** εμπειρικός συντελεστής που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της εδαφοκάλυψης στη μείωση της εδαφικής διάβρωσης, **S<sub>p</sub>** το ποσοστό της επιφανειακής κάλυψης επί της συνολικής επιφάνειας και **R<sub>u</sub>** η επιφανειακή τραχύτητα του αδιατάρακτου εδάφους [in]. Το ποσοστό επιφανειακής κάλυψης **S<sub>p</sub>** και δη του φυτικού υπολείμματος, προκύπτει ως:

$$S_p = [1 - \exp(-a \cdot B_s)] \cdot 100 \quad (3.25)$$

όπου **a** ο λόγος της επιφάνειας προς τη μάζα υπολείμματος με τυπικές τιμές να περιέχονται στους πίνακες της RUSLE [lb·acre<sup>-1</sup>] και **B<sub>s</sub>** το ξηρό βάρος του υπολείμματος που βρίσκεται στην εδαφική επιφάνεια [lb·acre<sup>-1</sup>]. Η επιφανειακή τραχύτητα **R<sub>u</sub>** αδιατάρακτου εδάφους αμέσως πριν την άρση, προκύπτει από την εξίσωση:

$$R_u = 0.24 + [D_r \cdot (R_i - 0.24)] \quad (3.26)$$

όπου **R<sub>i</sub>** η αρχική τραχύτητα [in] και **D<sub>r</sub>** συντελεστής εξομάλυνσης της εδαφικής τραχύτητας, προκαλούμενης από την επίδραση ενδεχόμενης βροχόπτωσης. Ο συντελεστής εξομάλυνσης **D<sub>r</sub>** προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$D_r = \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot 0.14 \cdot P_t - \frac{1}{2} \cdot 0.012 \cdot EI_t \right] \quad (3.27)$$

όπου **P<sub>t</sub>** το συνολικό ύψος βροχής στο διάστημα που μεσολάβησε από την πιο πρόσφατη διατάραξη του εδάφους [in] και **EI<sub>t</sub>** η ποσότητα της ενέργειας της βροχόπτωσης για το αντίστοιχο διάστημα t [MJ·mm·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>].

- Παράμετρος εδαφικής τραχύτητας – Surface Roughness (SR) ∈ [0,1]

$$SR = \exp [-0.66 \cdot (R_u - 0.24)] \quad (3.28)$$

όπου **R<sub>u</sub>** η επιφανειακή τραχύτητα του αδιατάρακτου εδάφους [in], όπως αυτή υπολογίστηκε προηγουμένως.

- Παράμετρος εδαφικής υγρασίας – Soil Moisture (SM) ∈ [0,1]  
“Η παράμετρος εδαφικής υγρασίας **SM** προκύπτει από δεδομένα πινάκων και εν γένει κατά τις υγρές περιόδους οι τιμές του πλησιάζουν το 1, ενώ κατά τις ξηρές περιόδους πλησιάζουν το 0.” (Βαχαβιώλος Θ. Κ., 2014)



Ένας εναλλακτικός τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή φυτοκάλυψης είναι η χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης, με ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων και χρήση του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ο δείκτης NDVI, υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

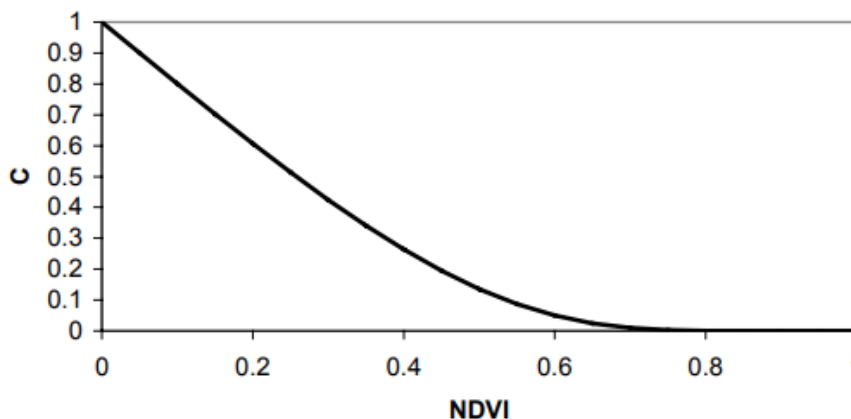
$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3.29)$$

όπου **R** το δορυφορικό κανάλι για το ερυθρό τμήμα του φάσματος (0.63-0.69μm) και **NIR** το δορυφορικό κανάλι για το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (0.76-0.9μm).

Σύμφωνα με τη δουλειά των Van der Knijff J. M., Jones R. J. A. και Montanarella L. το 2000, ο συντελεστής διαχείρισης – κάλυψης γης, C, προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$C = \exp\left(-a \cdot \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad (3.30)$$

όπου **a** και **β** παράμετροι που καθορίζουν τη μορφή της NDVI-C καμπύλης (Σχήμα 3.12). Προτεινόμενες τιμές, από τους μελετητές, είναι  $\alpha = 2$  και  $\beta = 1$ .



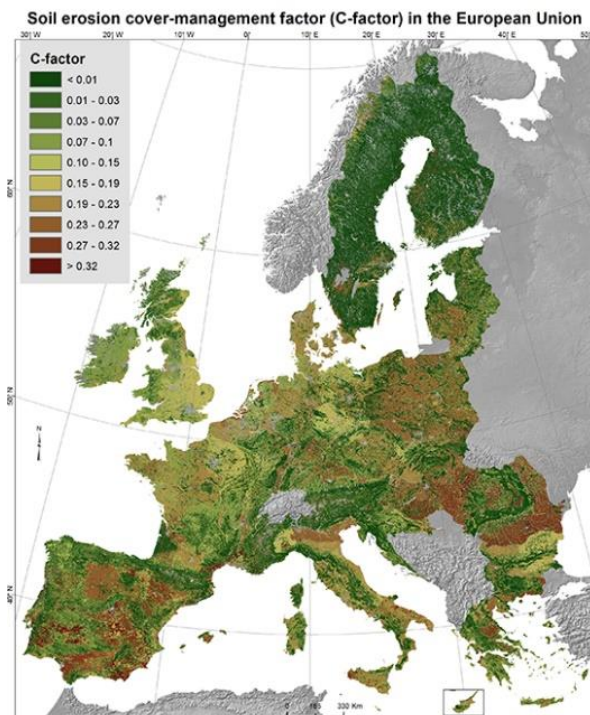
Σχήμα 3.12: Καμπύλη NDVI-C για τιμές παραμέτρων  $\alpha=2$  και  $\beta=1$

(πηγή: Van der Knijff et al. 1999)

Ένας ακόμα τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή φυτοκάλυψης, C, όπως και στην περίπτωση του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας, K, είναι η άντληση τιμών από τη βιβλιογραφία. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητη η αξιοποίηση βάσεων δεδομένων κάλυψης/ χρήσης γης, όπως η βάση CORINE, και η αντιστοίχιση των κωδικών κάλυψης/ χρήσης γης της περιοχής μελέτης με τιμές από τη βιβλιογραφία (Παράρτημα III: Καλύψεις - χρήσεις γης).



Αντίστοιχη δουλειά έκαναν και οι Panagos P., Borrelli P., Meusburger C., Alewell C., Lugato E. και Montanarella L. το 2015, συνδυάζοντας στοιχεία από τις βάσεις δεδομένων CORINE Land Cover, Copernicus Remote Sensing και EUROSTAT, καταλήγοντας σε ένα χάρτη, ανάλυσης 100x100 [m], για όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Σχήμα 3.13: Χάρτης συντελεστή φυτοκάλυψης, C, της ESDAC

(πηγή: [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu))

### 3.4.5 Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης (Support Practice Factor), P

Σύμφωνα με τους Wischmeier W. H. και Smith D. D. (1978) ο συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης, ή συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης, P, ορίζεται ως ο λόγος της εδαφικής απώλειας υπό συγκεκριμένη διαχειριστική πρακτική προς την αντίστοιχη εδαφική απώλεια υπό καλλιεργημένο έδαφος. Από αυτόν τον ορισμό, εύκολα συμπεραίνουμε πως το εύρος τιμών του συντελεστή κυμαίνεται από 0 έως 1.

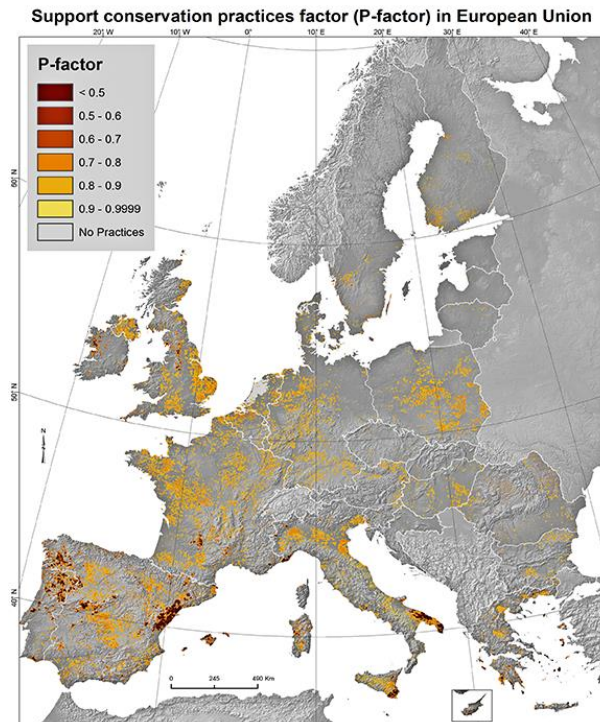
Χαμηλότερη τιμή του συντελεστή υποδηλώνει μια πιο αποτελεσματική πρακτική κατά της διάβρωσης. Σύμφωνα με τους Παναγούλια Δ. και Δήμου Γ. (2002), ο συντελεστής προστασία P λαμβάνει τιμές 0.6 με 0.9 για καλλιέργειες παράλληλες με τις ισοϋψείς, 0.3 με 0.45 για λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών και περιοδική εναλλαγή τους, και 0.12 με 0.18 για χρήση αναβαθμίδων και σειράς μικρών αναχωμάτων κάθετων στην κλίση του εδάφους. Εξαιτίας της δυσκολίας εύρεσης τόσο εξειδικευμένων δεδομένων, η συνήθης πρακτική που ακολουθούν οι ερευνητές, είναι η χρήση της τιμής 1 για





τον συντελεστή ελέγχου της διάβρωσης,  $P$ , θεωρώντας, συντηρητικά, την απουσία οποιουδήποτε μέτρου προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης.

Αξιοποιώντας τις βάσεις δεδομένων GAEC (Good Agricultural Environmental Condition) και LUCAS Earth Observation, οι Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Van Der Zander E. H., Poesen J. και Alewell C., το 2015, παρήγαγαν τον αντίστοιχο χάρτη, ανάλυσης 1000x1000 [m], για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Σχήμα 3.14: Χάρτης συντελεστή ελέγχου διάβρωσης,  $P$ , της ESDAC

(πηγή: [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu))

### 3.4.6 Συντελεστής στερεοαπορροής (Soil Delivery Ratio), SDR

“Από τη συνολική ποσότητα των φερτών υλών 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)” (Walling D. E., 1983). Αυτό συμβαίνει αφού ένα μεγάλο μέρος αυτής της ποσότητας εναποτίθεται εντός της λεκάνης, κατά την πορεία των φερτών υλών προς το υδατόρρευμα. Δηλαδή, ο συντελεστής στερεοαπορροής λαμβάνει τιμές από 0.00 έως 1.00, και ορίζεται ως:

$$SDR = \frac{S_Y}{A_S} \quad (3.31)$$





όπου **S<sub>v</sub>** η στερεοαπορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής και **A<sub>s</sub>** η διάβρωση – εδαφική απώλεια εντός της λεκάνης απορροής.

Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να εξαγάγουν εμπειρικές εξισώσεις στερεοαπορροής, στηριζόμενοι σε μελέτες υδρολογικών λεκανών σε διαφορετικές περιοχές ανά τον κόσμο. Είναι προφανές ότι λόγω της πολυπλοκότητας των παραμέτρων που συντελούν στην τελική ποσότητα της στερεοαπορροής, δεν είναι εύκολο να παραχθεί μια μοναδική εξίσωση που να καλύπτει κάθε τύπου λεκάνες απορροής.

Ο Renfro G. W., το 1972, κατέληξε σε μια εξίσωση, που συσχετίζει τον συντελεστή στερεοαπορροής με την έκταση της λεκάνης, της μορφής:

$$\log(SDR) = 1.877 - 0.1419 \cdot \log(25.9 \cdot A) \quad (3.32)$$

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

Τρία χρόνια αργότερα, το 1975, χρησιμοποιώντας δεδομένα από 14 λεκάνες απορροής της περιοχής Blackland Prairie στο Τέξας των ΗΠΑ, βελτίωσε την προηγούμενη εξίσωση, επιτυγχάνοντας ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή συσχέτισης, συγκεκριμένα R<sup>2</sup> = 0.92 (Zarris D., Vlastara M., & Panagoulia D., 2011):

$$\log(SDR) = 1.7935 - 0.1479 \cdot \log(A) \quad (3.33)$$

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

Παράλληλα, ο Vanoni V. A. το 1975, αναλύοντας δεδομένα στερεοαπορροής από 300 λεκάνες σε παγκόσμια κλίμακα, κατέληξε σε μια πιο γενική εξίσωση της μορφής:

$$SDR = 0.42 \cdot A^{-0.125} \quad (3.34)$$

όπου **SDR** ο συντελεστής στερεοαπορροής και **A** η επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά μίλια [mi<sup>2</sup>].

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1979, αξιοποιώντας τα ίδια δεδομένα με τον Renfro και τη μορφή της εξίσωσης του Vanoni, η αμερικάνικη υπηρεσία USDA SCS κατέληξε στην εξίσωση:

$$SDR = 0.51 \cdot A^{-0.11} \quad (3.35)$$

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



### 3.5 Μέθοδος Gavrilovic (Erosion Potential Method), EPM

Αφιετηρία για την ανάπτυξη του μοντέλου αποτέλεσαν οι συστηματικές μετρήσεις, από το 1947, της διάβρωσης του εδάφους στην πρώην Γιουγκοσλαβία από το Jaroslav Černi Institute, το οποίο βασιζόμενο σε αυτά τα δεδομένα ανέπτυξε την μέθοδο MQCE (Method for the Quantitative Classification of Erosion), το 1954. Από τότε η μέθοδος βρίσκεται υπό συνεχή ανάπτυξη, και σήμερα είναι γνωστή ως μέθοδος Gavrilovic ή EPM (Erosion Potential Method).

Το βασικό 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)

Ωστόσο, το μοντέλο διαθέτει και αρκετούς περιορισμούς. “Ενας από αυτούς είναι η, κατά περιπτώσεις, δύσκολη ερμηνεία των πινάκων για τις παραμέτρους του μοντέλου και εξαιτίας αυτού η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων συνδέεται άρρητα με την εμπειρία του μελετητή.” (Milanesi L., Pilotti M., Clerici A., & Gavrilovic Z., 2015) “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 σημερινή, βασική, εξίσωση της μεθόδου είναι βασισμένη στη δουλειά του Gavrilović S. (1962, 1970, 1972), και πιο συγκεκριμένα γράφεται ως:

$$w = \pi \cdot T \cdot P \cdot \sqrt{Z^3} \quad (3.36)$$

όπου  $w$  ο μέσος ετήσιος όγκος εδαφικής διάβρωσης<sup>67</sup> [ $m^3 \cdot (km^2)^{-1} \cdot y^{-1}$ ],  $T$  ο συντελεστής θερμοκρασίας,  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιοχής μελέτης [mm] και  $Z$  ο συντελεστής διάβρωσης του εδάφους της περιοχής μελέτης.

Ο συντελεστής θερμοκρασίας,  $T$ , ορίζεται ως:

<sup>6</sup> Για την αναγωγή του μεγέθους σε φαινόμενο όγκο πολλαπλασιάζεται με την τιμή 1.28 - 1.32

<sup>7</sup> Για 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 [ $t / m^3$ ].



$$T = \sqrt{0.1 + \frac{T_o}{10}} \quad (3.37)$$

όπου  $T_o$  είναι μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής μελέτης<sup>8</sup> [°C].

Ο συντελεστής διάβρωσης εδάφους,  $Z$ , ορίζεται ως:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + \sqrt{J}) \quad (3.38)$$

όπου  $X$  συντελεστής που εκφράζει την προστασία της φυτοκάλυψης της περιοχής μελέτης κατά της εδαφικής διάβρωσης<sup>9</sup> (Πίνακας 3.3),  $Y$  συντελεστής που εκφράζει την ανθεκτικότητα των πετρωμάτων της περιοχής μελέτης στη διάβρωση της βροχόπτωσης (Πίνακας 3.4),  $\varphi$  συντελεστής που εκφράζει την υφιστάμενη διάβρωση της περιοχής μελέτης (Πίνακας 3.5) και  $J$  η μέση κλίση εδάφους της περιοχής μελέτης [%].

“Αν υπάρχει διαθέσιμο ΨΜΕ και η λεκάνη απορροής δεν είναι ομοιόμορφη ως προς τους συντελεστές διάβρωσης, ο Gavrilović πρότεινε τη διαμερισματοποίηση της λεκάνης σε μικρότερες με σταθερό συντελεστή. Αφού υπολογιστεί η ετήσια εδαφική διάβρωση  $W_p$  για κάθε υπολεκάνη, αθροίζονται για να προκύψει η εδαφική διάβρωση της κύριας λεκάνης.” (Globevnik L., Danko H., Petkonšek G., & Rubinić J., 2003)

Σύμφωνα με τον Μαμάση Ν. (2014) η μέση κλίση μιας λεκάνης απορροής που υποδιαιρείται σε μικρότερες λεκάνες μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$i_s = \frac{1}{S_A} \int i \cdot dS \approx \frac{1}{S_A} \sum_r i_r \cdot \Delta S_r \quad (3.39)$$

όπου  $i_s$  η μέση κλίση της λεκάνης απορροής,  $S_A$  η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής,  $\Delta S_r$  η επιφάνεια της υπολεκάνης με σχεδόν σταθερή κλίση  $i_r$ .

Μια απλούστερη προσέγγιση είχε κάνει ο Němec J., το 1964, ορίζοντας τη μέση κλίση κάθε λεκάνης απορροής ως:

<sup>8</sup> “Η αρχική εκδοχή του EPM δε μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των -1 °C εξαιτίας του τρόπου ορισμού του συντελεστή θερμοκρασίας” (Milanesi L., Pilotti M., Clerici A., & Gavrilovic Z., 2015)

<sup>9</sup> “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)



$$i = \frac{h_{max} - h_{min}}{\sqrt{A}} \quad (3.40)$$

όπου  $i$  η μέση κλίση της λεκάνης [ $m \cdot m^{-1}$ ],  $h_{max,min}$  το υψηλότερο και χαμηλότερο σημείο της λεκάνης [m] και  $A$  η έκταση της λεκάνης [ $m^2$ ].

Πίνακας 3.3: 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
<b>ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		
1	Έδαφος πλήρως υποβαθμισμένο, μη καλλιεργήσιμο	1.00
2	Αγροί καλλιεργούμενοι με κλιτείς	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
<b>ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		
1	Διευθετημένες κοίτες με φράγματα	0.70
2	Αγροί καλλιεργημένοι συχνά κατά τις ισοΰψεις	0.63
3	Αγροί καλά καλλιεργούμενοι	0.54
4	Αγροί καλλιεργημένοι κατά λωρίδες οριζόντιες	0.45
5	Αγροί βαθμιδωμένοι	0.36
6	Αμπελώνες κατά τις ισοΰψεις	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
<b>ΜΟΡΦΗ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ</b>		
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 3.4: Τιμές συντελεστή  $Y$ , του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την πετρολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)

α/α	Είδος Πετρώματος και Υπεδάφους	Y
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 3.5: Τιμές συντελεστή  $\phi$ , του μοντέλου Gavrilovic, ανάλογα με την υπάρχουσα εδαφική διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Κωτούλας Δ., 2001)

α/α	Είδος και Βαθμός Διάβρωσης Λεκάνης	$\phi$
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

Συνηθίζεται, στις εφαρμογές του EPM, η κατηγοριοποίηση των υποπεριοχών της λεκάνης απορροής, βάσει της τιμής που λαμβάνει ο συντελεστής διάβρωσης,  $Z$ , σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.6: Ερμηνεία συντελεστή  $Z$ , του μοντέλου Gavrilovic, για τη διάβρωση της λεκάνης (πηγή: Gavrilovic Z. et al., 2004)

Κατηγορία Διάβρωσης	Ποιοτική Κατηγοριοποίηση Διάβρωσης	Z
I	Εκτενής διάβρωση – βαθιές 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



### 3.5.1 Συντελεστής κατακράτησης (Retention Coefficient), $R$

Στην ίδια λογική του συντελεστή στερεοαπορροής SDR που ορίστηκε για το μοντέλο RUSLE, ο Gavrilović S., το 1962, όρισε το συντελεστή κατακράτησης ως:

$$R = \frac{G}{w} \quad (3.41)$$

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.

Για την εκτίμηση του συντελεστή κατακράτησης,  $R$ , στο μοντέλο Gavrilovic προτείνεται η εξίσωση:

$$R_{Gavrilovic} = \frac{4 \cdot \sqrt{O \cdot D}}{L + 10} \quad (3.42)$$

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].

Ωστόσο, “ο Zemljic M., το 1971, ύστερα από έρευνες σε λεκάνες απορροής των Άλπεων, παρατήρησε πως η εξίσωση (3.42) 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) Για τον λόγο αυτό, ο Zemljic M., το 1971, τροποποίησε την εξίσωση που προτείνεται από το μοντέλο Gavrilovic, ως εξής:

$$R_{Zemljic} = \frac{\sqrt{O \cdot D}}{(L + 10)} \cdot \frac{(L + L_i)}{F} \quad (3.43)$$

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 [km<sup>2</sup>].

Η μέση υψομετρική απόσταση μιας λεκάνης απορροής,  $D$  [m], χωρίζοντας την επιφάνεια σε  $n$  ζεύγη ισοϋψών, σύμφωνα με τους Globevnik L., Danko H., Petkovič G. και Rubinić J. (2003), ορίζεται ως:





$$D = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot h_i}{F} - H_{min} \approx H_{mean} - H_{min} \quad (3.44)$$

όπου  $f_i$  η επιφάνεια μεταξύ δύο ισοϋψών [ $\text{km}^2$ ],  $h_i$  το μέσο υψόμετρο μεταξύ των δύο ισοϋψών [m],  $F$  η επιφάνεια όλης της λεκάνης απορροής [ $\text{km}^2$ ],  $H_{min}$  το χαμηλότερο υψόμετρο της λεκάνης απορροής [m] και  $H_{mean}$  το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής [m].

### 3.6 Σχέση Κουτσογιάννη – Ταρλά

Οι μελετητές Κουτσογιάννης Δ. και Ταρλά Κ., το 1987, αξιοποιώντας μετρήσεις από 7 σταθμούς σε ποταμούς της Βορειοδυτικής Ελλάδας, εξήγαγαν μια απλή, σχετικά, εξίσωση εκτίμησης της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής.

Αρχικά επιχειρήθηκε η συσχέτιση της στερεοαπορροής,  $G$ , με τη βροχόπτωση,  $P$ , και με την απορροή,  $R$ . Παρατηρήθηκε αρκετά έντονη συσχέτιση και με τις δύο παραμέτρους, με εκείνη της βροχόπτωσης να είναι ισχυρότερη, καθώς παρουσίαζε μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και πολύ μικρότερη διασπορά.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας και ορισμένων τοπογραφικών χαρακτηριστικών, όπως το μήκος του κύριου κλάδου του ποταμού, η μέση κλίση του ποταμού, η φαινόμενη κλίση και η έκταση της λεκάνης. Καμία από αυτές τις παραμέτρους δεν διέθετε αρκετά ισχυρή επίδραση στην τελική στερεοαπορροή.

Τελικά, μελετήθηκε η επίδραση της γεωλογικής σύστασης της περιοχής στην στερεοαπορροή. “Παραβλέποντας το γεγονός ότι πολλές φορές δύο εμφανίσεις του ίδιου πετρώματος σε διαφορετικούς τόπους, μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στη διαβρωσιμότητά τους, θεωρήσαμε ότι το κάθε πέτρωμα έχει καθορισμένη μέση συμπεριφορά” (Κουτσογιάννης Δ. & Ταρλά Κ., 1987). Ύστερα από παρατηρήσεις, προκειμένου να υιοθετηθεί μία μόνο παράμετρος, αντιπροσωπευτική της γεωλογίας της λεκάνης απορροής, τα εμφανιζόμενα πετρώματα κατατάχθηκαν σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τη διαβρωσιμότητά τους από το νερό, και αποδόθηκε στην κάθε ομάδα ένα εμπειρικό μέτρο διαβρωσιμότητας  $K$ .

Πίνακας 3.7: Τιμές συντελεστή  $K$  σχέσης Κουτσογιάννη-Ταρλά

Διαβρωσιμότητα	Γεωλογικός Σχηματισμός	$K$
Υψηλή	Αλλούβια, Φλύσχης	$K_1 = 1.0$
Μέτρια	Μάργες, Ψαμμίτες, Σχιστόλιθοι	$K_2 = 0.5$
Χαμηλή	Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες, Μεταμορφωμένα, Εκρηξιγενή	$K_3 = 0.1$

Η τελική έκφραση της εξίσωσης στερεοαπορροής είναι:



$$G = 15 \cdot \gamma \cdot e^{3 \cdot P} \quad (3.45)$$

$$\gamma = K_1 \cdot p_1 + K_2 \cdot p_2 + K_3 \cdot p_3 \quad (3.46)$$

όπου **G** η μέση ετήσια στερεοαπορροή σε αιώρηση<sup>10</sup> [ $t \cdot (km^2)^{-1}$ ], **γ** ο γεωλογικός συντελεστής, **P** η μέση ετήσια βροχόπτωση [m], **K<sub>1</sub>**, **K<sub>2</sub>**, **K<sub>3</sub>** οι συντελεστές διαβρωσιμότητας, **p<sub>1</sub>**, **p<sub>2</sub>**, **p<sub>3</sub>** το ποσοστό εμφάνισης των αντίστοιχων πετρωμάτων στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής.

Σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού θεωρείται η μικρή απαίτηση σε δεδομένα εισόδου (βροχόπτωση και γεωλογία περιοχής) και η εξαιρετικά εύκολη χρήση του.

Στα μειονεκτήματα του μοντέλου εντάσσεται η ολοκληρωτική απουσία του τοπογραφικού παράγοντα, η συνεισφορά του οποίου, όπως αναλύθηκε στην παρούσα εργασία, είναι αναμφίβολα από τις πιο σημαντικές, αν όχι η σημαντικότερη, όσον αφορά το μέγεθος της εδαφικής διάβρωσης μιας λεκάνης απορροής.

“Η σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά ενδείκνυται για χρήση σε περιοχές με παραπλήσια υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, αλλά και ως μια προκαταρκτική σχέση εκτίμησης ποσοτήτων στερεοαπορροής σε περιοχές με σημαντικά διαφορετικές συνθήκες.” (Βαχαβιώλος Θ. Κ., 2014)

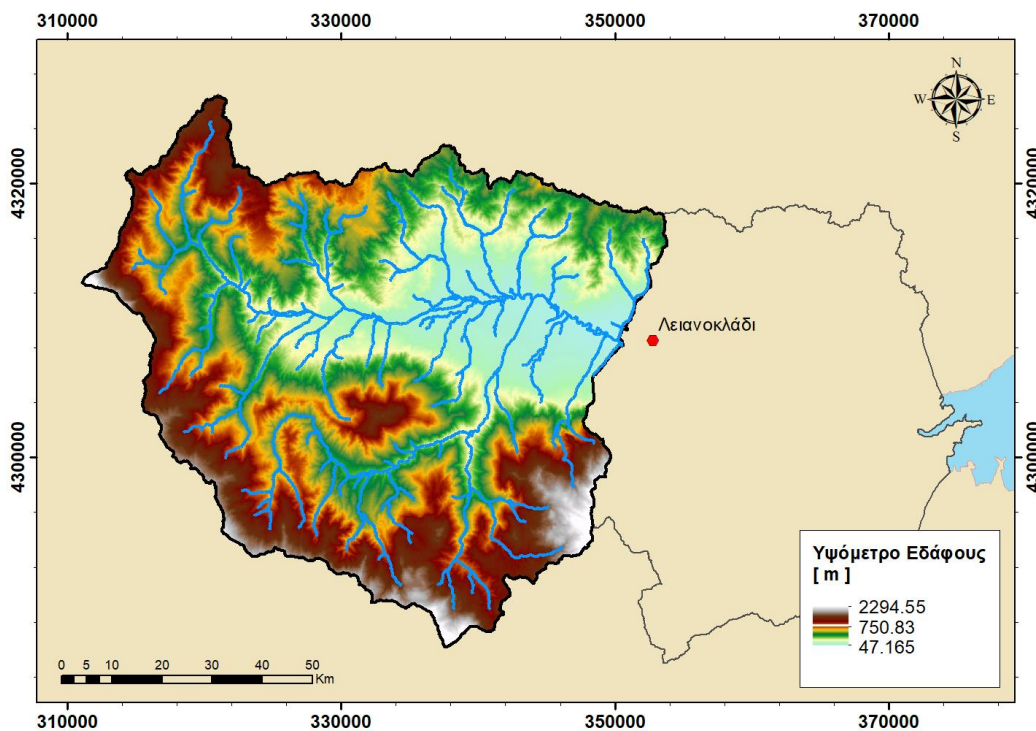
---

<sup>10</sup> “Το μέγεθος G περιλαμβάνει κατά βάση φορτίο φερτών σε αιώρηση. Στην περίπτωση ορεινής λεκάνης απορροής (μεγάλες κλίσεις), δικαιολογείται υψηλό ποσοστό προσαύξησης (τάξης του 50%) ώστε να περιληφθούν και τα φερτά που μεταφέρονται με σύρση.” (Κουτσογιάννης Δ. & Μαμάσης Ν., 2001)

## 4 Περιγραφή της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής

### 4.1 Γενικά

Η λεκάνη απορροής, έκτασης 1003km<sup>2</sup>, που επιλέχθηκε να μελετηθεί στην παρούσα εργασία, στην πραγματικότητα αποτελεί υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Σπερχείου ποταμού, έκτασης 2318km<sup>2</sup>, και ορίζεται ως η λεκάνη απορροής που έχει σημείο εξόδου (κατάντη) την οδική γέφυρα Νοτιοδυτικά του χωριού «Λειανοκλάδι» στο νομό Φθιώτιδας.



Σχήμα 4.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επιλεγμένης λεκάνης απορροής

Ο Σπερχειός ποταμός, μήκους 82km, ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ07) και αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο ποταμό του γεωγραφικού διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας, μετά τον Αχελώο (220km) και πριν τον Εύηνο (80km). Ο ποταμός περιβάλλεται από το βουνό Τυμφρηστός (2316m) στα Δυτικά, τα βουνά Βαρδούσια (2437m), Οίτη (2152m) και Καλλίδρομο (1372m) στα Νότια, και το όρος Όθρυς (1727m) στα Βόρεια, και τελικά εκβάλλει στον Μαλιακό Κόλπο, η ακτογραμμή του οποίου αποτελεί και το ανατολικό όριο της λεκάνης απορροής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο χαρακτηρισμός του Σπερχείου ως «ζωντανού» ποταμού αφού με τα χρόνια έχει αλλάξει αισθητά την γεωμορφολογία της περιοχής. Από την αρχαιότητα το ποτάμι μεταφέρει υλικά που έχουν οδηγήσει στην μετατόπιση, κατά 8km, των εκβολών εντός της θάλασσας, ενώ



υπολογίζεται ότι ο Μαλιακός κόλπος θα εξαφανιστεί τελείως από τις προσχώσεις του Σπερχειού ποταμού εντός των επόμενων χιλίων ετών. “Οι αλλουβιακές αποθέσεις του ποταμού καλύπτουν περίπου 200km<sup>2</sup>, και έχουν προσεγγιστεί σε 130 acres ετησίως, ενώ έχουν παρατηρηθεί αυξητικές τάσεις απόθεσης τα τελευταία 150 – 200 χρόνια.” (Stathopoulos N., Lykoudi E., Vasileiou E., Rozos D., & Dimitrakopoulos D., 2017)

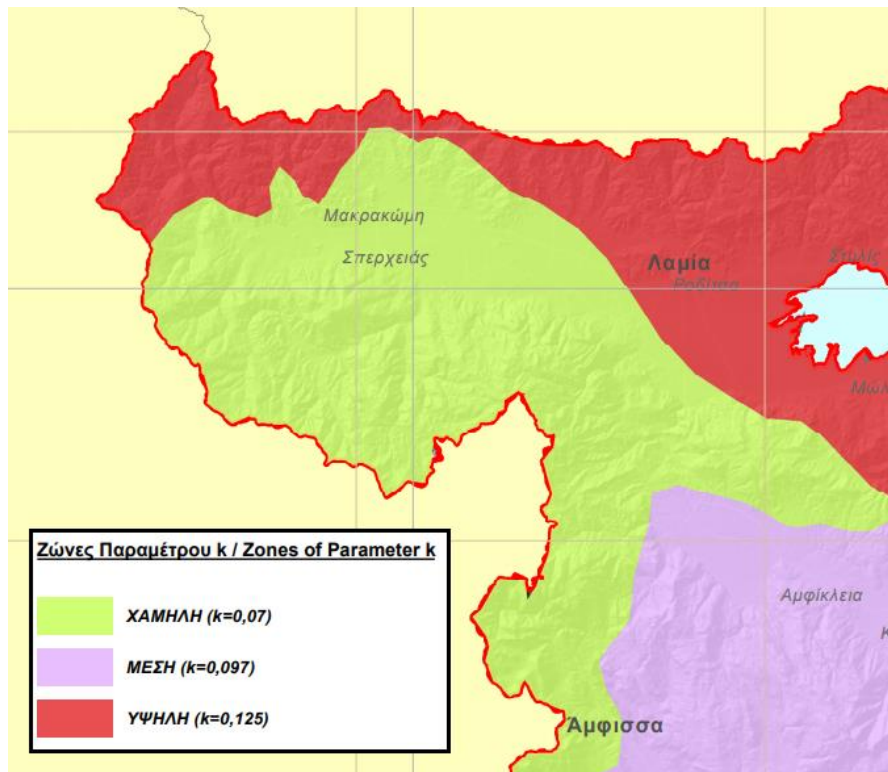
Αναφορικά με την ιστορία της περιοχής, ο ποταμός Σπερχειός αποτέλεσε το πρώτο σύνορο του Ελληνικού Βασιλείου μετά την Επανάσταση του 1821, ενώ κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου, το 1941, αποτέλεσε τη δεύτερη διασυμμαχική αμυντική γραμμή στην κάθοδο των Γερμανών.

## 4.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

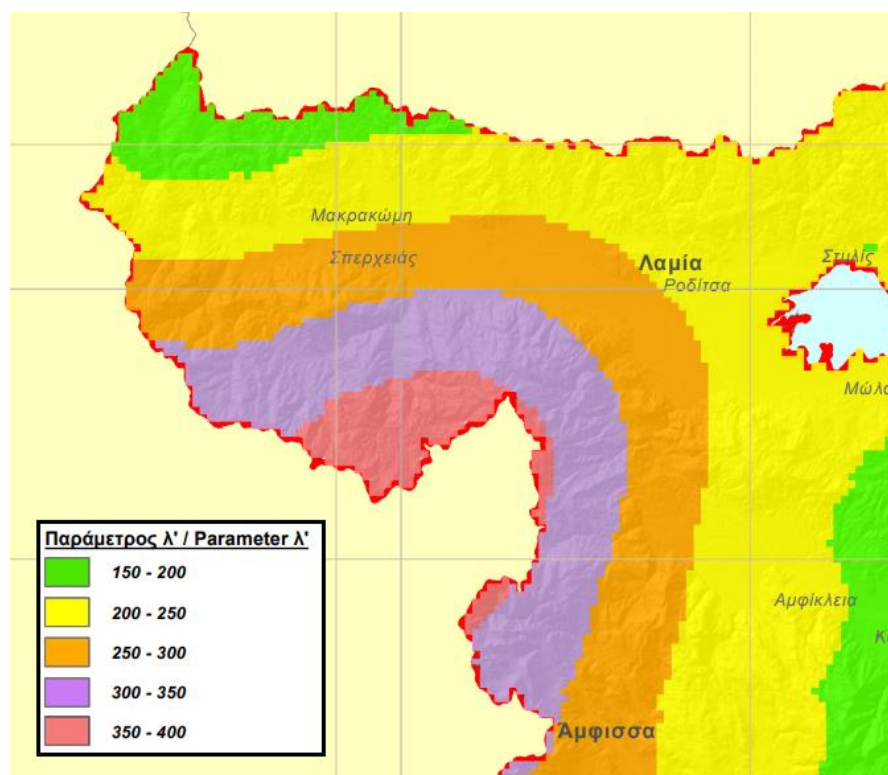
Για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι όμβριες καμπύλες, που έχουν παραχθεί για την περιοχή. Συγκεκριμένα, αξιοποιώντας τους χάρτες χωρικής μεταβολής των παραμέτρων  $\kappa$  (Σχήμα 4.2),  $\lambda'$  (Σχήμα 4.3) και  $\psi'$  (Σχήμα 4.4), που συνοδεύουν την τεχνική έκθεση της μελέτης του, πρώην ΥΠΕΚΑ, τέως ΥΠΕΝ ([floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr)), έγινε επιλογή από το πλήθος των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής, ανά φορέα λειτουργίας (ΔΕΗ, ΥΠΕΚΑ, ΕΑΑ, ΕΜΥ, ΥΠΑΑΤ), εκείνων με τις κατάλληλα ορισμένες παραμέτρους (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Παράμετροι σημειακών όμβριων καμπύλων των βροχογράφων του ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

Βροχομετρικός Σταθμός	$\theta$	$\eta$	$\kappa$	$\lambda'$	$\psi'$
<b>ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ</b>	0.33	0.627	0.04	511.5	0.91
<b>ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ</b>	0.33	0.627	0.12	92.3	0.57
<b>ΚΡΙΚΕΛΛΟ</b>	0.33	0.627	0.12	104.1	0.56
<b>ΠΥΡΑ</b>	0.33	0.627	0.12	141.8	0.71
<b>ΝΕΟΧΩΡΙ</b>	0.12	0.622	0.13	146.2	0.4
<b>ΠΙΤΣΙΩΤΑ</b>	0.12	0.622	0.13	103.2	0.37
<b>ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ</b>	0.12	0.622	0.07	264.3	0.76
<b>ΤΡΙΛΟΦΟ</b>	0.12	0.622	0.13	148.9	0.69
<b>ΑΝΩ ΥΠΑΤΗ</b>	0.12	0.622	0.07	351.7	0.85
<b>ΖΗΛΕΥΤΟ</b>	0.12	0.622	0.07	261.7	0.84
<b>ΜΑΚΡΥΡΑΧΗ</b>	0.04	0.639	0.09	434.5	0.74
<b>ΡΕΝΤΙΝΑ</b>	0.04	0.639	0.09	440.8	0.69
<b>Μέση Τιμή</b>	0.180	0.627	0.098	250.1	0.674

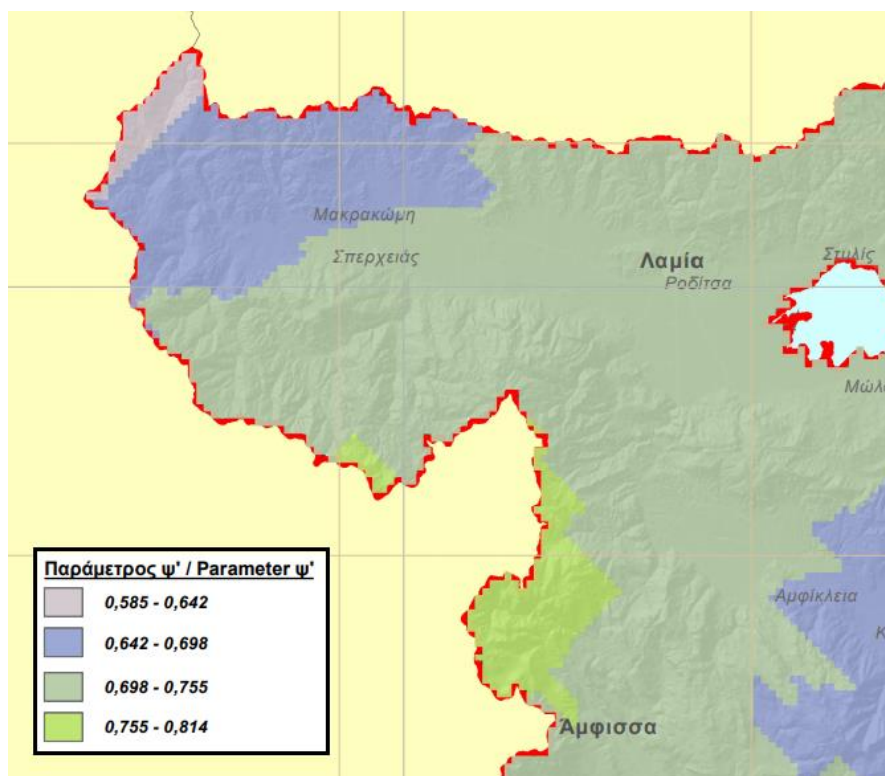


Σχήμα 4.2: Ζώνες συντελεστή  $k$  (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr))



Σχήμα 4.3: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας  $\lambda'$  (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr))





Σχήμα 4.4: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου θέσης  $\psi'$  (πηγή: [floods.ypeka.gr](http://floods.ypeka.gr))

### 4.3 Υδρολογικά δεδομένα

Για το βροχομετρικό καθεστώς, στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής, αντλήθηκαν στοιχεία από το τεύχος 10 (1992) του ερευνητικού έργου «Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας», του ΥΠΕΧΩΔΕ σε συνεργασία με το ΕΜΠ, και την ιστοσελίδα της ΕΜΥ ([www.hnms.gr](http://www.hnms.gr)), για τις καταγραφές των βροχογράφων / βροχομετρικών σταθμών της εγγύτερης περιοχής.

Πίνακας 4.2: Γενικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους βροχογράφους / βροχομετρικούς σταθμούς

Σταθμός	Λεκάνη Απορροής	Νομός	Υδατικό Διαμέρισμα	Φορέας
ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ	Μόρνου	Φωκίδας	04	ΥΠΔΕ
ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ	Ευήνου	Αιτωλοακαρνανίας	04	ΥΠΔΕ
ΚΡΙΚΕΛΛΟ	Αχελώου	Ευρυτανίας	04	ΔΕΗ
ΠΥΡΑ	Μόρνου	Φωκίδας	04	ΥΠΔΕ
ΛΑΜΙΑ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΕΜΥ
ΖΗΛΕΥΤΟ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΥΠΔΕ
ΝΕΟΧΩΡΙ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΔΕΗ
ΠΙΤΣΙΩΤΑ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΔΕΗ
ΤΡΙΛΟΦΟ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΥΠΔΕ
ΥΠΑΤΗ	Σπερχειού	Φθιώτιδας	07	ΥΠΔΕ





Πίνακας 4.3: Ειδικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους βροχογράφους / βροχομετρικούς σταθμούς

Σταθμός	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Υψόμετρο [ m ]
ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ	22° 11'	38° 42'	1050
ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ	22° 00'	38° 44'	1160
ΚΡΙΚΕΛΛΟ	21° 51'	38° 48'	1120
ΠΥΡΑ	21° 16'	38° 30'	1140
ΛΑΜΙΑ	22° 24'	38° 54'	12
ΖΗΛΕΥΤΟ	22° 16'	38° 56'	120
ΝΕΟΧΩΡΙ	21° 52'	38° 58'	800
ΠΙΤΣΙΩΤΑ	21° 54'	39° 01'	800
ΤΡΙΛΟΦΟ	22° 13'	39° 00'	580
ΥΠΑΤΗ	22° 14'	38° 52'	286

#### 4.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας είναι αρκετά περιορισμένες στον ελλαδικό χώρο. “Οι περισσότεροι σταθμοί έχουν εγκατασταθεί σε ημιορεινές και ορεινές περιοχές μέσου και μεγάλου υψομέτρου, με τις πεδινές περιοχές να μην περιγράφονται επαρκώς μετεωρολογικά.” (Ευθυμίου Ν. Γ., 2016)

Για το σκοπό αυτό, σύμφωνα με τους Κουτσογιάννη Δ. και Ξανθόπουλο Θ. (1999), η μέση επιφανειακή θερμοκρασία μιας υδρολογικής λεκάνης, που περιλαμβάνει μόνο ένα σταθμό μέτρησης θερμοκρασίας, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$T_s = T_\sigma - a \cdot (z_s - z_\sigma) \quad (4.1)$$

όπου  $T_s$  η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της λεκάνης [°C] με μέσο υψόμετρο  $z_s$  [m],  $T_\sigma$  η γνωστή μέση θερμοκρασία στη θέση του σταθμού [°C] υψομέτρου  $z_\sigma$  [m] και  $a$  η θερμοκρασιακή βαθμίδα / θερμοβαθμίδα<sup>11</sup> [°C·m<sup>-1</sup>].

Εναλλακτικά, για την προσέγγιση της παραμέτρου θερμοκρασίας, στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής, από την ιστοσελίδα του ΕΑΑ ([stratus.meteo.noa.gr](http://stratus.meteo.noa.gr)), αντλήθηκαν οι καταγεγραμμένες θερμοκρασίες για

<sup>11</sup> Η «κατακόρυφη θερμοβαθμίδα» ορίζεται ως η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος μέσα στην τροπόσφαιρα. Τυπικά, για αύξηση του υψομέτρου κατά 1km παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας κατά 6 - 6.5 [°C·km<sup>-1</sup>].



επιλεγμένους σταθμούς, κοντά στην περιοχή μελέτης, και επεξεργάστηκαν όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 5.4.2.2.

Πίνακας 4.4: Ειδικές πληροφορίες για τους επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς

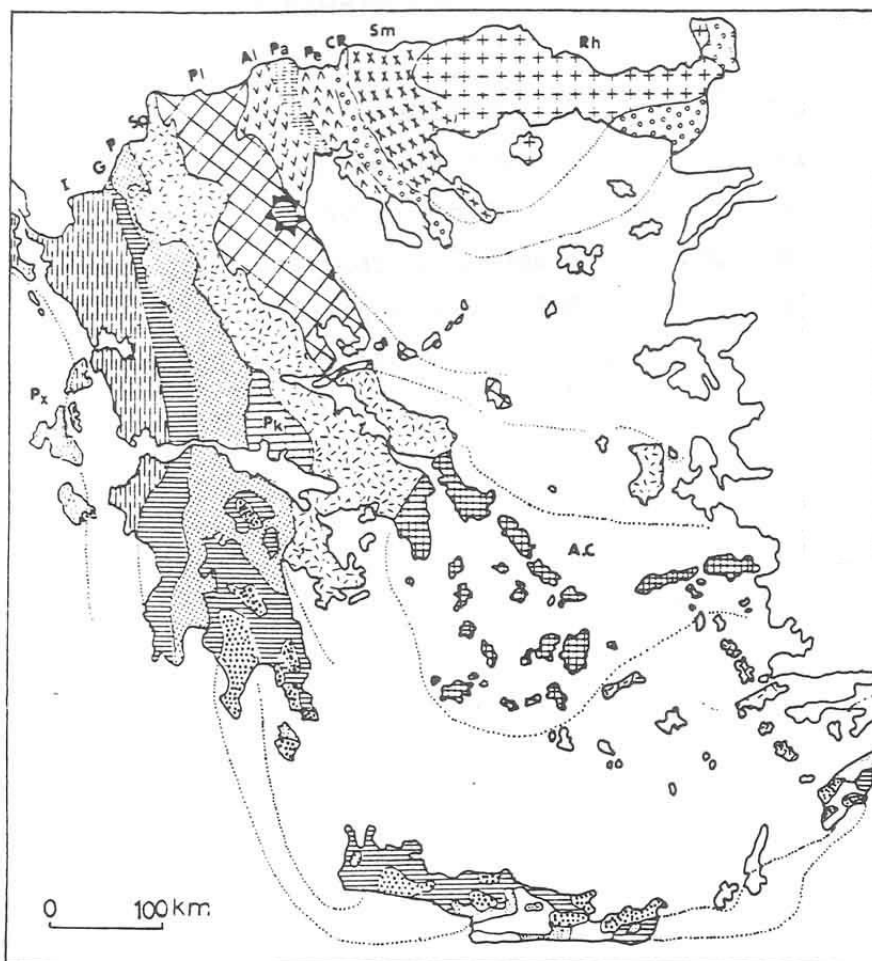
Σταθμός	Νομός	Φορέας	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Υψόμετρο [ m ]
ΛΑΜΙΑ	Φθιώτιδας	ΕΑΑ	22° 26'	38° 54'	107
ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ	Φθιώτιδας	ΕΑΑ	22° 07'	38° 56'	236
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΠΟΛΗ	Ευρυτανίας	ΕΑΑ	21° 47'	38° 54'	998
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΒΟΥΤΥΡΟ	Ευρυτανίας	ΕΑΑ	21° 45'	38° 52'	700
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΜΥΡΙΚΗ	Ευρυτανίας	ΚΛΑΟΥΔΑΤΟΣ ΑΕΤΕΕ - ΕΑΑ	21° 49'	38° 53'	1045

## 4.5 Γεωλογία

Η γεωλογική έρευνα από κρατικούς φορείς ξεκίνησε το 1930 όταν πρωτοσυστάθηκε η Γεωλογική Υπηρεσία Ελλάδος (ΓΥΕ) υπό την εποπτεία του, τότε, Υπουργείου Εθνικής Οικονομίας, και από τότε έχει υπάρξει πληθώρα μετονομασιών και υπηρεσιών με εποπτικά καθήκοντα. Η πραγματική γεωλογική συστηματική έρευνα στην Ελλάδα ξεκίνησε το 1952 με την ίδρυση του Ινστιτούτου Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους (ΙΓΕΥ). Το 1976 πήρε την ονομασία, που ίσχυε και μέχρι πρότινος, ως Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) εποπτευόμενο από το τότε Υπουργείο Βιομηχανίας και σημερινό Υπουργείο Ανάπτυξης. Το 2018, το ΥΠΕΝ προχώρησε στη εκμοντερνοποίηση της υπηρεσίας μέσω της σύστασης της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ) για τις ανάγκες του κράτους σε ζητήματα γεωλογικού ενδιαφέροντος.

### 4.5.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

“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)



Rh	Μάζα της Ροδόπης	Al	Ζώνη Αλμπίας	P	Ζώνη Πίνδου
Sm	Σερβομακεδονική Μάζα	Pi	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 Τροαπούλιος Ζώνη
Pa	Ζώνη Πάικου	Pk	Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας	Au	Ενότητα Ταλέα Όρη - Πλακώδεις ασβεστόλιθοι

Σχήμα 4.5: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας (πηγή: [geo.auth.gr](http://geo.auth.gr))

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού. Γεωτεκτονικά, στην περιοχή αναπτύσσεται στα Βορειοανατολικά η Υποπελαγονική Ζώνη, στα Νοτιοανατολικά η Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας και στα Νοτιοδυτικά, Δυτικά και Βορειοδυτικά η Ζώνη Ωλονού – Πίνδου.

“Η δημιουργία της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού είναι αποτέλεσμα τεκτονικών κινήσεων, μεταγενέστερων του Αλπικού ορογενετικού κύκλου, κυρίως ρηγμάτων διεύθυνσης Βορρά - Νότου και Ανατολής - Δύσης. Στη συνέχεια πληρώθηκε με κλασικά ιζήματα που προήλθαν από τη διάβρωση των σχηματισμών του υποβάθρου.” (Σωτηροπούλου Κ., 2012)

- **Ζώνη Ανατολικής Ελλάδας ή Υποπελαγονική Ζώνη**

“Τεκτονικά εξεταζόμενη η Υποπελαγονική Ζώνη εντάσσεται στις εξωτερικές ζώνες” (Δερμιτζάκης Μ. Δ. & Λέκκας Σ. Π., 2010). Το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης αυτής είναι η παρουσία των οφιολιθικών μαζών καθώς



και η σχιστοκερατολιθική διάπλαση που υπόκειται αυτών. Η σχιστοκερατολιθική διάπλαση αποτελείται από μια μεγάλου πάχους κλαστική σειρά αργιλικών σχιστολίθων, οι οποίοι εναλλάσσονται με ψαμμίτες, ραδιολαρίτες και ασβεστόλιθους. Η στρωματογραφική ακολουθία των σχηματισμών συνεχίζεται με το οφιολιθικό κάλυμμα, το οποίο υπέρκειται της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. Η στρωματογραφική κολώνα της Υποπελαγονικής Ζώνης βρίσκεται στο Παράρτημα Ι: *Στρωματογραφικές στήλες*.

- **Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας**

Η Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας εντάσσεται κι αυτή στις εξωτερικές γεωτεκτονικές ζώνες. Αποτελείται από νηριτικούς και δολομιτωμένους ασβεστόλιθους οι οποίοι χρονολογούνται στην άνω Τριαδική έως άνω Κρητιδική περίοδο. Η ιζηματογένεση αυτών δεν παρουσιάζεται συνεχής, αλλά διακόπτεται κατά διαστήματα, γεγονός που αποδεικνύεται από την παρουσία τριών βωξιτικών οριζόντων.

Οι σχηματισμοί της Ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας έχουν επιφανειακή εμφάνιση στον ορεινό όγκο της Οίτης, στο Νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Το τμήμα αυτό της λεκάνης δομείται κυρίως από ασβεστόλιθους και δολομίτες του Μεσοζωικού και Παλαιοζωικού αιώνα, καθώς και από φλύσχη, ο οποίος απαρτίζεται από ασβεστικούς και αργιλικούς σχιστολίθους, μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και επιμέρους ενστρώσεις ασβεστολίθων. Η στρωματογραφική κολώνα της Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας βρίσκεται στο Παράρτημα Ι: *Στρωματογραφικές στήλες*.

- **Ζώνη Ωλονού – Πίνδου**

“Η ζώνη αυτή κατατάσσεται στις εξωτερικές γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας και διακρίνεται σε τρεις υποζώνες: την υποζώνη του Ανατολικού φλύσχη της Πίνδου, την υποζώνη των ασβεστολίθων της Πίνδου και την υποζώνη του Δυτικού φλύσχη της Πίνδου.” (Καρλή Α. Κ., 2013)

Τη βάση της ακολουθίας της ζώνης της Πίνδου αποτελούν φλυσχοειδείς κλαστικές αποθέσεις όπως εναλλαγές πηλιτών με λεπτοπλακώδεις απολιθωματοφόρους ασβεστόλιθους ηλικίας μέσης Τριαδικής περιόδου. Ακολουθούν πυριτούχοι ασβεστόλιθοι της άνω Τριαδικής περιόδου, με δολομιτικές ή μαργαϊκές παρεντρώσεις.

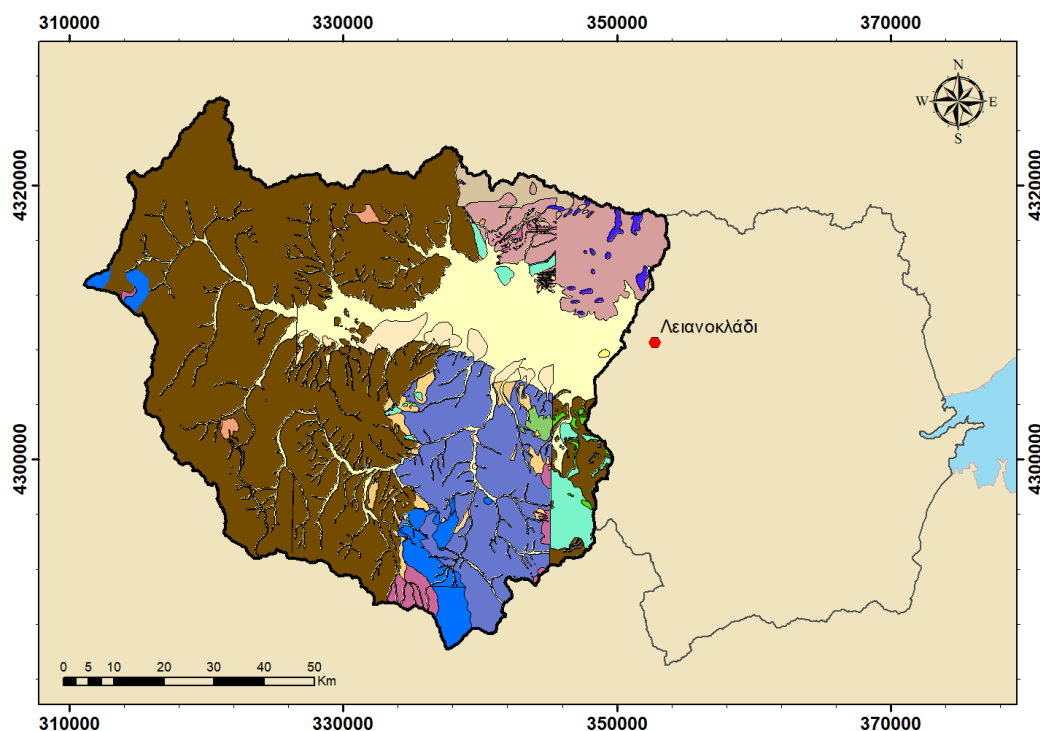
Η περιοχή μελέτης ανήκει στην Ανατολική υποζώνη της Πίνδου, κι έτσι το δυτικό τμήμα αυτής δομείται κυρίως από το φλύσχη της Ανατολικής Πίνδου και από ασβεστολιθικούς όγκους ηλικίας ανώτερης και κατώτερης Κρητιδικής περιόδου. Η στρωματογραφική κολώνα της Ζώνης Ωλονού - Πίνδου βρίσκεται στο Παράρτημα Ι: *Στρωματογραφικές στήλες*.

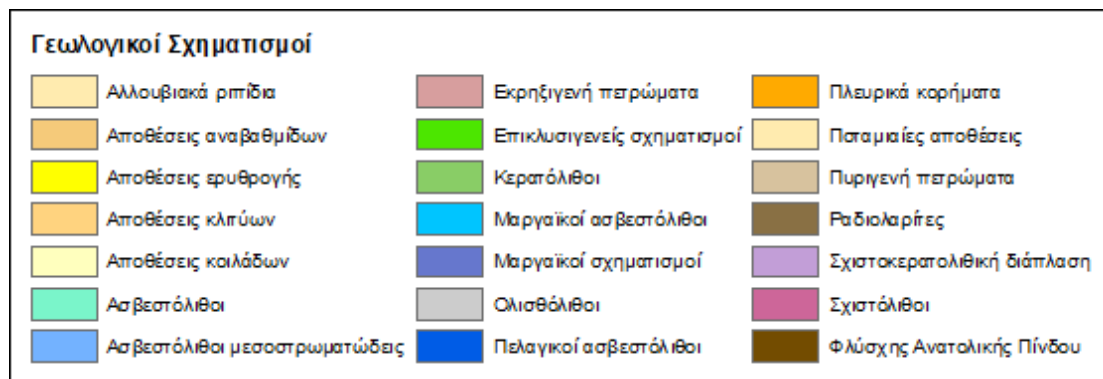
Για την κατασκευή του γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης (Σχήμα 4.6), έγινε ψηφιοποίηση, μέσω του ArcGIS, των γεωλογικών φύλλων του ΙΓΕΥ (Φουρνάς, Λεοντάριον, Δομοκός, Λαμία, Σπερχείας και Καρπενήσιον), κλίμακας 1:50000, αφού, πρώτα, γεωαναφέρθηκαν στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87.



Πίνακας 4.5: Γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην περιοχή μελέτης

α/α	Κατηγορία Γεωλογικού Σχηματισμού	Έκταση	
		[ km <sup>2</sup> ]	[ % ]
1	Ασβεστόλιθοι μεσοστρωματώδεις	0.43	0.04
2	Μαργαϊκοί σχηματισμοί	128.27	12.75
3	Φλύσχος Ανατολικής Πίνδου	542.64	53.94
4	Σχιστόλιθοι	12.34	1.23
5	Ασβεστόλιθοι	21.36	2.12
6	Επικλυσιγενείς σχηματισμοί	2.00	0.20
7	Ολισθόλιθοι	4.11	0.41
8	Αποθέσεις (ποταμιαίες, κοιλάδων, αναβαθμίδων, αλλουβιακές κα)	204.52	20.33
9	Ραδιολαρίτες	1.93	0.19
10	Σχιστοκερατολιθική διάπλαση	4.63	0.46
11	Εκρηξιγενή πετρώματα	69.98	6.96
12	Πυριγενή πετρώματα	13.75	1.37
<b>Σύνολο</b>		1003.06	100.0



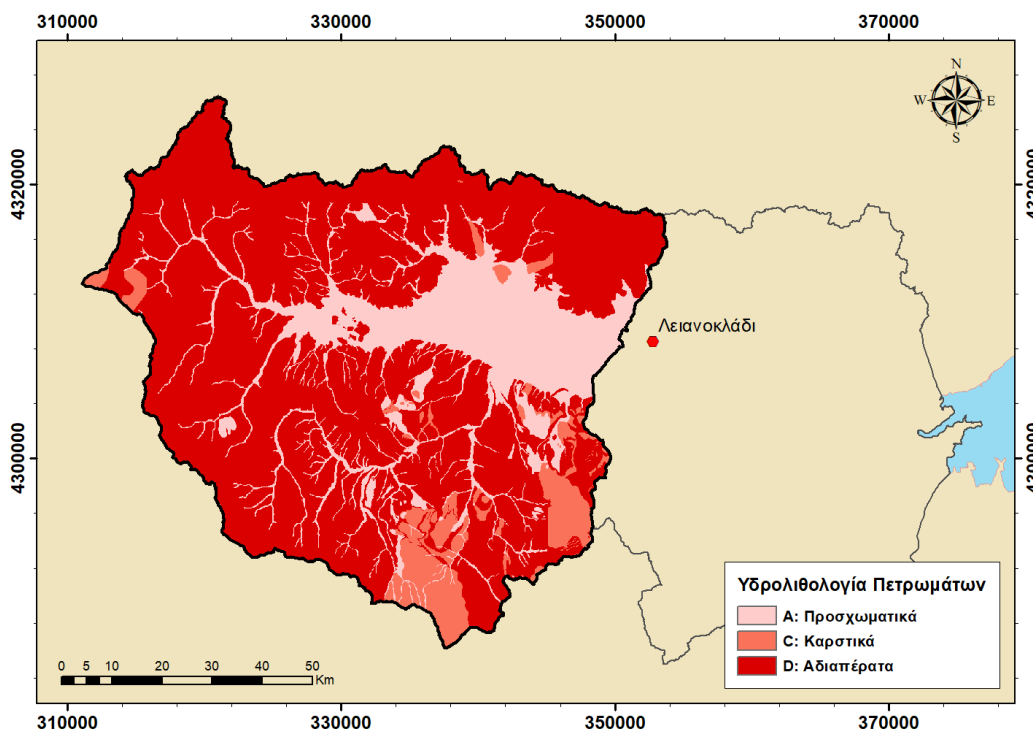


Σχήμα 4.6: Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών που αναπτύσσονται στην περιοχή μελέτης

#### 4.5.2 Υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά

“Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών μιας περιοχής είναι συνάρτηση διαφόρων φυσικών και χημικών παραγόντων. Οι σημαντικότεροι από αυτούς, είναι το πορώδες, η διαπερατότητα, αλλά και γενικά η λιθολογική σύσταση των πετρωμάτων. Σημαντικό ρόλο, επίσης, κατέχει η τεκτονική της περιοχής και ο βαθμός καταπόνησης των σχηματισμών. Οι τεκτονικές διαρρήξεις λειτουργούν ως δρόμοι προνομιακής ροής.” (Καρλή Α. Κ., 2013)

Για την υδρολιθολογία της περιοχής μελέτης αντλήθηκαν στοιχεία από τις εργασίες των Κουτσογιάννης Δ. et al. (2003), Θραψίμης Β. et al. (2010), Σωτηροπούλου Κ. (2012) και Καρλή Α. Κ. (2013) και παράχθηκε τελικά ο παρακάτω χάρτης:



Σχήμα 4.7: Χάρτης υδρολιθολογικών σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης





Πιο αναλυτικά, η κατηγοριοποίηση της υδρολιθολογίας των σχηματισμών, για την περιοχή μελέτης, περιλαμβάνει:

- **Προσχωματικοί σχηματισμοί (Κατηγορία Α)**

Τα ιζήματα που πληρώνουν τη λεκάνη, συνίστανται κυρίως από άμμους, αργίλους, ιλύες, κροκαλοπαγή, κώνους κορημάτων κα. Η σύστασή τους είναι συνάρτηση των σχηματισμών του υποβάθρου που υπόκειται ή βρίσκεται παραπλεύρως και το μέγεθος των κόκκων κατά την απόσταση μεταφοράς. Το πάχος των ιζημάτων είναι μικρότερο στο δυτικό τμήμα, στις παρυφές των βουνών και στις περιοχές που παρατηρούνται υβώματα ή εξάρματα και μεγαλύτερο στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης.

- **Καρστικοί σχηματισμοί (Κατηγορία C)**

Οι καρστικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή είναι Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι, δολομίτες του Κρητιδικού και Ιουρασικού της Υποπελαγονικής ενότητας και της ενότητας Παρνασσού – Γκιώνας. Οι αντίστοιχοι των Δυτικών ενοτήτων Πίνδου και Υπερπινδικής εκτιμάται ότι βρίσκονται σε μεγάλο βάθος κάτω από το φλύσχη.

Οι Τριαδικοί – Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι της Υποπελαγονικής ενότητας είναι κατακερματισμένοι και παρουσιάζουν καρστική διάβρωση. Αποτελούν την καρστική ενότητα Καλλίδρομου – Οίτης, μέσα στην οποία δημιουργείται ισχυρός υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος εκφορτίζεται σχεδόν αποκλειστικά μέσω των πηγών Μαυρονέρια.

Οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες, του Μεσοζωικού αιώνα της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας, δομούν το όρος Οίτη στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Αποτελούν το καρστικό σύστημα της Οίτης, του οποίου η κύρια εκφόρτιση πραγματοποιείται μέσω ενός μετώπου 7 πηγών μεταξύ των περιοχών Κομποτάδων και Μεξιάτες. Ύστερα από μια σειρά ερευνητικών γεωτρήσεων, στις παρυφές της Οίτης, προέκυψε ότι υπάρχει χαμηλός βαθμός αποκάρστωσης.

- **Αδιαπέρατοι σχηματισμοί (Κατηγορία D)**

Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί συνίστανται από τα ιζήματα του φλύσχη και καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση από Νοτιοδυτικά έως Βορειοδυτικά της περιοχής μελέτης. Το πάχος των ιζημάτων του φλύσχη εμφανίζεται σχετικά μικρό και γι' αυτό η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών είναι περιορισμένη. Οι πηγές που εμφανίζονται στους σχηματισμούς του φλύσχη είναι αποτέλεσμα των ρηγμάτων που παρατηρούνται.

Μεγάλη έκταση καταλαμβάνουν και οι οφιόλιθοι – σχιστοκερατόλιθοι, στα περιθώρια και στο υπόβαθρο της λεκάνης, οι οποίοι σχηματίζουν ένα στεγανό κάλυμμα των υποκείμενων ασβεστόλιθων - δολομίτων της Υποπελαγονικής ενότητας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφανειακής απορροής στη λεκάνη, οφείλεται στη μεγάλη έκταση που καταλαμβάνουν οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί του φλύσχη και των οφιολίθων – σχιστοκερατολίθων.



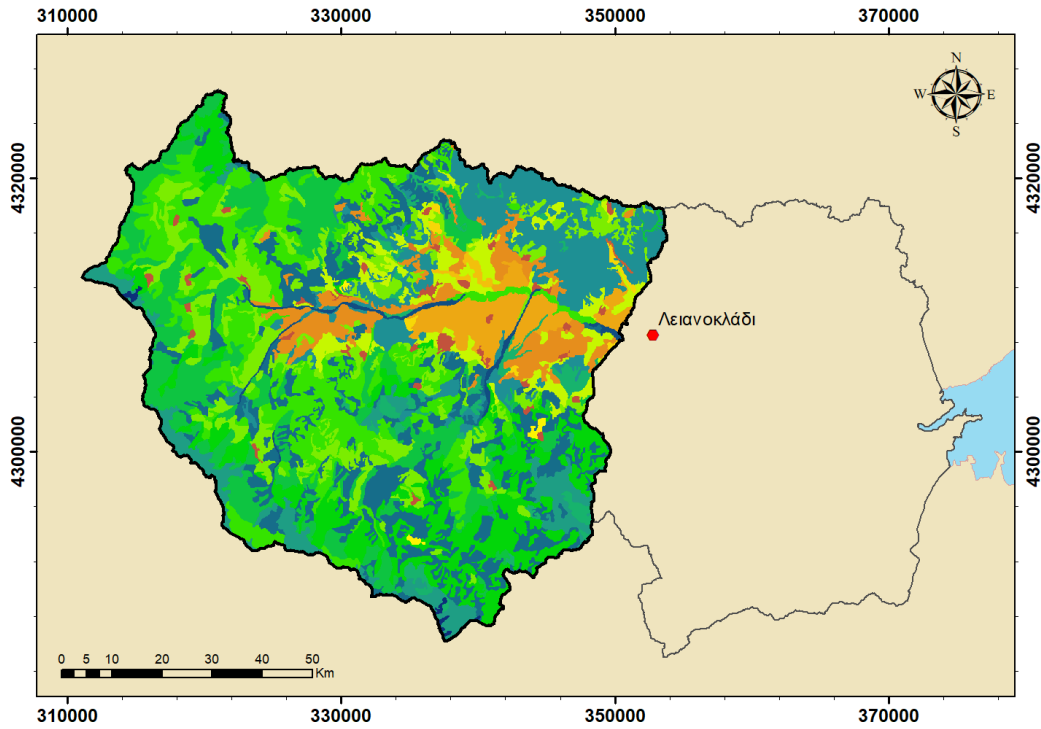
## 4.6 Χρήσεις γης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι καλύψεις/ χρήσεις γης αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα του, ελεύθερου για χρήση, Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service ([land.copernicus.eu](http://land.copernicus.eu)), στο οποίο γίνεται συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από κατάλληλους δορυφόρους και επίγεια συστήματα μετρήσεων για την επιφάνεια της Γης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης CORINE για το έτος 2018, ο οποίος διαθέτει γεωμετρική ακρίβεια (όσο αφορά τα πολύγωνα των χρήσεων γης) μικρότερη των 10m, αξιοποιώντας τις μετρήσεις δορυφόρων, και θεματική ακρίβεια (κατηγοριοποίηση ουσιαστικά του πολυγώνου) σε ποσοστό υψηλότερο του 85%. Η πρακτική που ακολουθείτε στους χάρτες CORINE είναι η αντιστοίχιση του τύπου κάλυψης/ χρήσης γης με έναν μοναδικό κωδικό, ο οποίος στη συνέχεια αποτελεί τη βάση για οποιαδήποτε εξαγωγή πληροφορίας επ' αυτής.

Πιο αναλυτικά, στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται οι παρακάτω κωδικοί κάλυψης/ χρήσης γης.

Πίνακας 4.6: Καλύψεις/ χρήσεις γης που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης

α/α	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Έκταση	
			[ km <sup>2</sup> ]	[ % ]
1	112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	12.11	1.21
2	133	Χώροι οικοδόμησης	0.51	0.05
3	142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.25	0.02
4	211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	50.44	5.03
5	212	Μόνιμα αρδεύσιμη γη	37.11	3.70
6	222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	2.80	0.28
7	223	Ελαιώνες	3.20	0.32
8	231	Λιβάδια	1.78	0.18
9	242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	43.95	4.38
10	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	107.52	10.72
11	311	Δάσος πλατύφυλλων	159.23	15.88
12	312	Δάσος κωνοφόρων	111.68	11.14
13	313	Μικτό δάσος	146.08	14.57
14	321	Φυσικοί βοσκότοποι	26.65	2.66
15	322	Θάμνοι και χερσότοποι	47.98	4.78
16	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	105.31	10.50
17	324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	136.16	13.58
18	331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	8.32	0.83
19	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	1.87	0.19
<b>Σύνολο</b>			1,003.06	100.0



Κωδικοί CORINE						
112	211	223	243	313	323	333
133	212	231	311	321	324	
142	222	242	312	322	331	

Σχήμα 4.8: Καλύψεις / χρήσεις γης όπως αυτές εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης



## 5 Αποτελέσματα – Ανάλυση

### 5.1 Υδρολογική ανάλυση

Η διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου, που μελετήθηκε, λήφθηκε “ως πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της ανάντη λεκάνης απορροής” (ΥΠΕΝ, 2010), και συγκεκριμένα 24 ώρες [h], ή αλλιώς σχεδόν 2.5 φορές ο χρόνος συγκέντρωσης της υπό εξέταση λεκάνης απορροής, όπως αυτός υπολογίζεται, μέσω της εξίσωσης (2.1), στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Υπολογισμός του χρόνου συρροής / συγκέντρωσης μέσω της εξίσωσης Giandotti

α/α	Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή
1	Επιφάνεια λεκάνης απορροής, A	[ km <sup>2</sup> ]	1003.06
2	Μήκος κύριου υδατορεύματος, L	[ km ]	54.58
3	Μέσο υψόμετρο λεκάνης	[ m ]	750.8
4	Υψόμετρο εξόδου	[ m ]	43.9
5	Υψομετρική διαφορά, Δz	[ m ]	706.9
6	Χρόνος συρροής / συγκέντρωσης, t <sub>c</sub>	[ h ]	9.8

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας, για πλημμύρες με μέση πιθανότητα υπέρβασης, ελέγχεται η περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης, T<sub>επαν</sub>, 100 έτη. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Κουκουβίνο Α. στη συνεισφορά του στο Ερευνητικό Πρόγραμμα ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (2014), για λεκάνες μεγαλύτερες των 10km<sup>2</sup>, το χρονικό βήμα μελέτης είναι ωριαίο. Οι όμβριες καμπύλες των επιλεγμένων βροχομετρικών σταθμών στην περιοχή μελέτης, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών και, τυχαία επιλεγμένη, χρονική διάρκεια 5 ωρών, δίνουν τις σημειακές βροχοπτώσεις του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2: Σημειακή βροχόπτωση (d=5h, T=100y) στους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς

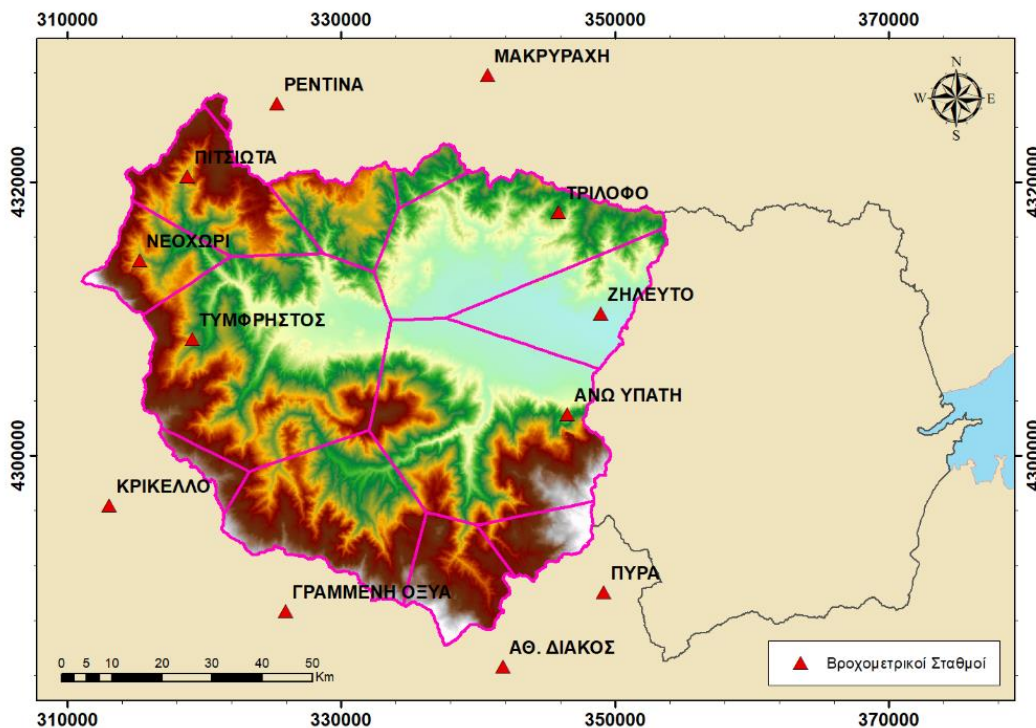
α/α	Βροχομετρικός Σταθμός	i(d,T)	
		[ mm·h <sup>-1</sup> ]	[ mm ]
1	<b>ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ</b>	24.61	123.03
2	<b>ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ</b>	19.33	96.66
3	<b>ΚΡΙΚΕΛΛΟ</b>	22.08	110.39
4	<b>ΠΥΡΑ</b>	26.25	131.27
5	<b>ΝΕΟΧΩΡΙ</b>	19.91	99.54
6	<b>ΠΙΤΣΙΩΤΑ</b>	14.38	71.89
7	<b>ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ</b>	16.17	80.86
8	<b>ΤΡΙΛΟΦΟ</b>	16.04	80.19
9	<b>ΑΝΩ ΥΠΑΤΗ</b>	18.39	91.97
10	<b>ΖΗΛΕΥΤΟ</b>	14.02	70.12
11	<b>ΜΑΚΡΥΡΑΧΗ</b>	16.01	80.06
12	<b>ΡΕΝΤΙΝΑ</b>	17.26	86.29



Από τα πρώτα βήματα στην υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής, πρέπει να είναι η αναγωγή της σημειακής βροχόπτωσης των όμβριων καμπυλών σε επιφανειακή. Αυτό επιτυγχάνεται με τις μεθόδους που αναλύονται στο κεφάλαιο 2.2. Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκε η επιφανειακή ολοκλήρωση μέσω των πολυγώνων Thiessen και του συντελεστή αναγωγής  $\phi$ , και, εν τέλει, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της πρώτης μεθόδου υπέρ της ασφαλείας, αφού οδηγούν σε δυσμενέστερο υετογράφημα. Συγκεκριμένα, στους βροχομετρικούς σταθμούς, που επιλέχθηκαν στο κεφάλαιο 4.2, μέσω της εντολής *Create Thiessen Polygons* στο πρόγραμμα *ArcMap*, οι επιφάνειες Thiessen που τους αναλογούν φαίνονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Πολύγωνα Thiessen για τους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς

α/α	Βροχομετρικός Σταθμός	Έκταση Thiessen	
		[ km <sup>2</sup> ]	[ % ]
1	ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ	47.82	4.77
2	ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ	111.04	11.07
3	ΚΡΙΚΕΛΛΟ	12.24	1.22
4	ΠΥΡΑ	27.77	2.77
5	ΝΕΟΧΩΡΙ	41.75	4.16
6	ΠΙΤΣΙΩΤΑ	74.44	7.42
7	ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	223.04	22.24
8	ΤΡΙΛΟΦΟ	136.28	13.59
9	ΑΝΩ ΥΠΑΤΗ	197.63	19.70
10	ΖΗΛΕΥΤΟ	71.40	7.12
11	ΜΑΚΡΥΡΑΧΗ	12.19	1.22
12	ΡΕΝΤΙΝΑ	47.45	4.73
<b>Σύνολο</b>		1003.06	100.00



Σχήμα 5.1: Χάρτης πολυγώνων Thiessen για τους επιλεγμένους βροχομετρικούς σταθμούς

Προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιείται η εντολή *Sumproduct* του προγράμματος *Excel*, η οποία πρακτικά υπολογίζει το άθροισμα των γινομένων της σημειακής βροχόπτωσης (Πίνακας 5.2) σε κάθε βροχομετρικό σταθμό με το ποσοστό συνεισφοράς (Πίνακας 5.3) του σταθμού στη συνολική λεκάνη απορροής. Εκτελώντας την ίδια εντολή για όλες τις χρονικές διάρκειες, έως την επιλεγμένη 24ωρη βροχόπτωση, προκύπτει η επιφανειακά ολοκληρωμένη βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς 100 ετών.

Πίνακας 5.4: Επιφανειακά ολοκληρωμένη βροχόπτωση, περίοδου επαναφοράς 100 ετών, για την περιοχή μελέτης

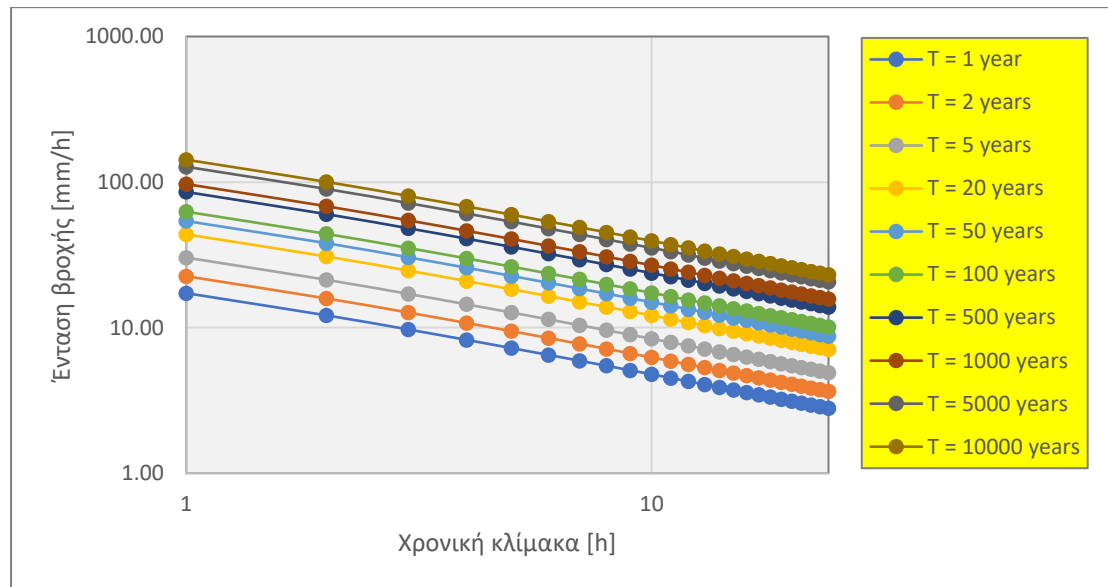
d [ h ]	i(d,T) [ mm·h <sup>-1</sup> ]	d [ h ]	i(d,T) [ mm·h <sup>-1</sup> ]	d [ h ]	i(d,T) [ mm·h <sup>-1</sup> ]
1	44.63	9	12.32	17	8.33
2	30.30	10	11.55	18	8.04
3	23.91	11	10.89	19	7.77
4	20.14	12	10.32	20	7.53
5	17.61	13	9.83	21	7.31
6	15.77	14	9.39	22	7.10
7	14.36	15	9.00	23	6.91
8	13.24	16	8.64	24	6.73

Για λόγους πληρότητας της ανάλυσης, η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε, σε όλους τους σταθμούς, για περιόδους επαναφοράς από 1 έως 10000 έτη με σκοπό την οπτικοποίηση της μορφής των όμβριων καμπυλών. Συγκεκριμένα,





για το σταθμό «ΠΥΡΑ», που παρουσιάζει την εντονότερη βροχόπτωση, οι όμβριες καμπύλες προκύπτουν ως εξής:

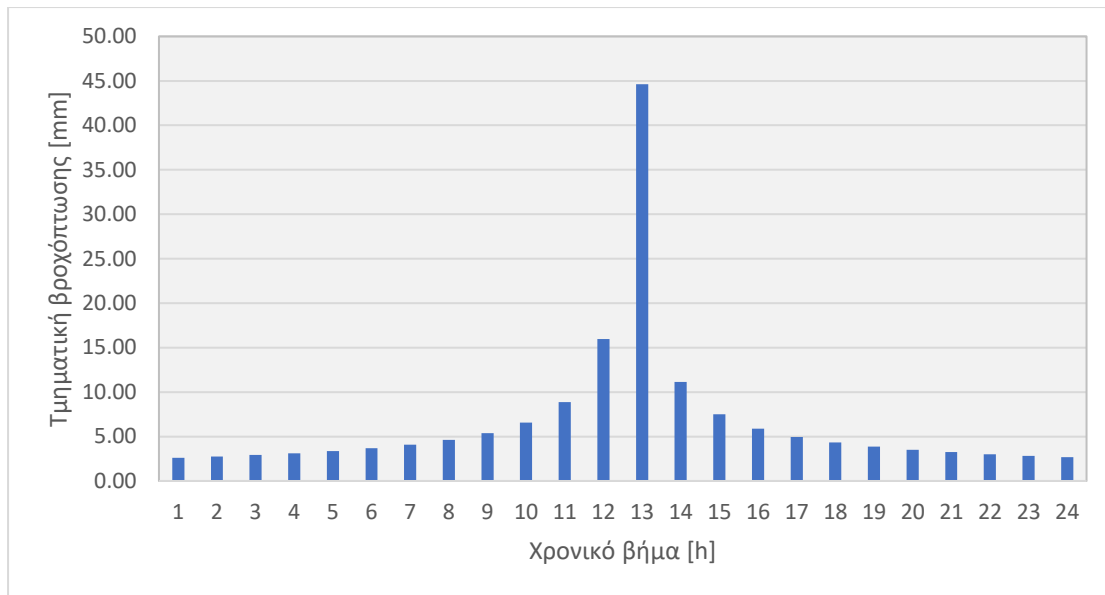


Σχήμα 5.2: Ανάλυση όμβριων καμπυλών βροχομετρικού σταθμού «ΠΥΡΑ»

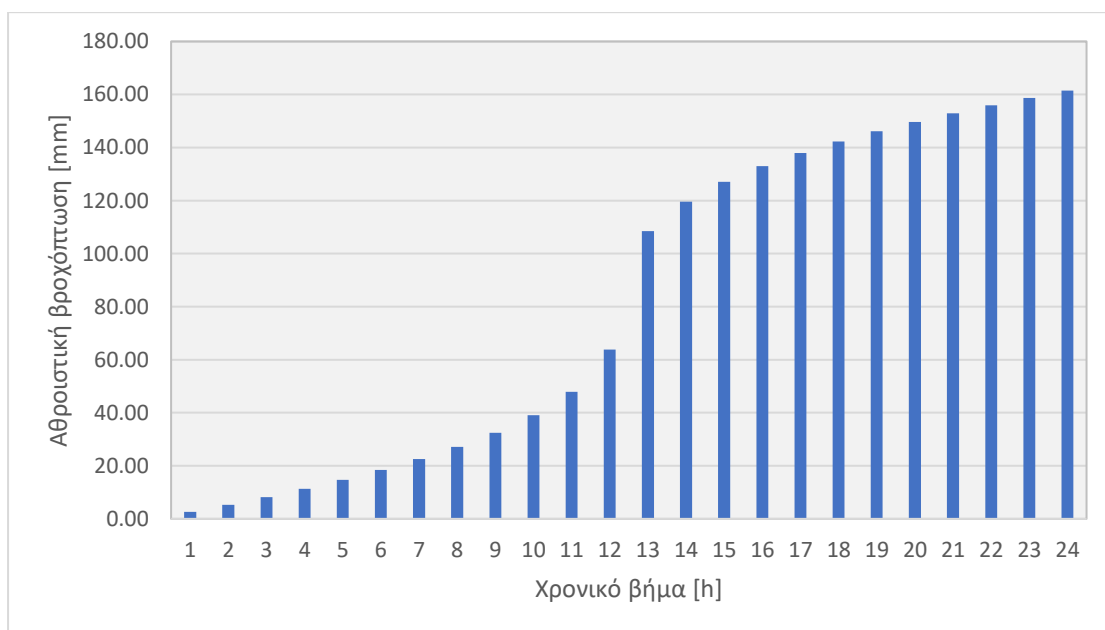
Έπειτα, εφαρμόζεται η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ, προκειμένου να προκύψει ένα ρεαλιστικό σενάριο βροχόπτωσης, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2.3. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι αρκετά απλή, και αποτελείται από τα εξής υπολογιστικά βήματα:

- 1) Παράθεση της επιφανειακά ανηγμένης βροχόπτωσης για την επιλεγμένη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου
- 2) Υπολογισμός των αθροιστικών βροχοπτώσεων
- 3) Υπολογισμός των επιμέρους τμηματικών βροχοπτώσεων
- 4) Αναδιάταξη των τμηματικών βροχοπτώσεων, του βήματος (3), με τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται στη μέση και οι υπόλοιπες εναλλάξ γύρω από αυτήν
- 5) Άθροιση των αναδιατεταγμένων τμηματικών βροχοπτώσεων

Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα, για βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 100 ετών, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



Σχήμα 5.3: Υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 100 ετών



Σχήμα 5.4: Αθροιστικό υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 100 ετών

Τέλος, ακολουθώντας τη διαδικασία υπολογισμού του αριθμού καμπύλης απορροής, CN, όπως αυτός ορίζεται στο κεφάλαιο 2.4, προκύπτουν οι τιμές του αριθμού για ξηρές, κανονικές και υγρές φάσεις του εδάφους της λεκάνης απορροής.

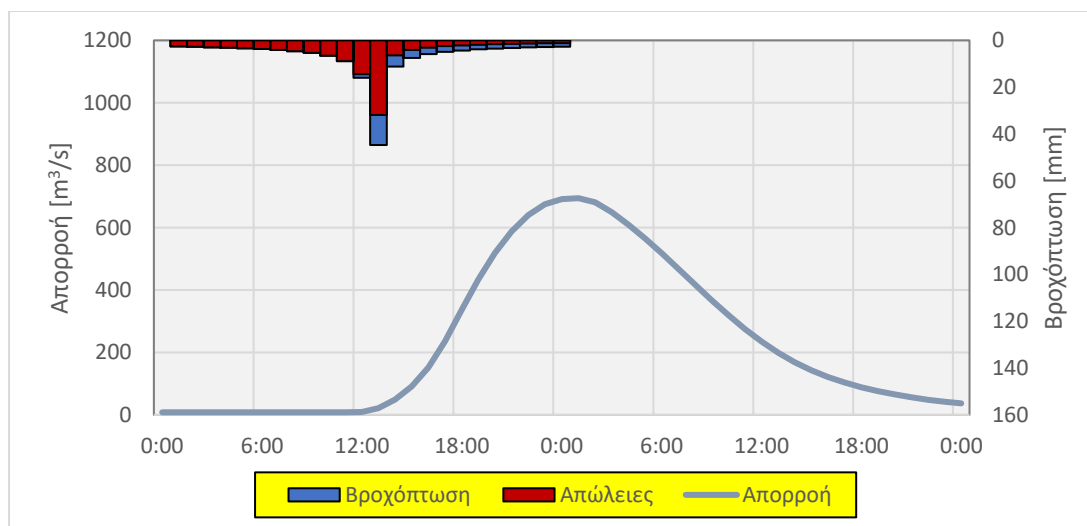
Πίνακας 5.5: Αριθμός καμπύλης απορροής, CN, για την περιοχή μελέτης

Κατάσταση Εδάφους	Ξηρό	Κανονική	Υγρό
<b>CN</b>	53.3049	73.1037	86.2095

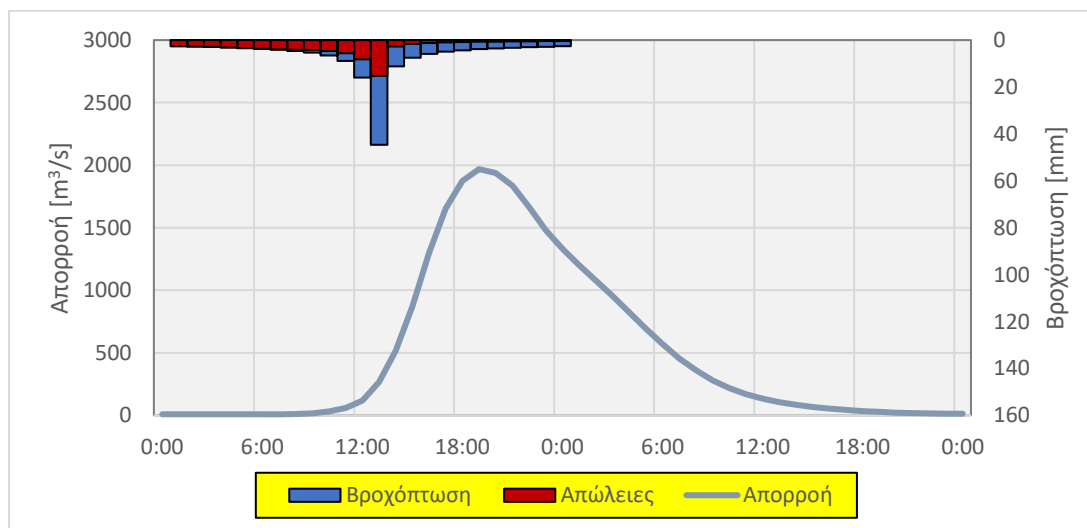


## 5.2 Υδρολογική απόκριση της περιοχής ανάντη

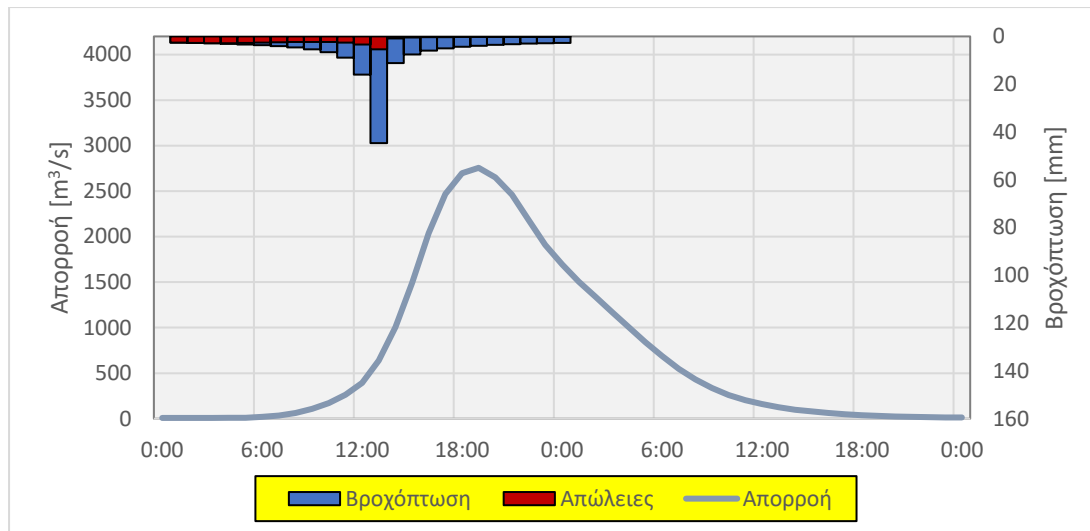
Ακολουθώντας τις οδηγίες του ΥΠΕΝ και συνδυάζοντάς τις με το λογισμικό *HEC-HMS*, όπως αυτό αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2, το υετογράφημα σχεδιασμού, εντός της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής μεταφράστηκε στα παρακάτω πλημμυρογραφήματα (Σχήμα 5.5, Σχήμα 5.6 και Σχήμα 5.7), για τις εξεταζόμενες συνθήκες εδάφους (Πίνακας 5.5).



Σχήμα 5.5: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για ξηρές συνθήκες εδάφους,  $CN_1$



Σχήμα 5.6: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για κανονικές συνθήκες εδάφους,  $CN_{II}$

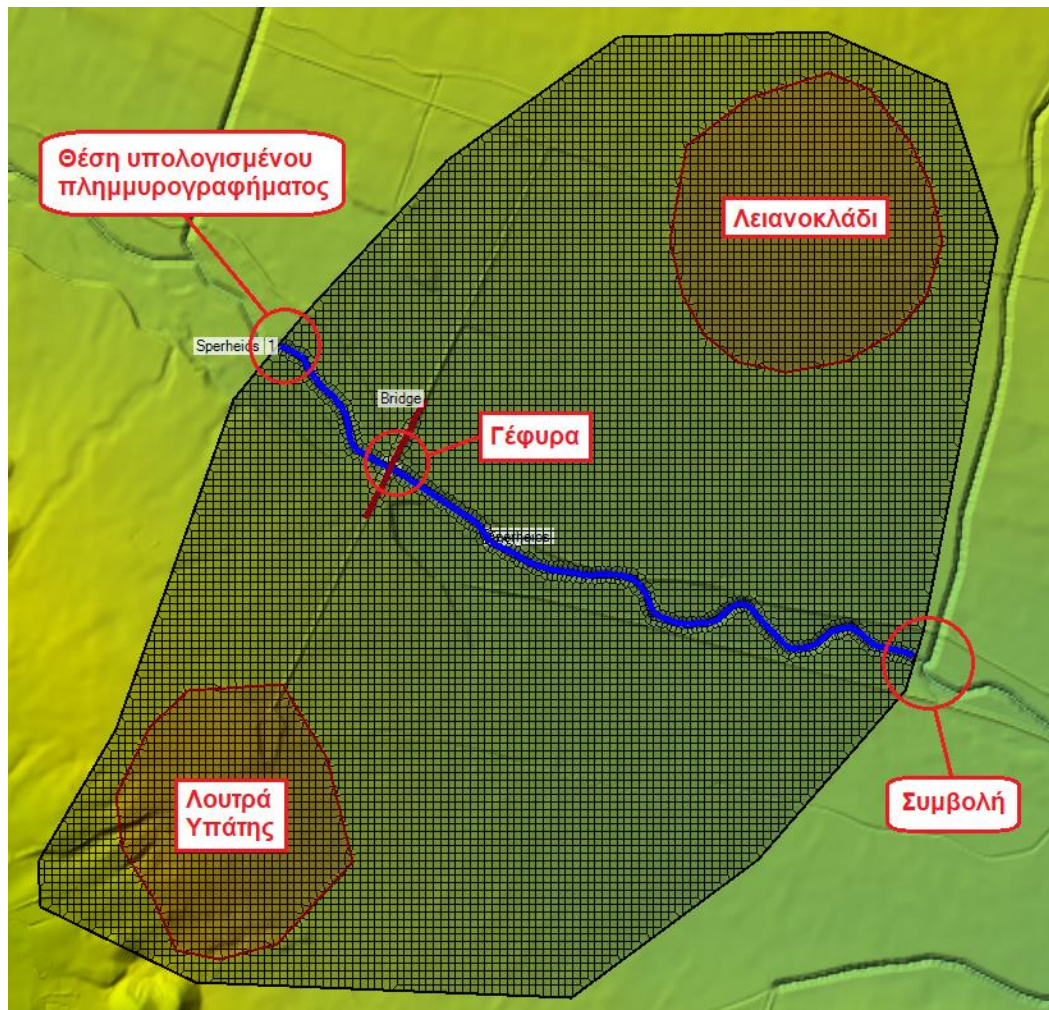


Σχήμα 5.7: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για υγρές συνθήκες εδάφους,  $CN_{III}$

Στα παραπάνω διαγράμματα, εκτός της πλημμυρικής απορροής, παρατίθενται και τα υδρογραφήματα της βροχόπτωσης με τις αντίστοιχες απώλειες. Όπως είναι φυσικό, το περισσότερο κορεσμένο έδαφος οδηγεί σε μικρότερες απώλειες του βρόχινου νερού, δηλαδή σε μεγαλύτερη ενεργή βροχόπτωση και, κατ' επέκταση, μεγαλύτερες πλημμυρικές παροχές.

### 5.3 Υδραυλική απόκριση της περιοχής κατάντη

Στα πλαίσια της υδραυλικής προσομοίωσης, επιλέχθηκε να μελετηθεί η περιοχή του ποταμού Σπερχειού από τη γέφυρα στα Νοτιοδυτικά του Λειανοκλαδίου έως την αμέσως επόμενη σημαντική συμβολή στον ποταμό, η οποία βρίσκεται στα ανατολικά του χωριού. Η συμβολή αυτή βρίσκεται, περίπου, 3km κατάντη της γέφυρας και ενώνεται με τον κύριο ποταμό σχεδόν κάθετα σε αυτόν. Η περιοχή προσομοίωσης (Σχήμα 5.8) περιέχει δύο αστικούς ιστούς μικρού πληθυσμού (χωριά), το Λειανοκλάδι, στα αριστερά, και τα Λουτρά Υπάτης, στα δεξιά του ποταμού. Η ύπαρξη αστικού ιστού εντός της περιοχής προσομοίωσης θεωρείται δόκιμη, καθώς είναι μεγάλης σημασίας οι επιπτώσεις μιας πλημμύρας που εισέρχεται σε αστικό ιστό, τόσο για τους κινδύνους που ενέχει ως προς τον άνθρωπο, όσο και για τις υλικές ζημιές που μπορεί να προκληθούν.



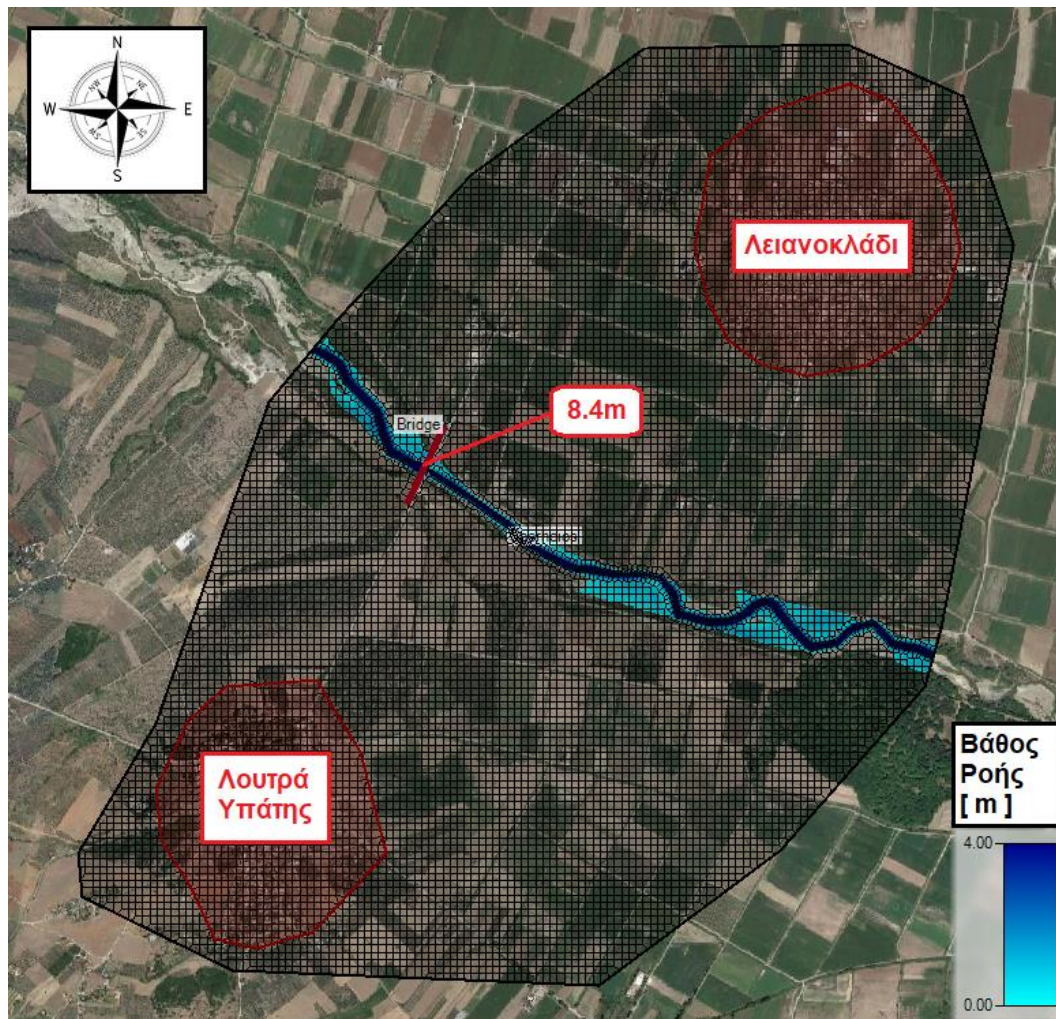
Σχήμα 5.8: Περιοχή προσομοίωσης στο πρόγραμμα HEC-RAS

Ακολουθώντας το ροϊκό διάγραμμα (Σχήμα 3.4) και τις οδηγίες του αντίστοιχου κεφαλαίου, για τις τρεις συνθήκες του εδάφους (Πίνακας 5.5), τα βάθη ροής που προκύπτουν στη θέση της γέφυρας του Λειανοκλαδίου φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 5.6: Χρονική στιγμή εμφάνισης μέγιστου βάθους ροής, στη γέφυρα Λειανοκλαδίου, σε σχέση με τις συνθήκες του εδάφους

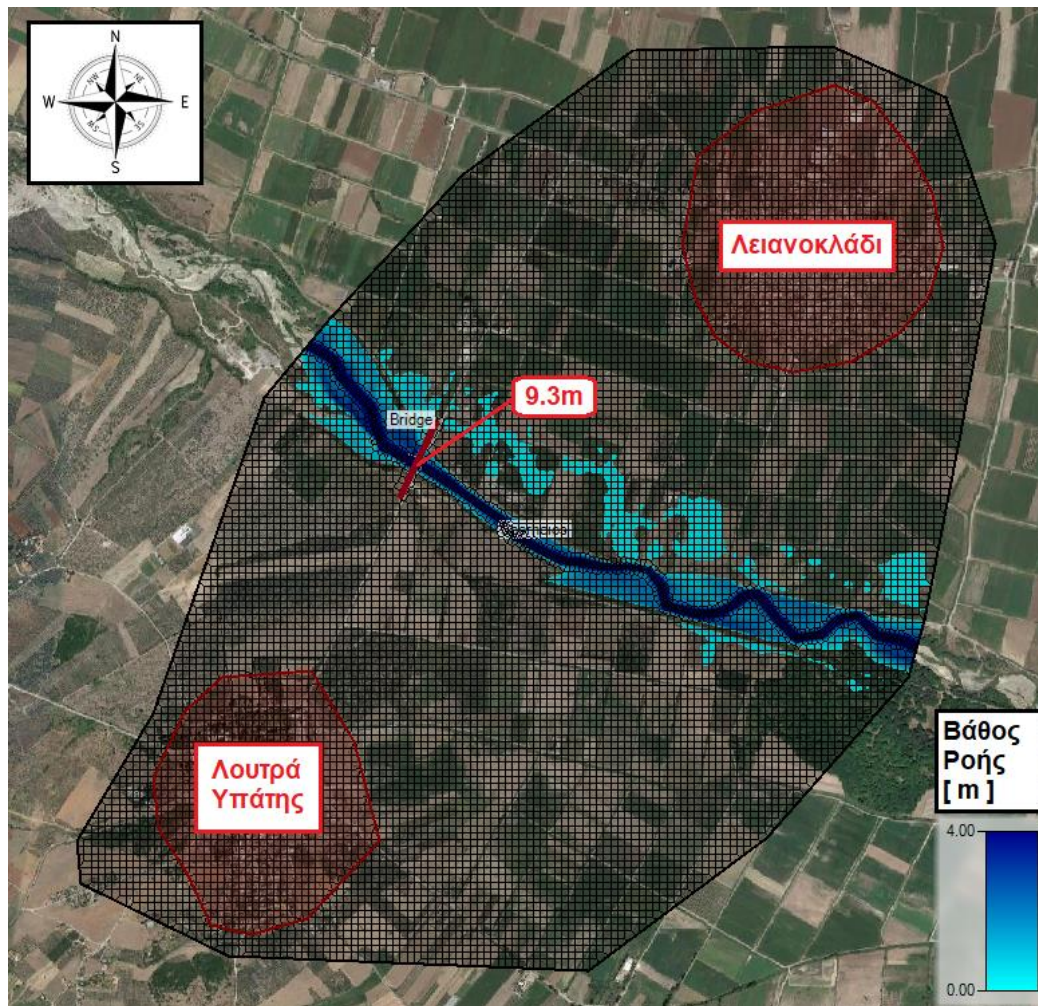
Συνθήκες Εδάφους	Χρονική Στιγμή [ h:m ]	Βάθος Ροής [ m ]
Ξηρές	01:00	8.4
Κανονικές	19:05	9.3
Υγρές	19:00	10.5





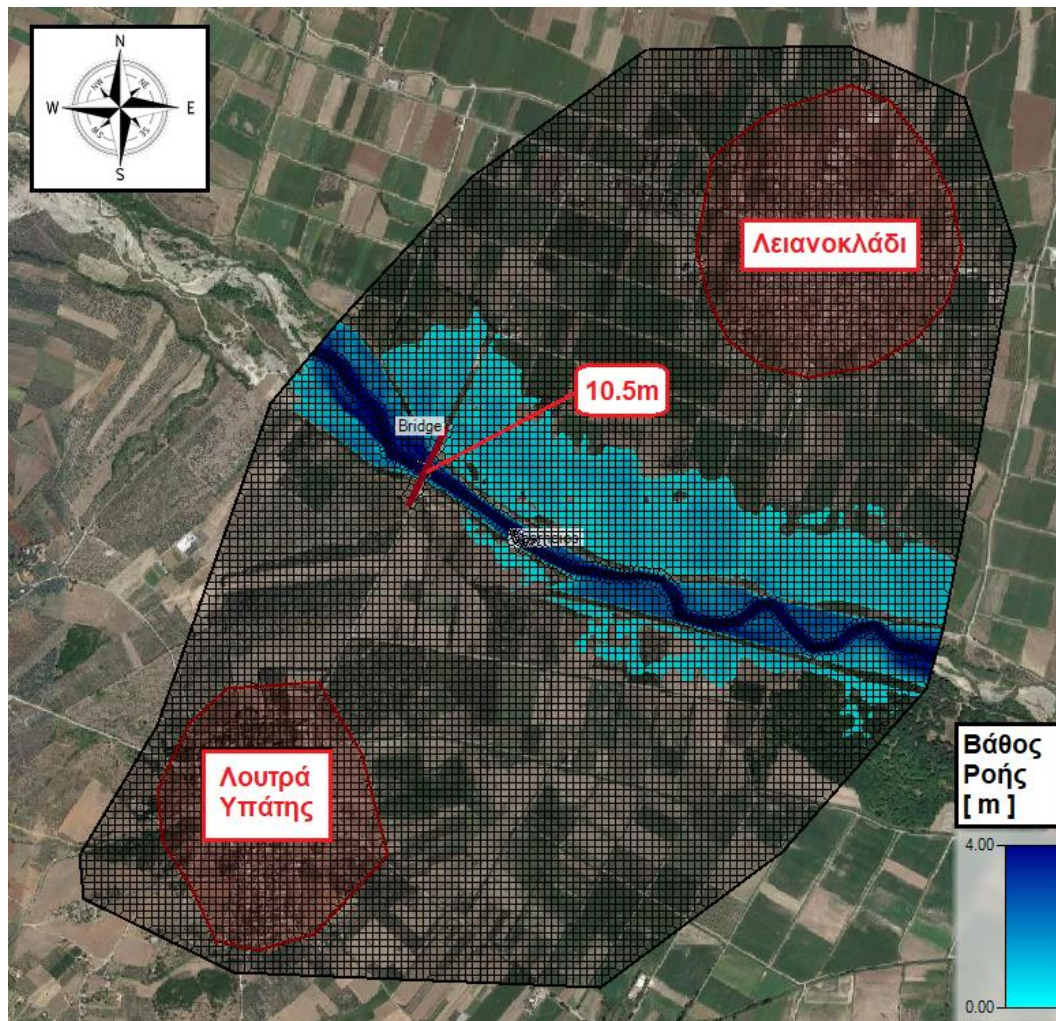
Σχήμα 5.9: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό ξηρές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου





Σχήμα 5.10: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό κανονικές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου





Σχήμα 5.11: Εξάπλωση της πλημμυρικής ροής, για πλημμυρικό επεισόδιο υπό υγρές συνθήκες, και βάθος ροής [m] στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 5.6) παρατηρείται, αρχικά, η αναμενόμενη αύξηση του βάθους ροής του ύδατος, στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου, με την αύξηση του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Μια δεύτερη παρατήρηση είναι ότι στην περίπτωση των ξηρών συνθηκών του εδάφους, η πλημμυρική αιχμή φτάνει αργότερα, όπως ήταν αναμενόμενο, απ' ότι στις περιπτώσεις των μέσων και υγρών συνθηκών του εδάφους, οι οποίες φαίνεται να εμφανίζουν μέγιστο την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό, πιθανώς να σημαίνει ότι υπάρχει μια σχέση, εκθετικής μορφής, μεταξύ του χρόνου εμφάνισης της αιχμής και του βαθμού κορεσμού του εδάφους, με την παράμετρο του χρόνου να φτάνει σε μια άνω τιμή/ όριο μόλις από τις κανονικές συνθήκες κορεσμού. Μια τελευταία παρατήρηση, που μπορεί να γίνει, είναι ότι ο ποταμός υπερχειλίζει υπό κανονικές και υγρές συνθήκες εδάφους με το βάθος ροής του ύδατος, στα αριστερά της κοίτης, να είναι αμελητέο στις πρώτες, ενώ στις τελευταίες να φτάνει, κατά τόπους, τα 80cm με, όμως, μικρή ταχύτητα ροής της τάξης των 0.8 m/s. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο αστικός ιστός παραμένει ασφαλής από υπερχειλίσεις του Σπερχειού ποταμού.



## 5.4 Στερεομεταφορά

Σε μια προσπάθεια προσέγγισης του πολυσύνθετου προβλήματος της στερεοαπορροής που εμφανίζεται σε μια λεκάνη απορροής, μελετήθηκαν τρία ξεχωριστά μοντέλα εκτίμησης. Ύστερα από σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με κατάλληλο σχολιασμό επ' αυτών, επιλέχθηκε ένα μοντέλο ως κατάλληλο για τις συνθήκες της περιοχής μελέτης.

### 5.4.1 Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (ΑΠΕΕΑ ή RUSLE)

Αξιοποιώντας στοιχεία από επιστημονικά άρθρα και τη βιβλιογραφία, εφαρμόστηκε το μοντέλο RUSLE, σε περιβάλλον GIS, για επιλεγμένες μεθόδους υπολογισμού των παραμέτρων του και όλων των πιθανών συνδυασμών τους. Η μέση ετήσια στερεοαπορροή της υπολεκάνης του Σπερχειού ποταμού, έκτασης 100306ha, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συνδυασμών μεθόδων εκτίμησης συντελεστών του μοντέλου RUSLE

α/α	Συνδυασμός Μεθόδων	Εδαφική Διάβρωση	
		[ t · ha <sup>-1</sup> · y <sup>-1</sup> ]	[ t · y <sup>-1</sup> ]
1	LS ~ Wischmeier & Smith (1978) R <sub>1</sub> ~ Φλαμπούρης (2008)	19.5	1953310.0
2	LS ~ Wischmeier & Smith (1978) R <sub>2</sub> ~ Φλαμπούρης (2008)	9.1	917282.0
3	LS ~ Moore & Burch (1986) R <sub>1</sub> ~ Φλαμπούρης (2008)	9.0	905531.0
4	LS ~ Moore & Burch (1986) R <sub>2</sub> ~ Φλαμπούρης (2008)	4.3	426425.0

Σύμφωνα με την συγκριτική έρευνα που διεξήγαγαν οι Hrabalíková M. και Japeček M., το 2017, για τις διάφορες σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή ανάγλυφου LS του μοντέλου RUSLE, οι εξισώσεις των Wischmeier & Smith (1978) και Moore & Burch (1986) κρίθηκαν ως οι πιο αξιόπιστες, καθώς έδωσαν σχεδόν ίδιες εκτιμήσεις στερεοαπορροής μεταξύ τους, οι οποίες ήταν αρκετά κοντά και στη μετρημένη, πραγματική, στερεοαπορροή.

Μελετώντας τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, οι δύο μέθοδοι δεν αποδίδουν παρεμφερή εκτιμήσεις για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής.

Πίνακας 5.8: Σύγκριση "επικρατέστερων" μεθόδων εκτίμησης συντελεστή ανάγλυφου LS του μοντέλου RUSLE

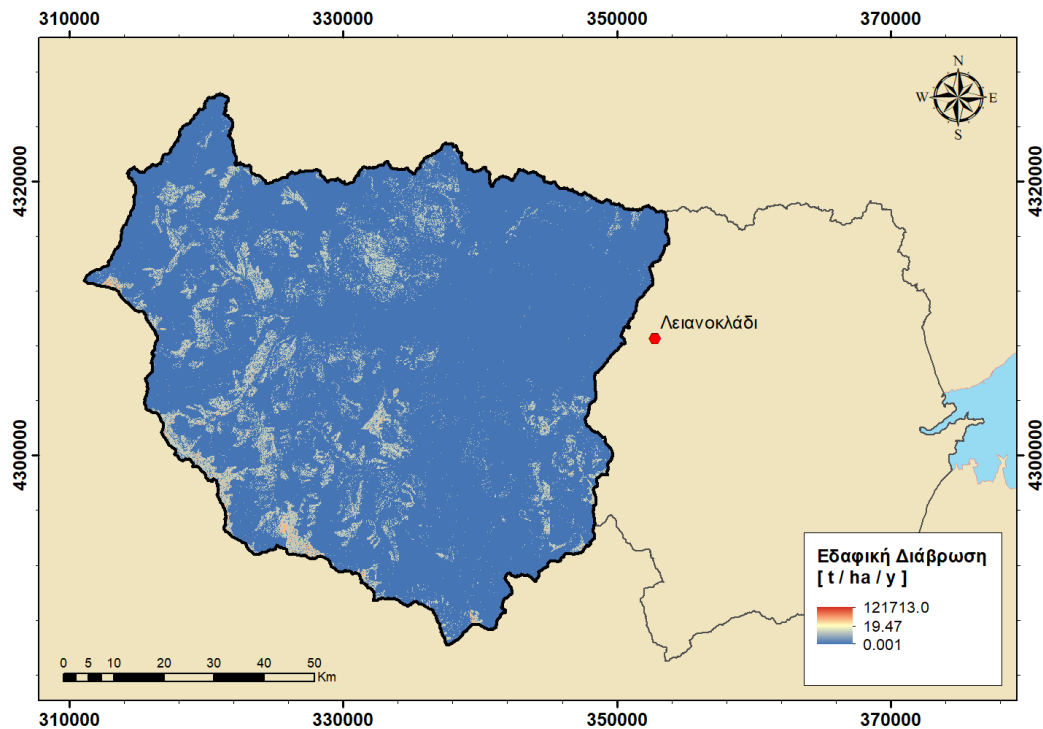
α/α	Μέθοδος	Εδαφική Διάβρωση	Διαφορά
		[ t · y <sup>-1</sup> ]	[ % ]
1	Wischmeier & Smith (1978) <sup>12</sup>	1953310.0	215.7
2	Moore & Burch (1986)	905531.0	

<sup>12</sup> Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος σε περιβάλλον GIS, στη θέση του μήκους κλίσης λ χρησιμοποιήθηκε η ανάντη επιφάνεια απορροής A<sub>s</sub>. Το μέγεθος A<sub>s</sub> σε περιβάλλον GIS υπολογίζεται ως το γινόμενο του (Flow Accumulation) · (DEM's Cell Size).



Σε αντίθετη κατεύθυνση από τους παραπάνω ερευνητές, στις συνθήκες της υπό εξέταση λεκάνης απορροής (Ελλάδα, Νοτιοανατολική Ευρώπη), οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από εκείνες που είχαν οι προηγούμενοι (Τσεχία, Κεντρική Ευρώπη), οι δύο εξισώσεις εκτίμησης του συντελεστή ανάγλυφου LS παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. Η σημαντική απόκλιση αυτή αποδίδεται στην έντονη διαφοροποίηση της γεωμορφολογίας μεταξύ των δύο χωρών. Επαληθεύοντας την πληθώρα των ερευνών επί του θέματος, το ζήτημα της στερεοαπορροής είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης.

Ωστόσο, δεχόμενοι ότι η εξίσωση των Wischmeier & Smith (1978) δίνει τα κοντινότερα στην πραγματικότητα αποτελέσματα, όπως κατέληξαν οι Hrabalíková M. και Jančeček M. (2017), επιλέγεται αυτή για την ολοκλήρωση της διερεύνησης του ζητήματος της στερεοαπορροής στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής.



Σχήμα 5.12: Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, βάσει του μοντέλου RUSLE (LS ~ Wischmeier & Smith (1978), R(y) ~ Φλαμπούρης (2008))

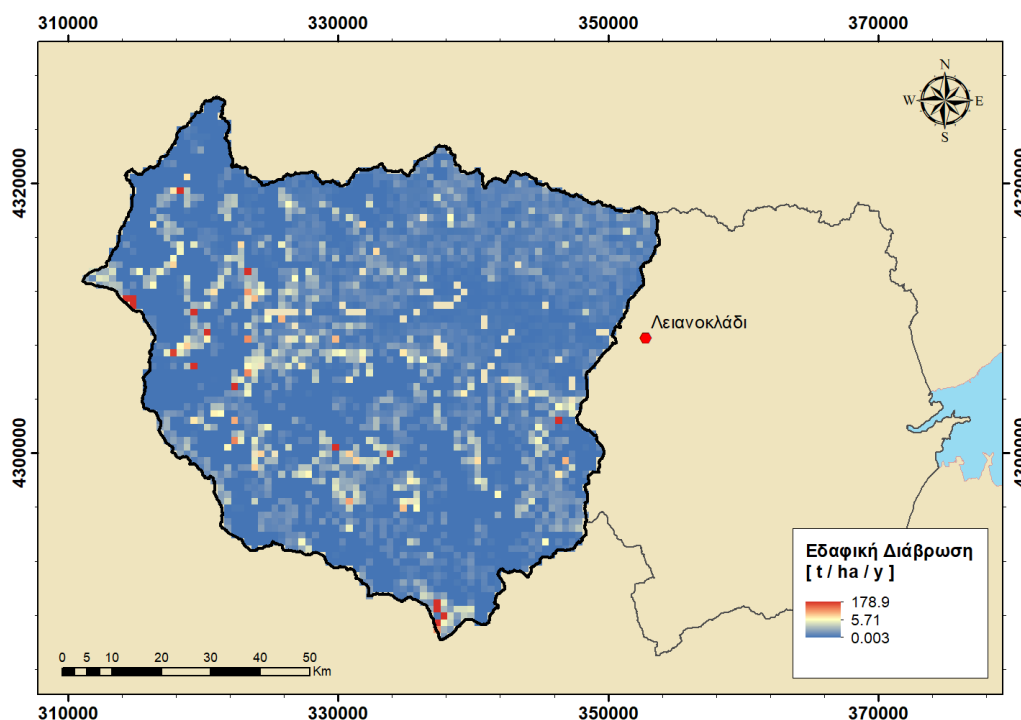
Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που παρέχει ελεύθερα στους ερευνητές η ESDAC, η εδαφική απώλεια της περιοχής μελέτης (Σχήμα 5.13) φαίνεται στον πίνακα 5.10.



Πίνακας 5.9: Σύγκριση επιλεγμένου συνδυασμού μεθόδων εκτίμησης με την εκτίμηση της ESDAC

α/α	Συνδυασμός Μεθόδων	Εδαφική Διάβρωση	
		[ t · ha <sup>-1</sup> · y <sup>-1</sup> ]	[ t · y <sup>-1</sup> ]
1	LS ~ Wischmeier & Smith (1978) R <sub>1</sub> ~ Flampouris (2008)	19.5	1953310.0
2 {ESDAC}	LS ~ Desmet & Govers (1996) R ~ Brown & Foster (1987)	5.7	574623.0

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των εκτιμήσεων των δύο συνδυασμών μεθόδων. Το αποτέλεσμα αυτό θεωρείται αναμενόμενο καθώς η ακρίβεια των χαρτών (ανάλυση: 25m×25m, 100m×100m, 500m×500m) με τους συντελεστές του μοντέλου RUSLE, που παρέχονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, είναι σημαντικά μικρότερη έναντι των παραγόμενων χαρτών (ανάλυση: 5m×5m).



Σχήμα 5.13: Χάρτης εδαφικής απώλειας, βάσει του μοντέλου RUSLE (δεδομένα της ESDAC)

Όσον αφορά τη στερεοαπορροή, που τελικά παρατηρείται στην έξοδο της υπό εξέταση λεκάνης, προσδιορίζοντας τους συντελεστές στερεοαπορροής, όπως αυτοί ορίστηκαν από διάφορους μελετητές, προέκυψαν τα μεγέθη του πίνακα 5.11.



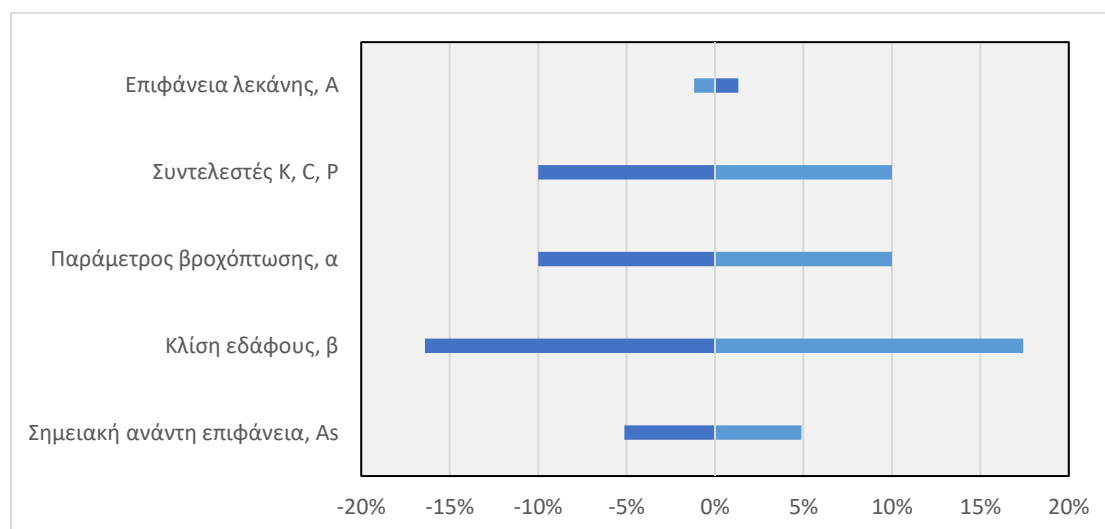


Πίνακας 5.10: Συντελεστές στερεοαπορροής, βάσει διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης, και τελική στερεοαπορροή για τον επιλεγμένο συνδυασμό μεθόδων εκτίμησης των συντελεστών του μοντέλου RUSLE

α/α	Μέθοδος	Συντελεστής Στερεοαπορροής, SDR	Στερεοαπορροή [t · y <sup>-1</sup> ]
1	USDA SCS (1979)	0.265	517627.0
2	Vanoni (1975)	0.199	388709.0
3	Renfro (1975)	0.233	455121.0

Εφόσον δεν υπάρχουν μετρήσεις πραγματικής στερεοαπορροής για την περιοχή μελέτης, θεωρείται ότι η εξίσωση που κατέληξε ο Vanoni V. A., το 1975, αξιοποιώντας δεδομένα από 300 λεκάνες παγκοσμίως, καταλήγει σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Οι εξισώσεις των USDA SCS (1971) και Renfro (1975), παρά την υψηλή συσχέτιση της τελευταίας με πραγματικές μετρήσεις στερεοαπορροής ( $R^2 = 0.92$ ), μπορούν να θεωρηθούν ανεπαρκείς, καθώς έχουν προκύψει από έρευνα σε όχι μόνο μικρότερες λεκάνες απορροής, αλλά και διαφορετικής γεωμορφολογίας, παράγοντας καθοριστικός όπως φάνηκε και από τους παραπάνω πίνακες αποτελεσμάτων.

Ύστερα από ανάλυση ευαισθησίας της στερεοαπορροής, που υπολογίζεται μέσω του μοντέλου RUSLE, με μεταβολή στις παραμέτρους που ήταν εφικτό κατά  $\pm 10\%$ , προέκυψε ότι μεγαλύτερη σημασία στο μοντέλο έχει η εδαφική κλίση.



Σχήμα 5.14: Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου RUSLE





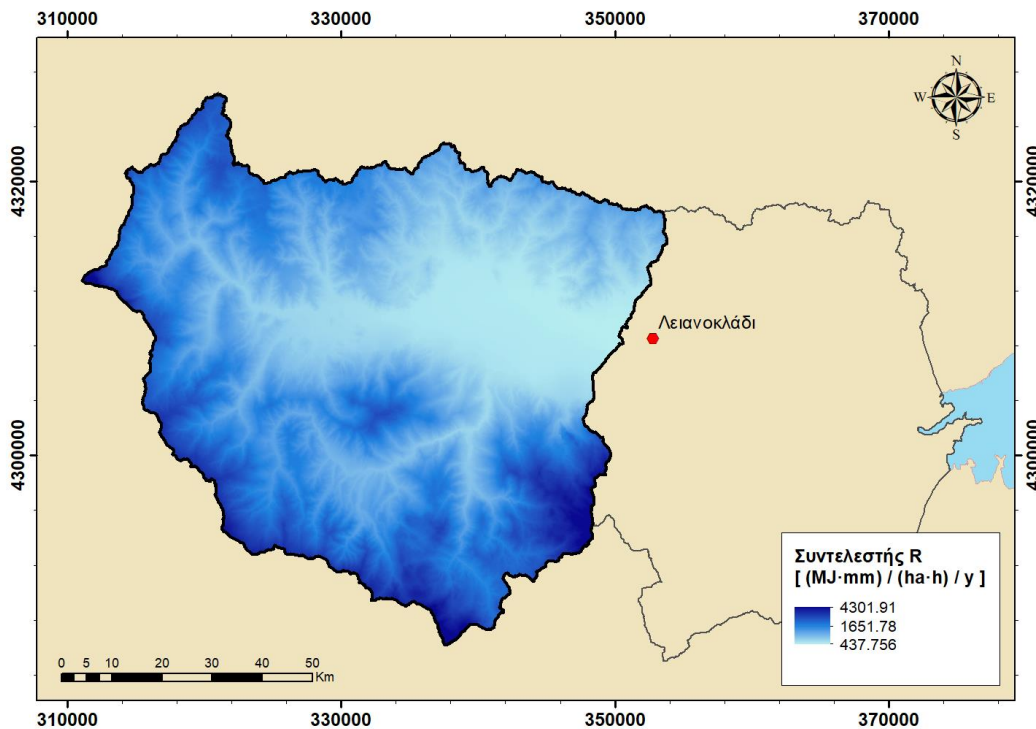
### 5.4.1.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity Factor), R

Λαμβάνοντας υπόψη την έρευνα του Φλαμπούρη Κ., το 2008, σχετικά με τη διαβρωτικότητα, R, της βροχόπτωσης, P [mm], όπως αυτή προκύπτει από την προσέγγιση του κεφαλαίου 5.4.2.1, στον Ελλαδικό χώρο, χρησιμοποιήθηκαν δύο μορφές εξίσωσης εκτίμησης του συντελεστή R:

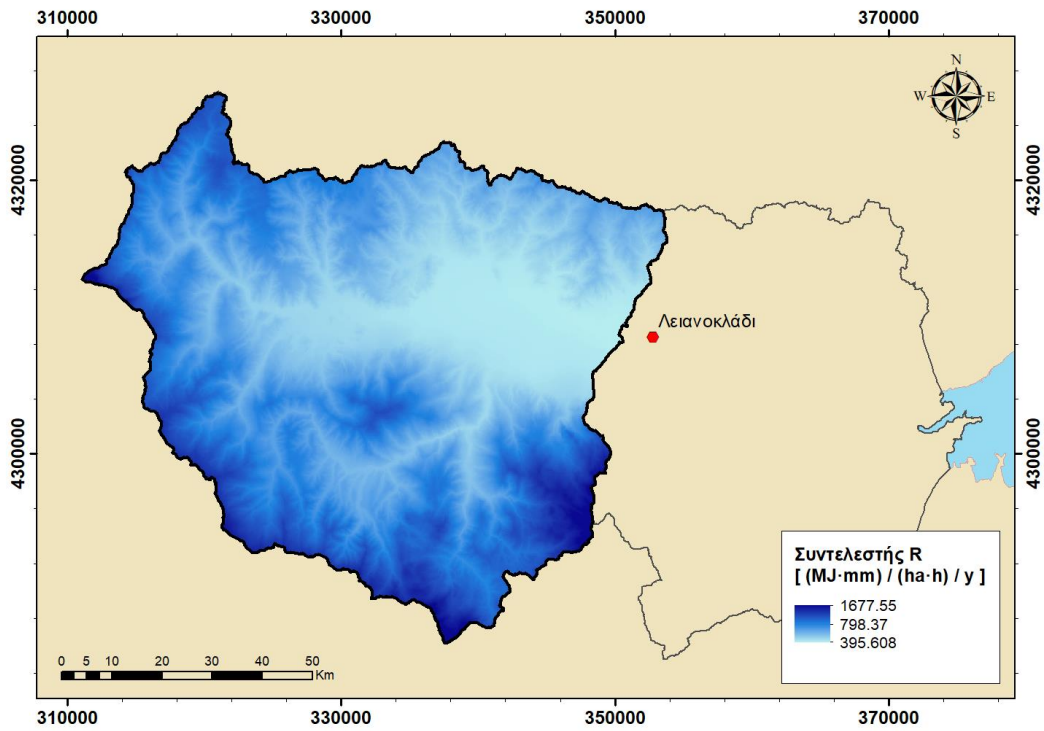
a)  $R_1 = -754.72 + 2.11 \cdot P$ ,  $R^2 = 0.63$

b)  $R_2 = 0.7 \cdot P$

Δεδομένου ότι η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της πρώτης εξίσωσης με τις πραγματικές μετρήσεις είναι ήδη χαμηλή ( $R^2 = 0.63$ ) και, σύμφωνα με τον Φλαμπούρη Κ. (2008), οι αποκλίσεις των εξισώσεων με τη μορφή της (b) εξίσωσης είναι σημαντικότερες από εκείνες των εξισώσεων με τη μορφή της (a) εξίσωσης, επιλέχθηκε η (a) για την ολοκλήρωση του μοντέλου RUSLE.



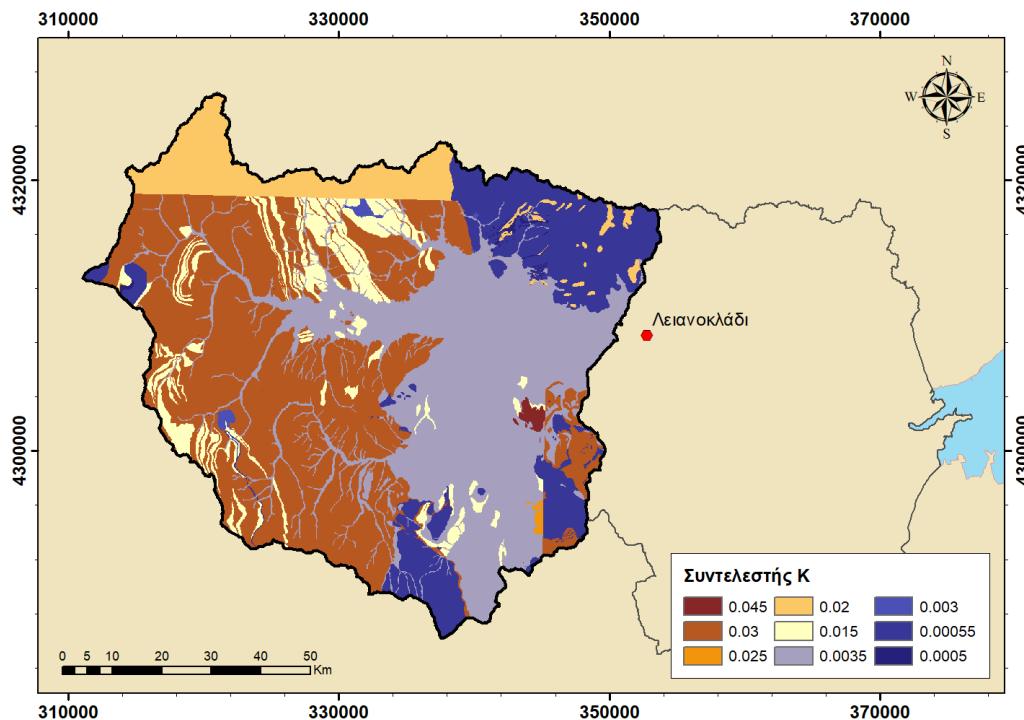
Σχήμα 5.15: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης R, για  $R_1 = -754.72 + 2.11 \cdot P$ ,  $P$  [mm]



Σχήμα 5.16: Χάρτης συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης R, για  $R2 = 0.7 \cdot P$ ,  $P$  [mm]

### 5.4.1.2 Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil Erodibility Factor), K

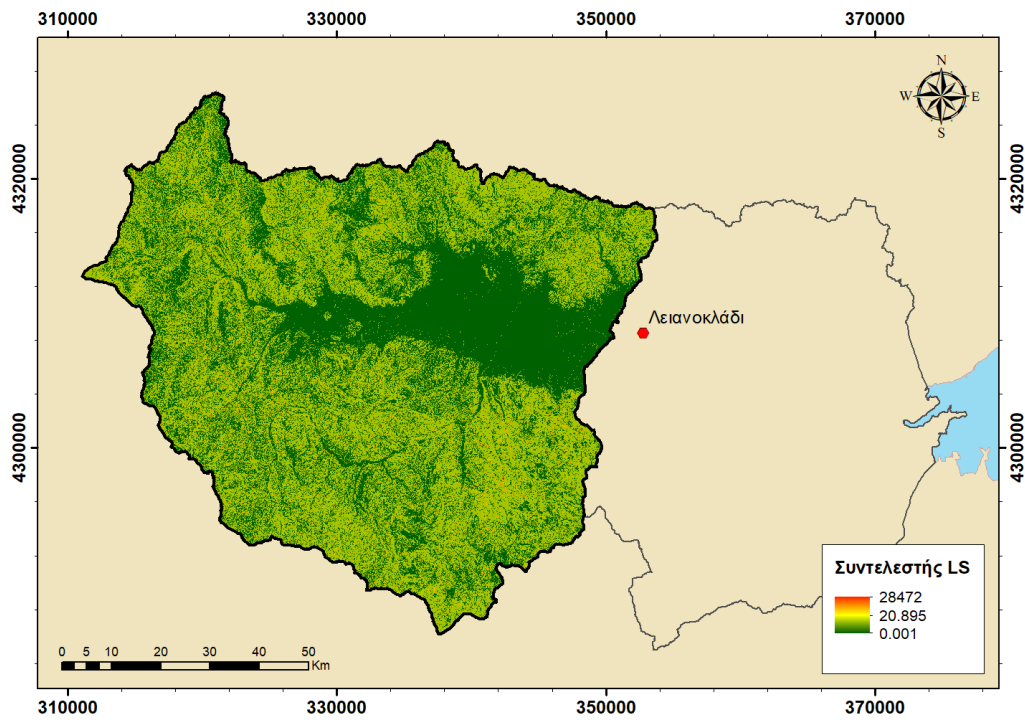
Αντιστοιχίζοντας τον ψηφιοποιημένο γεωλογικό χάρτη, του κεφαλαίου 4.5, με τις τιμές που όρισαν οι Sigalos et al., το 2010, για την περιοχή του Σπερχειού ποταμού (Πίνακας 3.2), και αναλυτικά στο αντίστοιχο Παράρτημα II: Γεωλογικοί σχηματισμοί, προκύπτει ο παρακάτω χάρτης συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K του μοντέλου RUSLE:



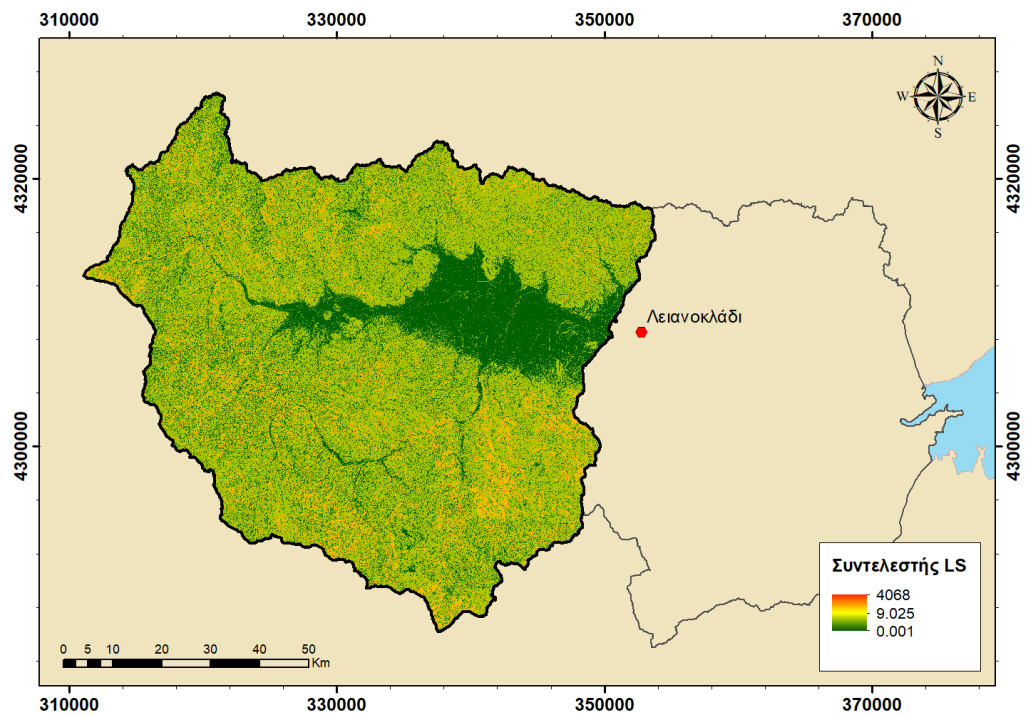
Σχήμα 5.17: Χάρτης συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K, για τα εμφανιζόμενα πετρώματα της περιοχής μελέτης

### 5.4.1.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (Slope Length & Steepness Factor), LS

Ακολουθώντας τα αποτελέσματα των Hrabalíková et al. (2017), εκτιμήθηκε ο συντελεστής ανάγλυφου LS, για το μοντέλο RUSLE, σύμφωνα με τις εξισώσεις των Wischmeier & Smith (1978) και Moore & Burch (1986), και τελικά επιλέχθηκε η εξίσωση των πρώτων, θεωρώντας την πιο αξιόπιστη καθώς “η προτεινόμενη, στο μοντέλο RUSLE, εξίσωση εκτίμησης του LS αναπτύχθηκε ύστερα από εκτενή ανάλυση δεδομένων και αυστηρή συνάφεια με τις διαδικασίες διάβρωσης που το μοντέλο RUSLE αντιπροσωπεύει”. (Moore I. D. & Wilson J. P., 1992)



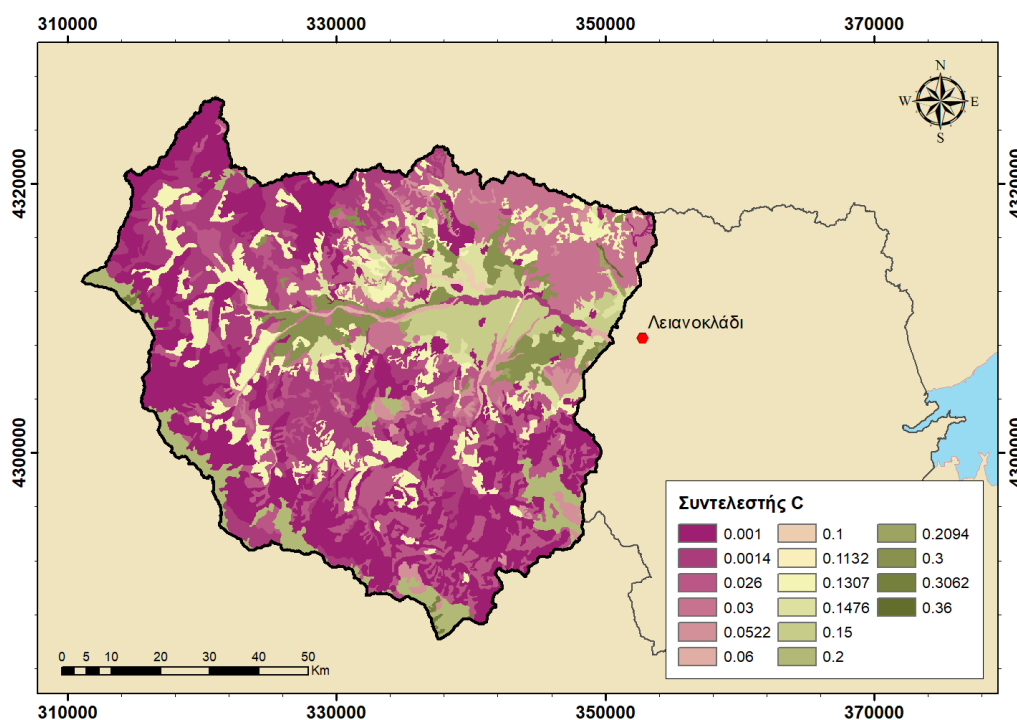
Σχήμα 5.19: Χάρτης συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την εξίσωση εκτίμησης των Wischmeier & Smith (1978)



Σχήμα 5.18: Χάρτης συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την εξίσωση εκτίμησης των Moore & Burch (1986)

#### 5.4.1.4 Συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management Factor), C

Ακολουθώντας τις τιμές του συντελεστή διαχείρισης – κάλυψης γης, C, όπως αυτές ορίστηκαν από τους Panagos P. et al. (2015), Sigalos G. et al. (2010) και Ευθυμίου Ν. (2016), και κάνοντας εκτιμήσεις για τις ελλείπουσες τιμές για τους κωδικούς CORINE που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης, κατασκευάστηκε αντίστοιχος χάρτης βασιζόμενος στον χάρτη χρήσεων γης CORINE 2018, που διατίθεται δωρεάν από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα CLMS (Copernicus Land Monitoring Service). Οι αντιστοιχισμένες τιμές του συντελεστή C που επιλέχθηκαν για τους κωδικούς Corine φαίνονται αναλυτικά στον αντίστοιχο πίνακα στα παραρτήματα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 5.20: Χάρτης συντελεστή φυτοκάλυψης C, για τις εμφανιζόμενες κάλυψης/ χρήσης γης της περιοχής μελέτης

#### 5.4.1.5 Συντελεστής προστασίας του εδάφους κατά της διάβρωσης (Support Practice Factor), P

Λόγω απουσίας δεδομένων σχετικά με τις πρακτικές και μεθόδους καλλιέργειας που χρησιμοποιούνται από τους κατόχους των εδαφικών εκτάσεων εντός της περιοχής μελέτης, θεωρήθηκε, υπέρ της ασφαλείας, ότι ο συντελεστής προστασίας κατά της εδαφικής διάβρωσης λαμβάνει παντού την τιμή 1.



## 5.4.2 Μέθοδος Gavrilovic (Erosion Potential Method), EPM

Το μοντέλο EPM, γνωστό και ως μοντέλο Gavrilovic χάριν της συμβολής του Gavrilovic S. στην ανάπτυξή του, έχει αναπτυχθεί για εφαρμογή του με δεδομένα εισόδου βασιζόμενα σε μετρήσεις πεδίου (π.χ. η χρήση της μέσης κλίσης του εδάφους). Ωστόσο, η εφαρμογή του μοντέλου σε περιβάλλον ΣΓΠ κερδίζει όλο και περισσότερο χώρο στην επιστημονική κοινότητα, καθώς είναι αισθητά πιο εύκολη η συσχέτιση των παραγόντων μεταξύ τους και δύναται η καλύτερη εκτίμηση του μεγέθους της εδαφικής απώλειας (π.χ. μέσω της χρήσης της κλίσης εδάφους σε επίπεδο κελιού), εντός της λεκάνης απορροής, χρησιμοποιώντας κανάβους υψηλής ανάλυσης (δηλαδή με μικρές διαστάσεις κελιού).

Αξίζει να σημειωθεί πως χωρίς τη χρήση ΣΓΠ, ύστερα από εκτίμηση των παραμέτρων, από επίσκεψη στην περιοχή μελέτης, και χρήση μέσων τιμών για τα αντίστοιχα μεγέθη, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 5.4.2.4, το μοντέλο οδήγησε σε σημαντική υποεκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης συγκριτικά με εκείνη που εξήχθη από τη χρήση ΣΓΠ.

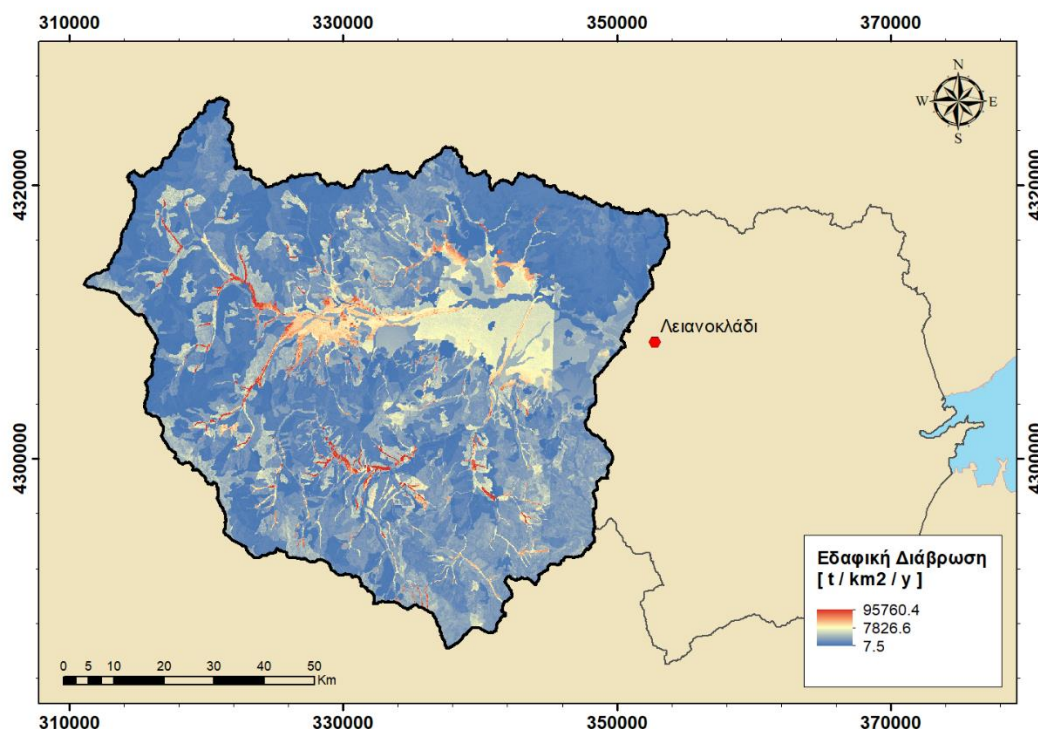
Πιο συγκεκριμένα, οι εκτιμήσεις του μοντέλου Gavrilovic για τη μέση ετήσια εδαφική διάβρωση της υπό εξέταση λεκάνης απορροής, έκτασης 1003.06km<sup>2</sup>, και για τις δύο, έως τώρα, προσεγγίσεις, αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.11: Συγκριτικά αποτελέσματα εδαφικής διάβρωσης του μοντέλου EPM, για τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις

α/α	Μοντέλο Εκτίμησης	Εδαφική Διάβρωση	
		[ t · km <sup>2</sup> · y <sup>-1</sup> ]	[ t · y <sup>-1</sup> ]
1	EPM (manual)	3749.2	3760695.7
2	EPM (GIS)	7826.6	7850578.8

Δεδομένου ότι σε περιβάλλον ΣΓΠ, εκτός από καλύτερες εκτιμήσεις, είναι και ευκολότερη η διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν το μοντέλο, ενώ ταυτόχρονα οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα (Σχήμα 5.20), επιλέχθηκε αυτή η προσέγγιση για το σκοπό της παρούσας εργασίας, ενώ ο πρότερος υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης προτείνεται για το στάδιο της προμελέτης.





Σχήμα 5.21: Χάρτης εδαφικής διάβρωσης, βάσει του μοντέλου EPM

Σε ό,τι αφορά την στερεοαπορροή που παρατηρείται στην έξοδο της λεκάνης απορροής, οι συντελεστές στερεοαπορροής / κατακράτησης, που έχουν οριστεί από πολλούς μελετητές, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.12: Συντελεστές στερεοαπορροής / κατακράτησης, βάσει διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης, και τελική στερεοαπορροή του μοντέλου EPM

α/α	Μέθοδος	Συντελεστής Στερεοαπορροής	Στερεοαπορροή [ t · y <sup>-1</sup> ]
1	Gavrilovic	0.780	6123451.5
2	Zemljic (1971)	0.104	816460.2
3	Vanoni (1975)	0.199	1562265.2
4	USDA SCS (1979)	0.265	2080403.4
5	Renfro (1975)	0.233	1829184.9

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.5.1, ο συντελεστής R που προτείνεται στο μοντέλο EPM τείνει να υπερεκτιμήσει την τελική στερεοαπορροή, και για το λόγο αυτό επιλέγεται ο συντελεστής R που αντιπρότεινε ο Zemljic M., το 1971, για το σκοπό της παρούσας εργασίας. Οι συντελεστές SDR που μελετήθηκαν στο μοντέλο RUSLE αναφέρονται για συγκριτικούς λόγους.

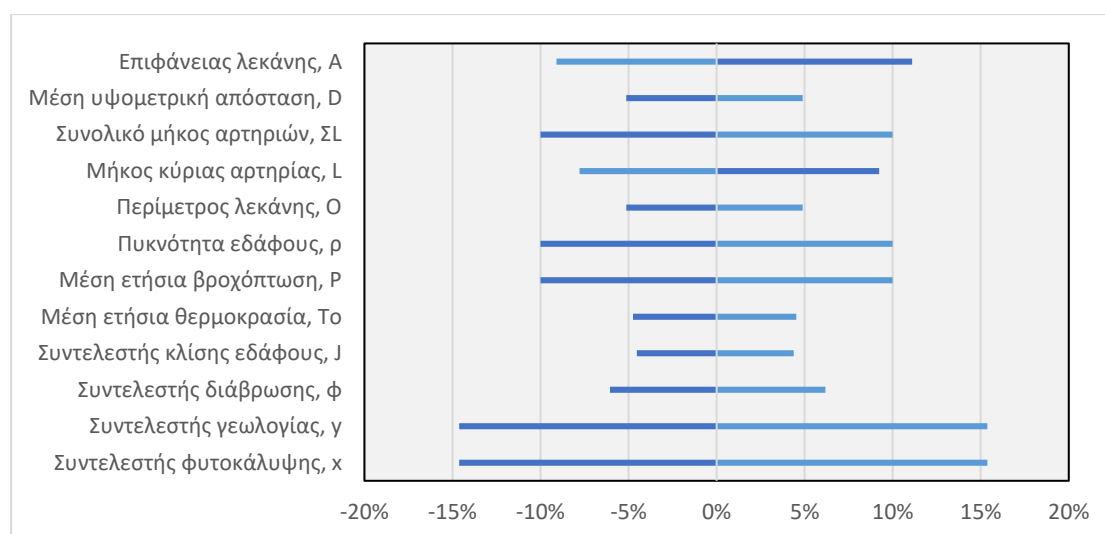


Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων εκτίμησης στερεοαπορροής RUSLE και EPM

α/α	Μοντέλο Εκτίμησης	Στερεοαπορροή [t · y <sup>-1</sup> ]
1	RUSLE	388709.0
2	EPM	816460.2

Συγκριτικά με τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE, η απόκλιση των εκτιμήσεων της τελικής εδαφικής διάβρωσης εντός της λεκάνης απορροής, κρίνεται λογική. Το μοντέλο EPM αναπτύχθηκε για εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης σε περιοχές ορεινές ή ημιορεινές, σε αντίθεση με το μοντέλο RUSLE που αναπτύχθηκε για εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση της εκτιμώμενης στερεοαπορροής, μέσω του μοντέλου EPM, σε μεταβολή των παραμέτρων κατά  $\pm 10\%$ . Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει πως μεγαλύτερη βαρύτητα στο μοντέλο έχουν οι παράμετροι της κάλυψης/ χρήσης γης και των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής.



Σχήμα 5.22: Ανάλυση ευαισθησίας μοντέλου EPM

#### 5.4.2.1 Παράμετρος βροχόπτωσης, P [mm]

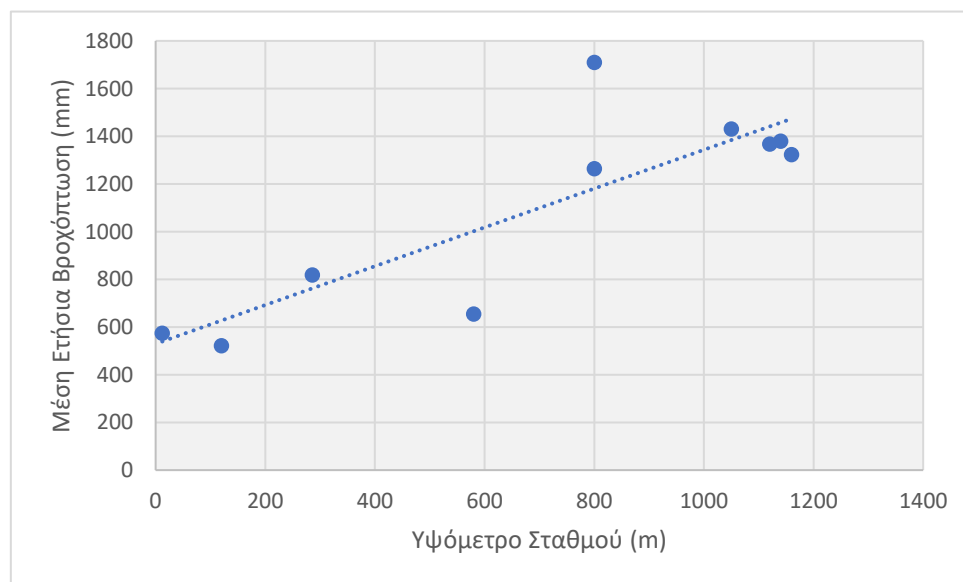
Για τους επιλεγμένους σταθμούς του κεφαλαίου 4.3, οι μέσες ετήσιες καταγραφές βροχοπτώσεων, όπως αυτές προκύπτουν ύστερα από δεκαετίες μετρήσεων, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.15.



Πίνακας 5.14: Μέση ετήσια βροχόπτωση σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού

α/α	Σταθμός	Υψόμετρο [ m ]	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση [ mm ]
1	ΑΘ. ΔΙΑΚΟΣ	1050	1431.2
2	ΓΡΑΜΜΕΝΗ ΟΞΥΑ	1160	1324
3	ΚΡΙΚΕΛΛΟ	1120	1367.9
4	ΠΥΡΑ	1140	1379.4
5	ΛΑΜΙΑ	12	573.8
6	ΖΗΛΕΥΤΟ	120	521.7
7	ΝΕΟΧΩΡΙ	800	1710.6
8	ΠΙΤΣΙΩΤΑ	800	1264
9	ΤΡΙΛΟΦΟ	580	655.2
10	ΥΠΑΤΗ	286	819.1

Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιώντας τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, εξάχθηκε μια γραμμική εξίσωση τάσης, συσχετίζοντας τη μέση ετήσια βροχόπτωση με το υψόμετρο του εδάφους, με σχετικά καλό δείκτη συσχέτισης ( $R^2 \approx 0.71$ ). Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:

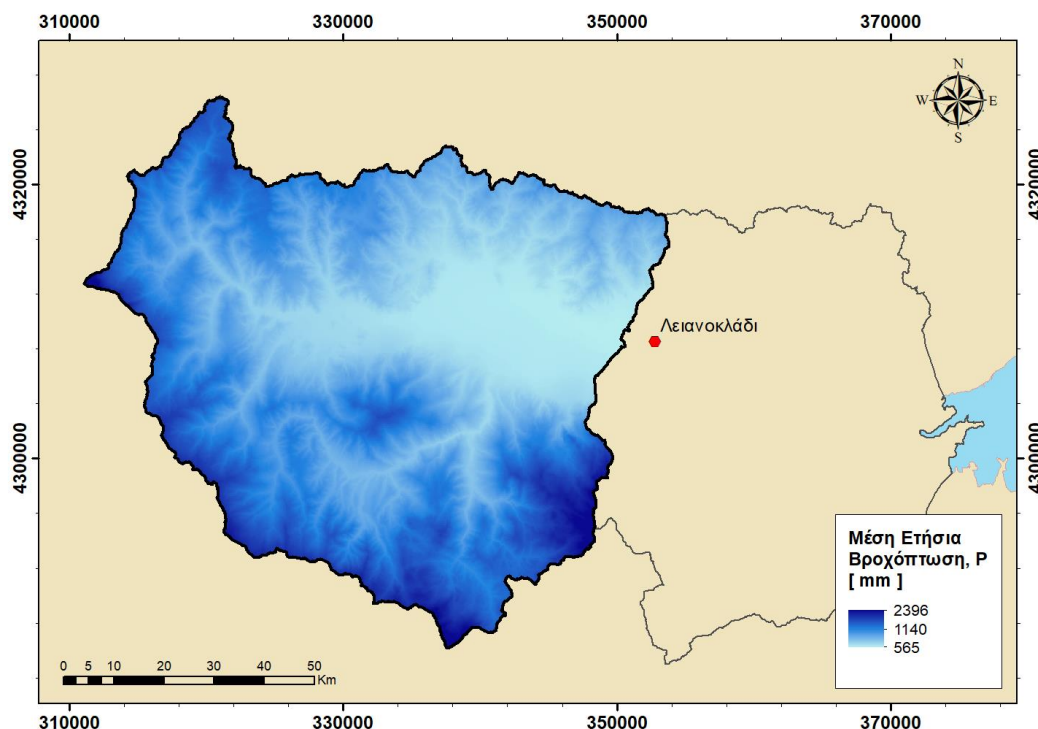


Σχήμα 5.23: Συσχέτιση βροχόπτωσης με το υψόμετρο του εδάφους

$$P = 0.8136 \cdot z + 529.66 \quad (5.1)$$

όπου  $P$  η μέση ετήσια βροχόπτωση [mm] του σημείου που βρίσκεται σε υψομετρική θέση  $z$  [m].

Εισάγοντας την παραπάνω εξίσωση σε περιβάλλον GIS, σε συνδυασμό με το DEM της περιοχής μελέτης, προέκυψε ο παρακάτω χάρτης μέση ετήσιας βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5.24: Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης,  $P$  [mm], στην περιοχή μελέτης

#### 5.4.2.2 Παράμετρος θερμοκρασίας, $T$

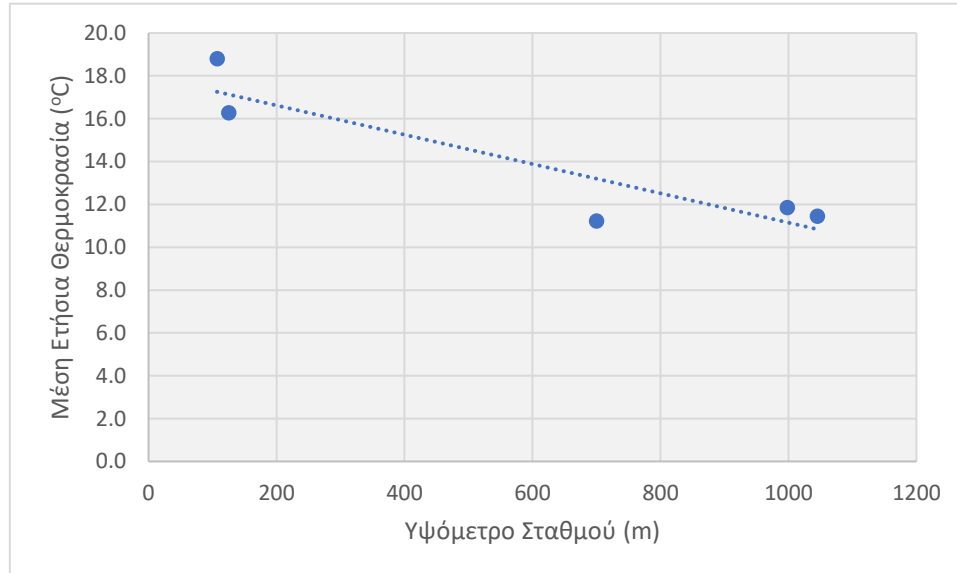
Για τους επιλεγμένους σταθμούς του κεφαλαίου 4.4, η μέση ετήσια θερμοκρασία του έτους 2019, που καταγράφηκε φαίνεται στον πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.15: Μέση ετήσια θερμοκρασία σταθμών γύρω από τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού

α/α	Σταθμός	Υψόμετρο [ m ]	Μέση Ετήσια Θερμοκρασία [ °C ]
1	ΛΑΜΙΑ	107	18.8
2	ΜΑΚΡΑΚΩΜΗ	236	16.3
3	ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΠΟΛΗ	998	11.9
4	ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΒΟΥΤΥΡΟ	700	11.2
5	ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ – ΜΥΡΙΚΗ	1045	11.5



Στην ίδια λογική με τη μέση ετήσια βροχόπτωση, παράχθηκε η γραμμική εξίσωση τάσης μεταξύ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και του υψομέτρου του εδάφους, με σχετικά υψηλό δείκτη συσχέτισης ( $R^2 \approx 0.83$ ). Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:



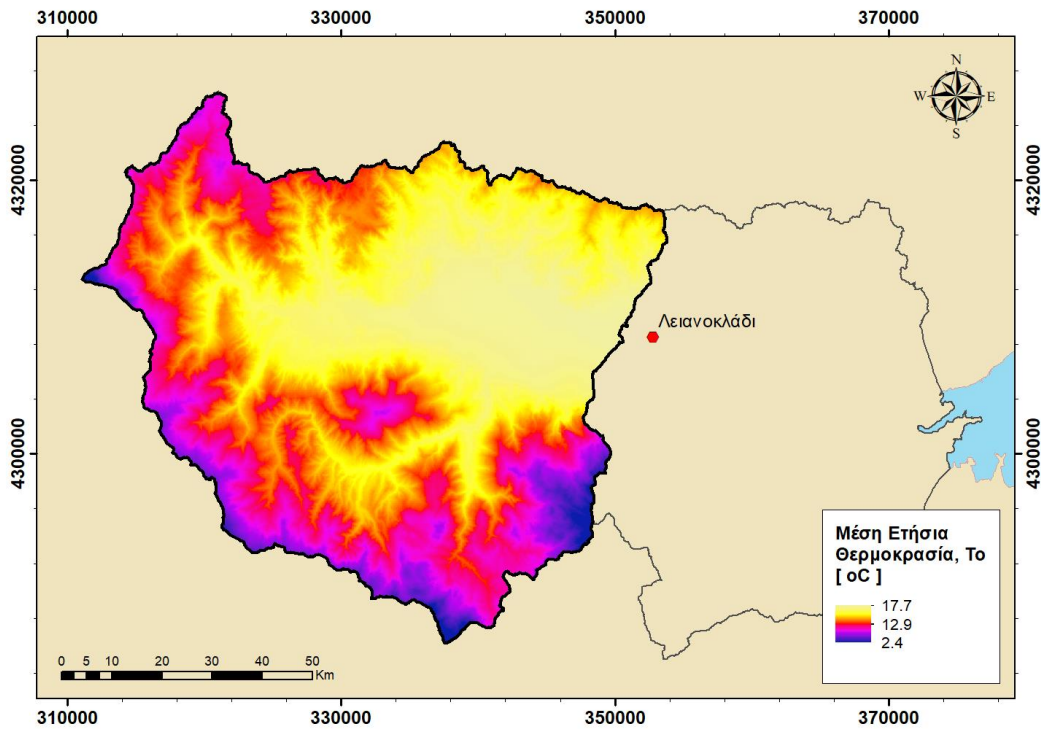
Σχήμα 5.25: Συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο του εδάφους

$$T_o = -0.0068 \cdot z + 17.989 \quad (5.2)$$

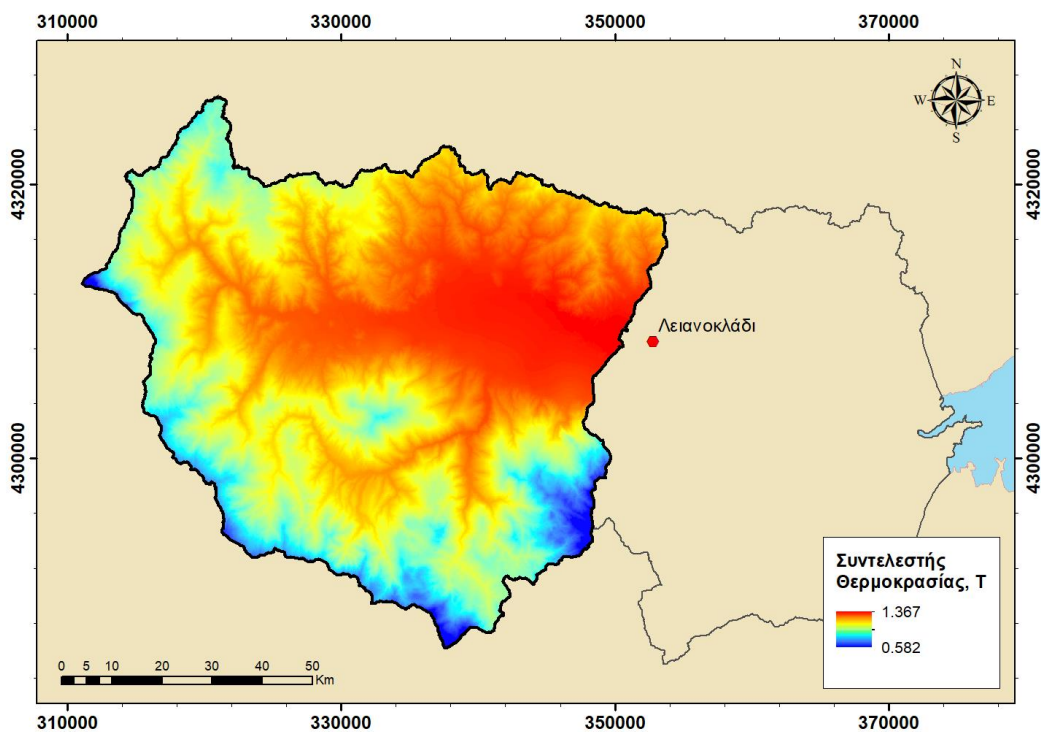
όπου  $T_o$  η μέση ετήσια θερμοκρασία του σημείου [°C] που βρίσκεται σε υψομετρική θέση  $z$  [m].

Εισάγοντας την παραπάνω εξίσωση σε περιβάλλον GIS, σε συνδυασμό με το DEM της περιοχής μελέτης, προέκυψε ο χάρτης μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για την περιοχή μελέτης (Σχήμα 5.25).

Και στη συνέχεια, εισάγοντας την εξίσωση (3.37) στο περιβάλλον GIS, δημιουργήθηκε χάρτης (Σχήμα 5.26) με την παράμετρο της θερμοκρασίας, όπως αυτή ορίζεται στο μοντέλο EPM.



Σχήμα 5.26: Χάρτης μέσης ετήσιας θερμοκρασίας,  $T_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], στην περιοχή μελέτης

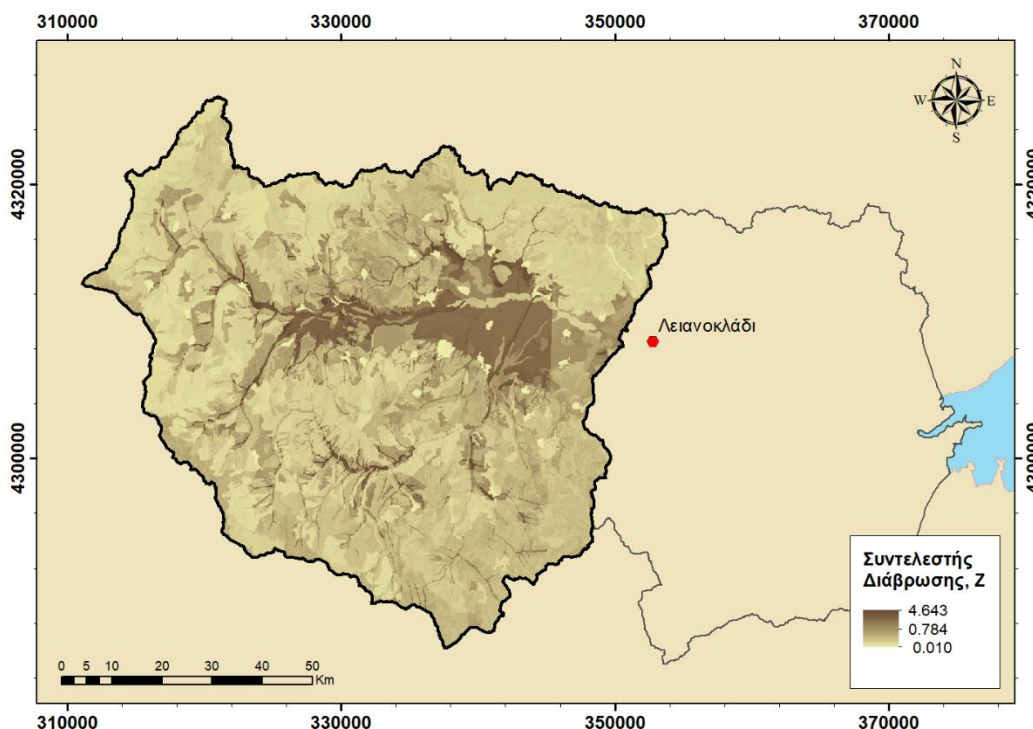


Σχήμα 5.27: Χάρτης συντελεστή θερμοκρασίας,  $T$ , για την περιοχή μελέτης



### 5.4.2.3 Παράμετρος διάβρωσης, Z

Η παράμετρος διάβρωσης, Z, του μοντέλου EPM, στην πραγματικότητα εμπεριέχει τέσσερις ξεχωριστές παραμέτρους, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (3.38). Παλαιότερα, ο υπολογισμός της παραμέτρου Z ήταν γρήγορος, με την έννοια ότι χρησιμοποιούνταν οι μέσες τιμές για τις συνθήκες που επικρατούσαν στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, και κατ' επέκταση ο υπολογισμός ήταν αρκετά αδρομερής. Πλέον, η χρήση GIS επιτρέπει τους υπολογισμούς με υψηλή ακρίβεια, όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη:

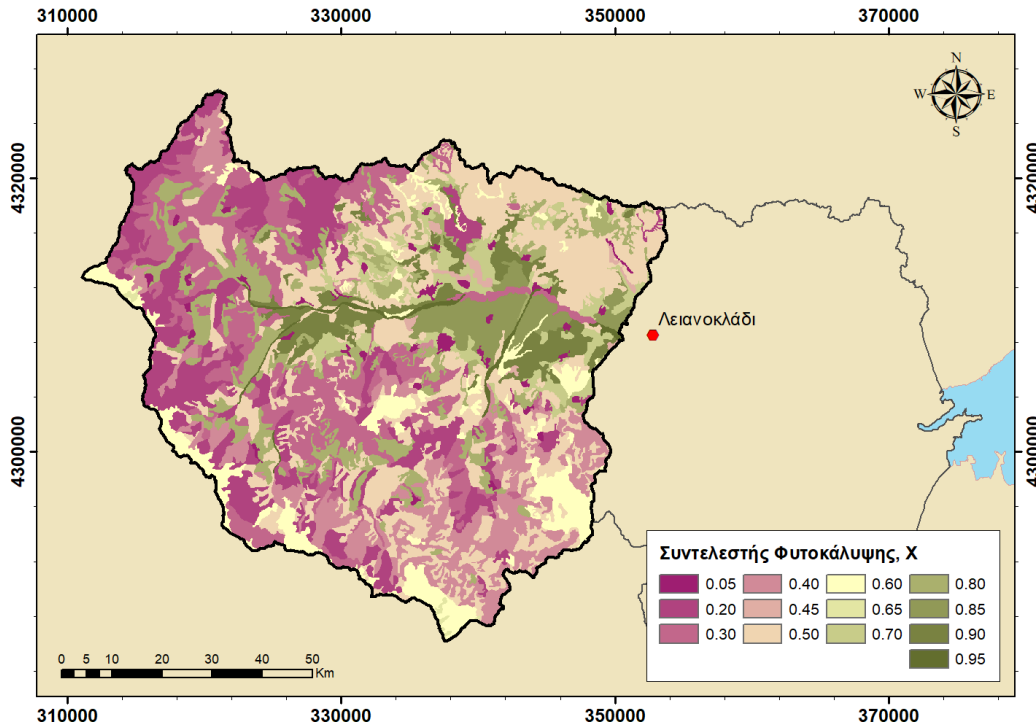


Σχήμα 5.28: Χάρτης συντελεστή διάβρωσης, Z, για την περιοχή μελέτης

Ωστόσο, η υψηλότερη ακρίβεια έχει αυξήσει το υπολογιστικό κόστος της εκτίμησης του εν λόγω συντελεστή. Η κάθε μία από τις παραμέτρους του συντελεστή διάβρωσης, Z, έχει τη δικιά της διαδικασία υπολογισμού με τα αντίστοιχα προαπαιτούμενα δεδομένα. Πιο αναλυτικά:

- Συντελεστής προστασίας της φυτοκάλυψης κατά της διάβρωσης, X

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή X, αξιοποιήθηκαν οι τιμές που δίνει ο Ευθυμίου Ν. (2016) για ορισμένους από τους κωδικούς CORINE, ενώ για τις ελλείπουσες τιμές έγινε εκτίμησή τους, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε υψηλή προστασία κατά της διάβρωσης και οι χαμηλές τιμές σε χαμηλή προστασία κατά της διάβρωσης. Ύστερα, οι τιμές αυτές συνδυάστηκαν με το χάρτη χρήσεων γης (Σχήμα 4.8) και παράχθηκε, εν τέλει, ο χάρτης για το συντελεστή X, του μοντέλου EPM:

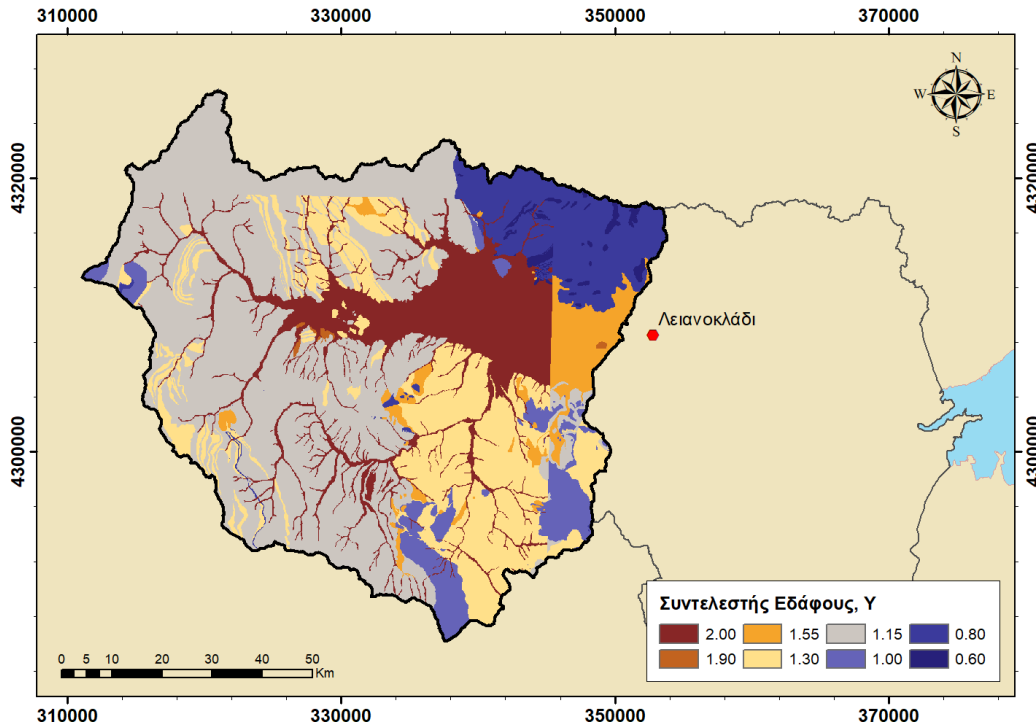


Σχήμα 5.29: Χάρτης συντελεστή προστασίας φυτοκάλυψης κατά της διάβρωσης, X, για την περιοχή μελέτης

- Συντελεστής ανθεκτικότητας πετρωμάτων κατά της βροχόπτωσης, Y

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή Y, ήταν απαραίτητη η σύνδεση των γεωλογικών σχηματισμών, που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης (Σχήμα 4.5), με τις τιμές που τους αντιστοιχούν (Πίνακας 3.4). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές για το κάθε πέτρωμα ορίστηκαν βάσει της γεωλογικής ηλικίας αυτού, δηλαδή της γεωλογικής περιόδου και εποχής, στην οποία εκτιμάται η προέλευσή του, σύμφωνα με τα υπομνήματα των γεωλογικών χαρτών που παρέχονται από το ΙΓΕΥ.

Ύστερα από αυτή τη σύνδεση, με τις υψηλές τιμές να αντιπροσωπεύουν χαμηλή ανθεκτικότητα πετρώματος και τις χαμηλές τιμές υψηλή ανθεκτικότητα πετρώματος, δημιουργήθηκε ο παρακάτω χάρτης για το συντελεστή Y, του μοντέλου EPM:



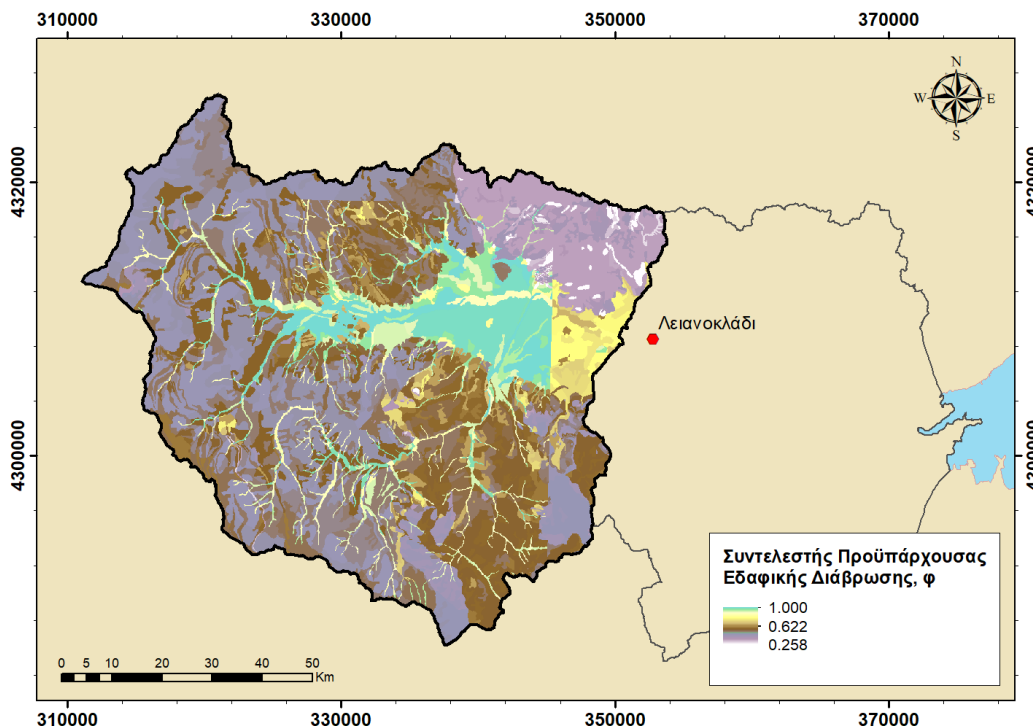
Σχήμα 5.30: Χάρτης συντελεστή ανθεκτικότητας πετρωμάτων κατά της βροχοπτώσεως,  $Y$ , για την περιοχή μελέτης

- Συντελεστής υφιστάμενης διάβρωσης,  $\varphi$

Εξ ορισμού, ο συντελεστής αυτός έχει να κάνει με μετρήσεις πεδίου. Τέτοιες μετρήσεις, ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν και, παρά την επίσκεψη στην περιοχή μελέτης, είναι αυξημένη η δυσκολία ανάθεσης τιμών ανά την επιφάνεια. Έγινε, λοιπόν, η παραδοχή ότι ο συντελεστής της υφιστάμενης διάβρωσης του εδάφους,  $\varphi$ , είναι συνάρτηση του συντελεστή χρήσης γης,  $X$ , και του πετρώματος,  $Y$ , της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, κρίνεται σημαντικότερη η συμβολή του πετρώματος από τη χρήση γης κι έτσι ορίζεται η παρακάτω εξίσωση εκτίμησης για το συντελεστή:

$$\varphi = 0.7 \cdot X + 0.3 \cdot Y \quad (5.3)$$

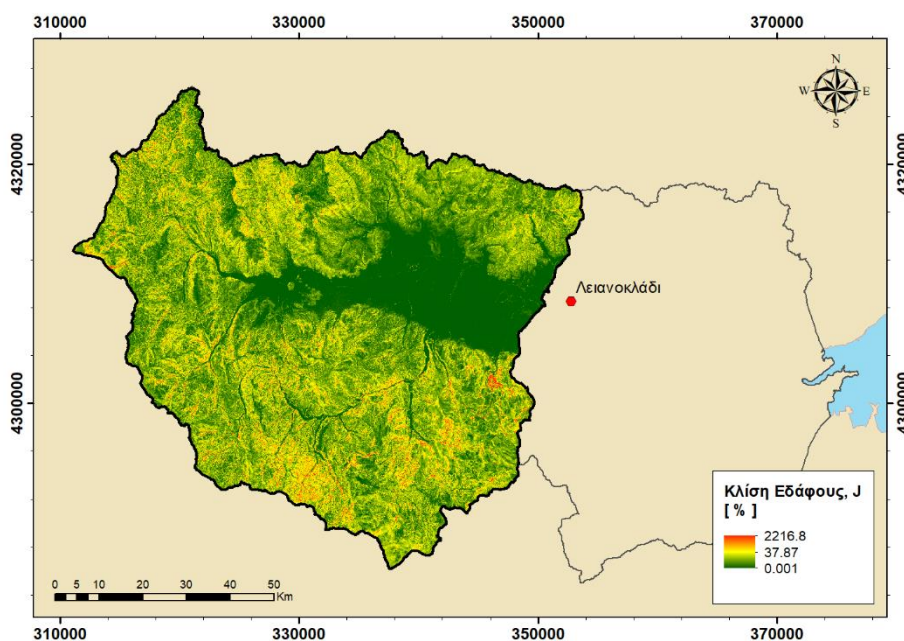
Επειδή όμως ο συνδυασμός αυτός οδηγεί σε τιμές υψηλότερες του 1.00 και για να υπάρχει συνάφεια με τις ορισμένες τιμές (Πίνακας 3.5), διαιρείται η παραπάνω εξίσωση με τη μέγιστη τιμή της, και προκύπτει ο παρακάτω χάρτης για το συντελεστή  $\varphi$ , του μοντέλου EPM:



Σχήμα 5.31: Χάρτης συντελεστή υφιστάμενης διάβρωσης εδάφους,  $\phi$ , για την περιοχή μελέτης

- Κλίση εδάφους,  $J$

Η κλίση του εδάφους,  $J$ , μπορεί εύκολα να εξαχθεί από το DEM της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας το *Slope* της εργαλειοθήκης *Spatial Analyst Tools* του *ArcGIS*. Ο εξαγόμενος χάρτης έχει τη μορφή:



Σχήμα 5.32: Χάρτης συντελεστή κλίσης εδάφους,  $J$ , για την περιοχή μελέτης



#### 5.4.2.4 Έμμεσος υπολογισμός της εδαφικής απώλειας

Αξιοποιώντας τα γενικά στοιχεία που είναι γνωστά για την περιοχή μελέτης (π.χ. γεωλογία, χρήσεις γης κτλ.) και κάνοντας εμπειριστατωμένες εικασίες για τους συντελεστές, το μοντέλο EPM είναι ικανό να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό τα αποτελέσματα της πιο μοντέρνας οδού των προγραμμάτων GIS.

Συγκεκριμένα, για την υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού, με σημείο εξόδου λίγο πριν τη γέφυρα του Λειανοκλαδίου, συμπληρώνεται ο παρακάτω απλοποιητικός πίνακας του μοντέλου EPM.

Πίνακας 5.16: Υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης σύμφωνα με το μοντέλο Gavrilovic

α/α	Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή
1	Μέσο υψόμετρο εδάφους, z	[ m ]	750
2	Μέση βροχόπτωση στη λεκάνη, P	[ mm ]	1140
3	Μέση θερμοκρασία λεκάνης, T <sub>ο</sub>	[ °C ]	12.9
4	Συντελεστής θερμοκρασίας, T		1.179
5	Συντελεστής φυτοκάλυψης, X		0.33
6	Συντελεστής διαβρωτικότητας εδάφους, Y		1.15
7	Συντελεστής υφιστάμενης διάβρωσης, φ		0.65
8	Μέση κλίση εδάφους, J	[ % ]	37.87
9	Συντελεστής διάβρωσης, Z		0.480
10	Εδαφική διάβρωση, w	[ m <sup>3</sup> / km <sup>2</sup> / y ]	1404.2
11		[ t / km <sup>2</sup> / y ]	3749.2

Αναλυτικά, τα μεγέθη (1) και (8) προσεγγίζονται από μετρήσεις πεδίου, ενώ τα μεγέθη (2) και (3) υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (5.1) και (5.2), σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στα αντίστοιχα κεφάλαια. Έχοντας το μέγεθος (3), εύκολα υπολογίζεται και το μέγεθος (4) μέσω της εξίσωσης (3.37). Για την εκτίμηση του μεγέθους (5), συνυπολογίστηκαν οι τιμές (Πίνακας 3.3) για τις 3 επικρατέστερες χρήσεις γης (κωδικοί 311, 313, 324) (Πίνακας 4.6). Για το μέγεθος (6), επιλέχθηκε ο φλύσχος ως αντιπροσωπευτικός γεωλογικός σχηματισμός της περιοχής (Πίνακας 3.4), αφού αποτελεί λίγο παραπάνω από το 50% της (Πίνακας 4.5). Το μέγεθος (7) προέκυψε ύστερα από επίσκεψη στην περιοχή μελέτης (Πίνακας 3.5), και, τελικά, το μέγεθος (9) υπολογίστηκε με την εξίσωση (3.38). Τέλος, μέσω της εξίσωσης (3.36) υπολογίζεται το μέγεθος (10) της εδαφικής διάβρωσης εντός της λεκάνης και πολλαπλασιάζοντας με τη μέση πυκνότητα εδάφους, 2.67 t/m<sup>3</sup>, προκύπτει το μέγεθος (11).



### 5.4.3 Σχέση Κουτσογιάννη - Ταρλά

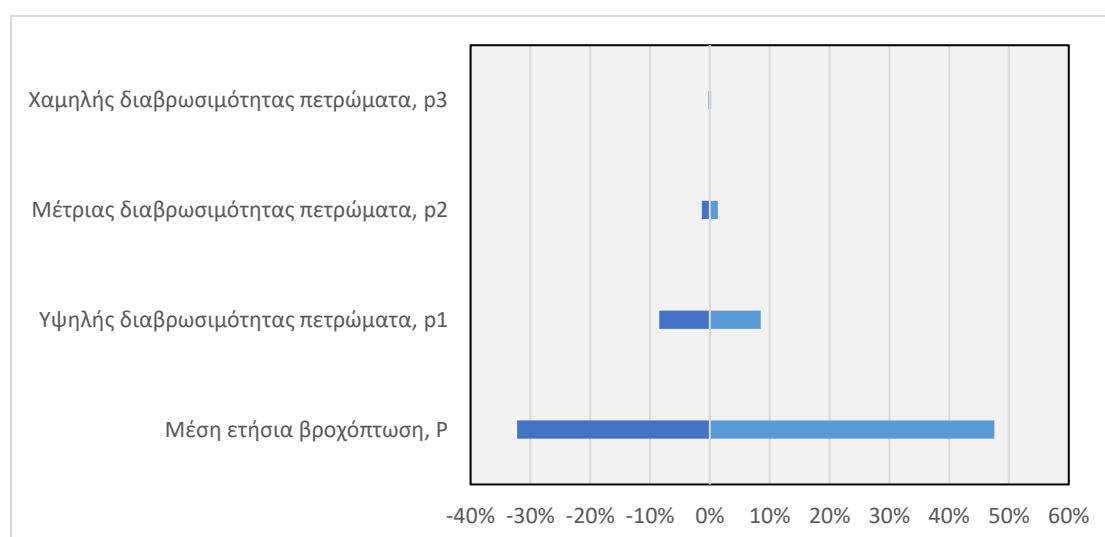
Όσον αφορά στην εξίσωση εκτίμησης της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής των Κουτσογιάννη & Ταρλά (1987), που αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για τον Ελλαδικό χώρο, τα αποτελέσματα της φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων εκτίμησης στερεοαπορροής RUSLE, EPM και Κουτσογιάννη-Ταρλά

α/α	Μοντέλο Εκτίμησης	Στερεοαπορροή [ t · y <sup>-1</sup> ]
1	RUSLE	388709.0
2	EPM	816460.2
3	Κουτσογιάννης & Ταρλά	564697.0

Ανασκοπώντας στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μοντέλου, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3.6, φαίνεται πως το μοντέλο παράγει μια αρκετά αξιόλογη εκτίμηση της στερεομεταφοράς στην υπό εξέταση λεκάνη, καθώς τα αποτελέσματα κρίνονται ορθότερα από εκείνα του, πιο σύνθετου και “ολοκληρωμένου”, μοντέλου RUSLE, χωρίς όμως να προσεγγίζει αρκετά την εκτίμηση του μοντέλου EPM.

Η ανάλυση ευαισθησίας κατά  $\pm 10\%$  στις παραμέτρους της σχέσης Κουτσογιάννη – Ταρλά δίνει αναμενόμενα αποτελέσματα, με την παράμετρο της βροχόπτωσης, P, να επηρεάζει περισσότερο την τελική εκτίμηση της στερεοαπορροής στην έξοδο της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 5.33: Ανάλυση ευαισθησίας σχέσης Κουτσογιάννη - Ταρλά





## 6 Συζήτηση

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε η ολοκληρωμένη μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού. Με την ολοκλήρωσή της προκύπτουν ξεκάθαρα και σαφή αποτελέσματα σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης και την ανάλυση των διεργασιών που τη διέπουν. Ταυτόχρονα, μέσω της ευρύτερης διερεύνησης προέκυψαν και συμπεράσματα γενικότερης φύσεως.

### 6.1 Γενικά Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων εκτίμησης της στερεομεταφοράς, όμως μέσω της ολοκληρωμένης μελέτης του φαινομένου, προέκυψαν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- Το ποσοστό κορεσμού του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις πλημμυρικές παροχές. Αυτό μεταφράζεται σε βάθος ροής του νερού, και, όπως φάνηκε, επηρεάζει και την ταχύτητα με την οποία φτάνει η πλημμυρική αιχμή.
- Ένα σαφές συμπέρασμα που προκύπτει από την έρευνα και την ανάλυση της παρούσας εργασίας είναι το έντονα εξαρτώμενο αποτέλεσμα των μοντέλων εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης από την κρίση της εκάστοτε ομάδας μελέτης. Αυτό σημαίνει ότι εκτιμήσεις της εδαφικής διάβρωσης, που έγιναν στην ίδια περιοχή μελέτης με τη χρήση του ίδιου μοντέλου εκτίμησης, αλλά από διαφορετικούς μελετητές, κατέληξαν σε αποτελέσματα με σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους.
- Κάνοντας την παραδοχή πως το μοντέλο Gavrilovic, δεδομένου ότι έχει αναπτυχθεί για συνθήκες πιο κοντινές για το ανάγλυφο της Ελλάδας απ' ό,τι το μοντέλο RUSLE, δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα, οι υπόλοιπες προσεγγίσεις, αναλυτικές (μοντέλο Gavrilovic-manual, μοντέλο RUSLE) και μη (σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά), φαίνονται να υποεκτιμούν την εδαφική διάβρωση που προκύπτει σε μια λεκάνη απορροής αντίστοιχων συνθηκών.
- Είναι φανερό πως στο μοντέλο RUSLE το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος πρέπει να αφιερώνεται στον υπολογισμό του συντελεστή ανάγλυφου.
- Ύστερα από την ανάλυση ευαισθησίας για μεταβολές  $\pm 10\%$  στις παραμέτρους των μοντέλων, παρατηρείται ότι κάθε μοντέλο στηρίζεται σε ανεξάρτητες μεταξύ τους παραμέτρους για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και στερεοαπορροής της υπό εξέταση λεκάνης απορροής. Το μοντέλο RUSLE επηρεάζεται περισσότερο από την εδαφική κλίση, το μοντέλο EPM επηρεάζεται εξίσου από τις καλύψεις/ χρήσεις γης και τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής, ενώ η σχέση Κουτσογιάννη – Ταρλά επηρεάζεται περισσότερο από τη μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης.



## 6.2 Ειδικά Συμπεράσματα

Από την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης που εξετάστηκε:

- Η ενεργή βροχόπτωση που, τελικά, προκαλεί την πλημμύρα του ποταμού, υπό κανονικές συνθήκες εδάφους, αντιστοιχεί στο 66% της συνολικής βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης. Αντίστοιχα, για ξηρές συνθήκες το κλάσμα αντιστοιχεί στο 29% της συνολικής βροχόπτωσης (μείωση 37%), ενώ για υγρές συνθήκες το κλάσμα είναι το 88% αυτής (αύξηση 22%).
- Το πλημμυρογράφημα, για τις κανονικές συνθήκες εδάφους, παρουσιάζει αιχμή στα 1969 m<sup>3</sup>/s. Στις ξηρές συνθήκες η μείωση της ενεργής βροχόπτωσης κατά 37% οδηγεί σε αιχμή πλημμυρογραφήματος στα 694 m<sup>3</sup>/s (μείωση 35%), ενώ στις υγρές συνθήκες η αιχμή ανέρχεται στα 2756 m<sup>3</sup>/s (αύξηση 40%).
- Η ελεύθερη επιφάνεια του νερού, στη θέση της γέφυρας Λειανοκλαδίου, στην περίπτωση των μέσων συνθηκών εδάφους βρίσκεται σε ύψος 9.3m από τον πυθμένα του ποταμού. Η μείωση της ενεργής βροχόπτωσης κατά 37%, υπό ξηρές συνθήκες, μεταφράζεται σε βάθος ύδατος 8.3m (μείωση 9.7%), ενώ η αύξησή της κατά 22%, υπό υγρές συνθήκες, μεταφράζεται σε βάθος 10.5m (αύξηση 12.9%).
- Η γέφυρα, που βρίσκεται στα Νοτιοδυτικά του Λειανοκλαδίου, αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος, καθώς αποτελεί μια βασική αρτηρία επαρχιακής οδού. Δεδομένου ότι η γέφυρα βρίσκεται σε ύψος 9m από την κοίτη του ποταμού, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης του πλημμυρικού επεισοδίου για βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς 100 ετών, κρίνεται ορθή η έως τώρα πρακτική των τοπικών αρχών για παύση της κυκλοφορίας επί της οδού σε έντονες βροχοπτώσεις.
- Για τη λεκάνη απορροής που μελετήθηκε, έκτασης 1003km<sup>2</sup>, η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση σε αιώρηση, σύμφωνα με τα μοντέλα RUSLE και EPM, είναι περίπου 1950 t/km<sup>2</sup>/y (1953310 t/y) και 7827 t/km<sup>2</sup>/y (7850579 t/y) αντίστοιχα. Δηλαδή, τα μοντέλα παρουσιάζουν διαφορά 300% μεταξύ των εκτιμήσεών τους.
- Στην έξοδο της λεκάνης απορροής που μελετήθηκε, η μέση ετήσια στερεοαπορροή της παραπάνω εδαφικής διάβρωσης, σύμφωνα με τα μοντέλα RUSLE, EPM και Σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά, είναι περίπου 388709 t/y, 816460 t/y και 564697 t/y αντίστοιχα. Δεχόμενοι το μοντέλο EPM ως περισσότερο ρεαλιστικό, το μοντέλο RUSLE οδηγεί σε υποεκτίμηση της στερεοαπορροής κατά 52%, ενώ η Σχέση Κουτσογιάννη-Ταρλά οδηγεί σε υποεκτίμηση της στερεοαπορροής κατά 31%.
- Η ανάλυση ευαισθησίας σε μεταβολές ±10% των παραμέτρων του κάθε μοντέλου οδήγησε σε μεταβολές των εκτιμήσεων εδαφικής διάβρωσης: της Σχέσης Κουτσογιάννη-Ταρλά από -32% έως +48% για την παράμετρο της βροχόπτωσης, του μοντέλου EPM από -15% έως +15%, εξίσου, για τις παραμέτρους των συντελεστών φυτοκάλυψης και γεωλογίας, και του μοντέλου RUSLE από -16% έως +17% για την παράμετρο της κλίσης του εδάφους.



### 6.3 Μελλοντική έρευνα

Ύστερα από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων, είναι φανερό πως το ζήτημα της στερεομεταφοράς έχει πολλά περιθώρια μελέτης κι έρευνας, ιδίως για τον ελλαδικό χώρο που διαθέτει μια τόσο ποικιλόμορφη γεωμορφολογική δομή.

Με αφορμή, λοιπόν, αυτήν την εργασία, γίνονται οι εξής προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επανάληψη της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης με χρήση του υετογραφήματος που προκύπτει από τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Επέκταση της περιοχής υδραυλικής προσομοίωσης ώστε να συμπεριλαμβάνει τον αστικό ιστό της Λαμίας, ο οποίος κατέχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε έναν χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας, λόγω της σημαντικής αύξησης των κατοίκων ανά επιφάνεια γης σε σχέση με τις γύρω περιοχές.
- Διερεύνηση της εδαφικής διάβρωσης που προκαλούν οι υπόλοιποι μηχανισμοί (αιολική διάβρωση κτλ.) και χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων της εκτίμησης του φαινομένου (μέτρηση αποθέσεων σε ταμιευτήρες, στοχαστικά ομοιώματα κτλ.)
- Αναβάθμιση των χαρτών για τους συντελεστές του μοντέλου RUSLE, που παρέχει η ESDAC, στον ελλαδικό χώρο.
- Χρήση εξελιγμένων λογισμικών για τη ρύθμιση του μοντέλου RUSLE, όπως η επέκταση [GISus-M](#) του λογισμικού *ArcMap*, και το [RUSLE2](#).

Ωστόσο, κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρατηρήθηκαν ανακρίβειες και διαφορές μεταξύ των διάφορων πηγών, ακόμα και όταν αναφερόντουσαν στην ίδια πηγή. Αυτό εντοπίστηκε και στο μοντέλο RUSLE και στο μοντέλο EPM. Τονίζεται, επομένως, η σημασία της διασταύρωσης των πληροφοριών που αντλούνται και προτρέπονται οι μελλοντικοί ερευνητές να αναζητούν τις αρχικές πηγές προκειμένου να αποφευχθούν περιπτώσεις λανθασμένης μεταφοράς πληροφορίας.



## Διεθνής Αναφορές / English References

- Al-Kaisi M. (2000). *Soil erosion: An agricultural production challenge*. Iowa State University.
- Arnoldus H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Marocco. *FAO Soil Bulletin*, 34.
- Baltas E., & Karaliolidoy M. C. (2007). Hydrological effects of land use and climated change in northern Greece. *Journal of Land Use Science*, 2(4).
- Batista P. V., Davies J., Silva M. L., & Quinton J. N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 197.
- Beasley D. B., Huggins L. F., & Monke E. J. (1980). ANSWERS: A Model for Watershed Planning. *Transactions of the ASAE*, 23.
- Blinkov I., & Kostadinov S. (2010). *Applicability of various Erosion Risk Assessment Methods for Engineering Purposes*. Ohrid, North Macedonia: BALWOIS 2010 Conference.
- Brown L. C., & Foster G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30(2).
- Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams*. U.S. Department of the Interior.
- Chow V.T., Maidment D.R., & Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*. Νέα Υόρκη: Mc Graw-Hill.
- Dendy F. E., & Bolton G. C. (1976). Sediment yield-runoff drainage area relationships in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Dingman S.L. (2015). *Physical Hydrology, 3rd Edition*. Waveland Press Inc.
- Efthimiou N., Lykoudi E. E., & Karavitis C. A. (2017). Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrological Sciences Journal*.
- FEMA. (2018). *Hydrology: Rainfall-Runoff Analysis*. Federal Emergency Management Agency.
- 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*.
- Ferro V., Giordano G., & Iovino M. (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal*, 36(6).



- Ferro V., Porto P., & Yu B. (1999). A comparative study of rainfall erosivity estimation for Southern Italy and Southeastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 44(1).
- Gavrilović S. (1962). *Proracim srednje godisnje kolicine nanosa prema potencijalu erozije (Serbian)*. Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- Gavrilović S. (1970). *Savremeni nacini proracunavanja bujicnih nanosa i izrada karata erozije (Serbian)*. Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- Gavrilović S. (1972). *Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji (Serbian)*. Izgradnja.
- Gavrilović S. (1976). *Bujični tokovi i erozija (Serbian)*. Beograd, Serbia.
- Gavrilovic Z., Stefanovic M., Cotric M., & Milojevic J. (2004). *Erosion Potential Method: An important support for integrated water resource management*. Beograd, Serbia: Jaroslav Černi Institute.
- 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.
- Griffin M. L., Beasley D. B., Fletcher J. J., & Foster G. R. (1988). Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Hickey R. (2000). Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography*, 29(1).
- Hrabalíková M., & Janeček M. (2017). Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil and Water Research*, 12(2).
- Hrissanthou V. (1988). Simulation model for the computation of sediment yield due to upland and channel erosion from a large basin. *Sediment Budgets*.
- Kandel D. D., Western A. W., Grayson R. B., & Turrall H. N. (2004). Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modeling. *Hydrological Processes*, 18.
- Kirkby M. J., & Morgan R. P. C. (1980). *Soil Erosion*. Chichester: Wiley.
- Knisel W. G. (1980). *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. US Department of Agriculture.
- Kojchevksa T. (2014). *EPM for Soil Loss Estimation in Different Geomorphologic Conditions and Data Conversion by Using GIS*. Mediterranean Agronomic Institute of Chania.
- Koutsoyiannis D. (1994). A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. *Journal of Hydrology*.



- Koutsoyiannis D., & Baloutsos G. (2000). *Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences*. Athens: Natural Hazards.
- Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology* 206.
- Lane E. W. (1937). *Stable channels in erodible materials, Vol. 102*. ASCE Manuals and Reports of Engineering Practices.
- Lane E. W. (1955). *Design of stable canals, Vol. 120*. ASCE Manuals and Reports of Engineering Practices.
- Lane E. W., & Kalinske A. A. (1941). Engineering calculations of suspended sediment. *Transactions American Geophysical Union*, 22.
- Lane L. J., Hernandez M., & Nichols M. (1997). Process controlling sediment yield from watersheds as functions of spatial scale. *Environmental Modeling and Software*, 12(4).
- Lemke K. A. (1991). Transfer function models of suspended sediment concentration. *Water Resources Research*, 27(3).
- Lindley E. S. (1919). *Regime channels*. Proceedings of Punjab Engineering Congress.
- M., Z. (1971). Calcul du debit solide. Évaluation de la vegetación comme un facteurs antierosif. *Proceedings of the international symposium Interpraevent*.
- Matheron G. (1971). *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*. École nationale supérieure des mines.
- McCool D. K., Brown L. C., Foster G. R., Mutchler C. K., & Meyer L. D. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5).
- 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.
- Mitasova H., & Mitas L. (2001a). Multiscale soil erosion simulations for land use management, in Landscape Erosion and Evolution Modeling. *Springer*.
- Mockus V. (1957). *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. US Department of Agriculture.
- Moore I. D., & Burch G. J. (1986). Physical bases of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5).
- Moore I. D., & Wilson J. P. (1992). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47(5).





- Moore I. D., Turner A. K., Wilson J. P., Jenson S. K., & Band L. E. (1993). GIS and Land-Surface-Subsurface Process Modeling. *Environmental modeling with GIS*, 20.
- Morgan R. P. C. (1995). *Soil Erosion and Conservation, 2nd Edition*. Essex: Longman.
- Morgan R. P. C., Quinton J. N., Smith R. E., Govers G., Poesen J. W. A., Auerswald K., . . . Styczen M. E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from diels and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23.
- Na W., & Yoo C. (2018). Evaluation of Rainfall Temporal Distribution Models with Annual Maximum Rainfall Events in Seoul, Korea. *Water*, 10(10).
- Nearing M. A. (2000). Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(9).
- Nearing M. A., Foster G. R., Lane L. J., & Finkner S. C. (1989). A Process-Based Soil Erosion Model for USDA- Water Erosion Prediction Project Technology. *Transactions of the ASAE* 32(5).
- Němec J. (1964). *Engineering hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., . . . Aalto J. (2015a). Rainfall erosivity in Europe. *Science of Total Environment*, 511.
- Panagos P., Borrelli P., & Meusburger K. (2015c). A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences*, 5.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger C., Alewell C., Lugato E., & Montanarella L. (2015b). Estimating the soil erosion cover-management factor at European scale. *Land Use Policy*, 48C.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Van Der Zander E. H., Poesen J., & Alewell C. (2015d). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European Scale. *Environment Science & Policy*, 51.
- Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., . . . Alewell C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54.
- Panagos P., Meusburger K., Ballabio C., Borrelli P., & Alewell C. (2014b). Soil erodibility in Europe: a high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of Total Environment*.
- Panagos P., Meusburger K., Van Liedekerke M., Alewell C., Hiederer R., & Montanarella L. (2014a). Assessing soil erosion in Europe based on data collected through a European Network. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(1).



- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., & Montanarella L. (2012). European soil data centre: response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29(2).
- Papaioannou G., Efstratiadis A., Vasiliades L., Loukas A., Papalexidou S. M., Koukouvinos A., . . . Kossieris P. (2018). An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas. *Hydrology*, 5(2).
- Pham T. G., Degener J., & Kappas M. (2018). Integrated universal soil loss equation (ULSE) and Geographical Information Systems (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2).
- Renard K. G., & Freimund J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., & Porter J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46(1).
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., & Yoder D. C. (1996). Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. *Agriculture Handbook* 703.
- Renard K. G., Foster G. R., Yoder D. C., & McCool D. K. (1994). RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Renfro G. W. (1972). *Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield*. USA: Proc Sainch-Yield Workshop.
- Rodriguez-Iturbe I., & Nordin C. F. (1968). Time series analysis of water and sediment discharges. *Hydrological Sciences Journal*, 13(2).
- Rogler H., & Schwertmann U. (1981). Erosivität der Niederschläge und Isoerodentenkarte Bayerns. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 22.
- Römkens M. J. M., Prasad S. N., & Poesen J. W. A. (1986). Soil erodibility and properties. *Proc. of the 13th congress of the International Society of Soil Sciences*. Hamburg, Germany: Soil Science Society.
- Shaw E. (1994). *Hydrology in Practice, 3rd Edition*. CRC Press.
- Sigalos G., Loukaidi V., Dasaklis S., & Alexouli-Livaditi A. (2010). Assessment of the quantity of the material transported downstream of Sperchios River, Central Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(2).
- Singh V. P. (1983). Analytical solutions of kinematic equations for erosion on a plane II. Rainfall of finite duration. *Advances in Water Resources*, 6(2).
- Soil Conservation Service. (1989). *Hydrology Training Series Module 104 - Runoff Curve Number Computations*. United States Department of Agriculture.



- Stathopoulos N., Lykoudi E., Vasileiou E., Rozos D., & Dimitrakopoulos D. (2017). Erosion Vulnerability Assessment of Sperchios River Basin, in East Central Greece - A GIS Based Analysis. *Open Journal of Geology*, 7.
- Stefanidis P., Sapountzis M., & Stathis D. (2002). *Sheet erosion after fire at the urban forest of Thessaloniki (Northern Greece)*. *Silva Balcanica*, 2(1).
- USDA. (1998). *Erosion and Sediment Delivery*. US Department of Agriculture.
- USDA, ARS, & NRCS. (2002). *Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2*. Agricultural Research Service.
- Van der Knijff J. M., Jones R. J. A., & Montanarella L. (1999). Soil erosion risk assessment in Italy. *JRC Scientific and Technical Report*.
- Van der Knijff J. M., Jones R. J. A., & Montanarella L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe. *JRC Scientific and Technical Report*.
- Van Sickle J. (1982). Stochastic predictions of sediment yields from small coastal watersheds in Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 56(3-4).
- 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.
- Wicks J. M., & Bathurst J. C. (1996). SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology* 154.
- Williams J. R. (1975b). *Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*. Agricultural Research Service.
- Wischmeier W. H., & Smith D. D. (1965). *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains, Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation; Agriculture Handbook No.282*. Agricultural Research Service.
- Wischmeier W. H., & Smith D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning; Agriculture Handbook No.537*. Indiana: Agricultural Research Service.
- Wischmeier W. H., Johnson C. B., & Cross B. V. (1971). Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of soil and water conservation*.
- Woolhiser D. A., & Renard K. G. (1978). Stochastic aspects of watershed sediment yield. *Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering*.
- Woolhiser D. A., & Todorovic P. (1974). *A stochastic model of sediment yield for ephemeral streams*. Tucson, Arizona, US: Agricultural Research Service.
- Woolhiser D. A., Smith R. E., & Goodrich D. C. (1990). *KINEROS: A kinematic runoff and erosion model*. Agricultural Research Service.



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



## Ελληνικές Αναφορές / Greek References

- Efthimiou N., Lykoudi E., Panagoulia D., & Karavitis C. (2016). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE models: the case of Venetikos River Catchment. *Global NEST Journal*, 18(1).
- Ασλάνης Π. (2018). *Εφαρμογές GIS την χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας σε διάβρωση. Εμπειρική ανάλυση για την λεκάνη απορροής του Ξηριά, Διπλωματική Εργασία*. Αθήνα: Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών.
- Βαχαβιώλος Θ. Κ. (2014). *Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμιευτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δερμιτζάκης Μ. Δ., & Λέκκας Σ. Π. (2010). *Διερευνώντας τη Γη. Εισαγωγή στη Γενική Γεωλογία, Β' Έκδοση*. Αθήνα: Εκδόσεις Γ. Γκέλμπεσης.
- Δήμος Χ. Σ. (2019). *Εφαρμογή συγκεντρωτικού και ημικατανεμημένου μοντέλου σε υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων υδρολογικής διόδευσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ευθυμίου Ν. Γ. (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. (2019). *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, Διδακτορική Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- 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.
- Θραψίμης Β., Πλαλή Μ., & Σανοζίδου Μ. (2010). *Παρεμβάσεις για την ποιοτική και ποσοτική διαχείριση του υδάτινου δυναμικού των λεκανών απορροής του Σπερχειού ποταμού*. Λαμία: Τεχνικό Επιμελητήριο Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.



- Κάβουρας Μ., Δάρρα Α., Κονταζάκη Σ., & Τομαή Ε. (2016). *Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας - Αρχές και Τεχνολογίες*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καραπάνος Σ. (2007). *Το χειμαρρικό περιβάλλον (δυναμικό) του χειμάρρου Πάμισου Θεσσαλίας. (Εστίες παραγωγής χειμαρρικών φαινομένων - αποτελεσματικότητα των εκτελεσθέντων έργων διευθέτησης), Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Καρλή Α. Κ. (2013). *Υδρογεωλογικές & Υδροχημικές συνθήκες των υδροφόρων της λεκάνης του Σπερχείου ποταμού*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κουκουβίνος Α. (2014). *Προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογίας πλημμυρών, Ημερίδα Ερευνητικού Προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ*.
- Κουτσογιάννης Δ. (1996). *Στατιστική Υδρολογία, 3η Έκδοση*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ. (2011). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, 4η Έκδοση*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ., & Λαζαρίδης Λ. (1998). *Οριστική μελέτη αποχέτευσης Κορίνθου, Μελέτη χειμάρρου Ξηριά*. Αθήνα: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων.
- Κουτσογιάννης Δ., & Μαμάσης Ν. (2001). *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριάσιου πεδίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ., & Ξανθόπουλος Θ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Κουτσογιάννης Δ., & Ταρλά Κ. (1987). *Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα. Τεχνικά Χρονικά, Α-7(3)*.
- Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., & Ευστρατιάδης Α. (2003). *Υδρολογική-Υδραυλική Μελέτη για την Αντιπλημμυρική Προστασία της Νέας Διπλής Σιδηροδρομικής Γραμμής κατά τη Διέλευσή της από την Περιοχή του Ποταμού Σπερχείου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης Δ., Μαρκόνης Γ., Κουκουβίνος Α., Παπαλεξίου Σ., Μαμάσης Ν., & Δημητριάδης Π. (2010). *Υδρολογική μελέτη ισχυρών βροχοπτώσεων στη λεκάνη του Κηφισού*.
- Κωτούλας Δ. (2001). *Ορεινή Υδρονομική Τόμος Ι: Τα ρέοντα ύδατα*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Λυκούδη Ε. Ε. (2000). *Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής του άνω ρου του Αχελώου, Διδακτορική Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λυκούδη Ε. Ε., & Ζαρρής Δ. (2006). *Εκτίμηση της στερεοαπορροής υδρολογικών λεκανών με συνδυαστική ανάλυση υδρολογικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων, Ερευνητικό έργο: Πρωταγόρας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.





- Μαμάσης Ν. (2014). *Πλημμύρες κι Αντιπλημμυρικά Έργα: Φυσικό πλαίσιο - Γεωμορφολογία και απορροή*. Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Ε.Μ.Π.
- Μιμίκου Μ. Α. (2006). *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 3η Έκδοση*. Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις.
- Μιμίκου Μ. Α., & Μπαλτάς Ε. Α. (2012). *Τεχνική Υδρολογία, 5η Έκδοση*. Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις.
- Μπαλτάς Ε. (2001). Ανάπτυξη και Εφαρμογή ενός Μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου για την Περιοχή του Αλιάκμονα. Στο *Υδροτεχνικά ΕΥΕ, Τόμος 11*.
- Μπαλτάς Ε. (2004). Η Ανάλυση των Υδατικών Διαμερισμάτων της Χώρας στην Εφαρμογή της Οδηγίας - Πλαίσιο για τα Νερά. *Αειχώρος, 3(1)*.
- Μπαλτάς Ε., & Μιμίκου Μ. (χ.χ.). Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά - Επαναπροσδιορισμός Νέω Υδρολογικών Περιφερειών. Στο *Υδροτεχνικά ΕΥΕ, Τόμος 15*.
- Μπαλτάς Ε., & Μιμίκου Μ. (χ.χ.). Σύγκριση Μοντέλων Βροχής - Απορροής με Βάση τη Χωρική Κατανομή της Βροχής. Στο *Υδροτεχνικά ΕΥΕ, Τόμος 9*.
- Ναλμπάντης Ι., & Κουτσογιάννης Δ. (1992). *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας, Τεύχος 10*. Αθήνα: ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Ξανθόπουλος Θ. (1984). *Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Οδηγία 2000/60/ΕΚ. (2000). Πλαίσιο Κοινοτικής Δράσης Στον Τομέα Της Πολιτικής Των Υδάτων. *Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο*.
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ. (2007). Αξιολόγηση και Διαχείριση Πλημμυρικών Κινδύνων. *Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο*.
- Παναγούλια Δ., & Δήμου Γ. (2002). *Μηχανική των Φερτών Υλικών, 3η έκδοση*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπάζογλου Π. (2009). Εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη του Ανθεμούντα. *LIFE07/ENV/GR/000278*.
- Παυλόπουλος Κ. Π. (2011). *Γεωμορφολογία: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*. Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
- ΠΔ (Προεδρικό Διάταγμα). (1974). Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κλπ. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.
- Σαπουντζής Μ., Μυρωνίδης Δ., Στάθης Δ., & Στεφανίδης Π. (2009). Σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής των μεθόδων πρόβλεψης της διάβρωσης USLE και GAVRILLOVIĆ με πραγματικές μετρήσεις σε λεκάνη απορροής. *11ο Πανελλήνιο συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ε.Υ.Ε.*



- Στεφανίδης Σ., Χατζηχριστάκη Χ., & Στεφανίδης Π. (2016). *Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με τη συνδυασμένη χρήση του μοντέλου RUSLE και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Σωτηροπούλου Κ. (2012). *Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών σύμφωνα με την οδηγία 2007/60/ΕΕ. Η εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού, Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΥΠΑΝ. (1999). *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες. Ερευνητικό Έργο*. Αθήνα: Υπουργείο Ανάπτυξης & Επενδύσεων.
- ΥΠΕΝ. (2010). *Προδιαγραφές Μελετών*. Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας.
- ΥΠΕΝ. (χ.χ.). *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας - Πλημμυρικά Υδρογραφήματα*. Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας.
- Φλαμπούρης Κ. Π. (2008). *Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης  $R$  στον νόμο RUSLE, Διδακτορική Διατριβή*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.



## Διαδικτυακοί Ιστότοποι / Websites

<https://land.copernicus.eu/>

<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>

<http://www.fao.org/>

<https://www.hec.usace.army.mil/>

<https://scholar.google.com/>

<https://www.researchgate.net/>

<http://www.itia.ntua.gr/>

<http://www.geo.auth.gr/>

<https://www.igme.gr/>

<http://stratus.meteo.noa.gr/>

<http://www.hnms.gr/>

<https://floods.ypeka.gr/>

<https://www.e-nomothesia.gr/>

<https://www.ktimatologio.gr/>

<http://geodata.gov.gr/>

<https://www.orykta.gr/>

<https://repository.kallipos.gr/>

<https://dspace.lib.ntua.gr/>

<https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/>

<http://portal.tee.gr/>

<https://ejournals.epublishing.ekt.gr/>

<https://thesis.ekt.gr/>

<https://www.didaktorika.gr/>



## Παραρτήματα / Appendixes

Παράρτημα / Appendix I: Στρωματογραφικές στήλες / Stratigraphy

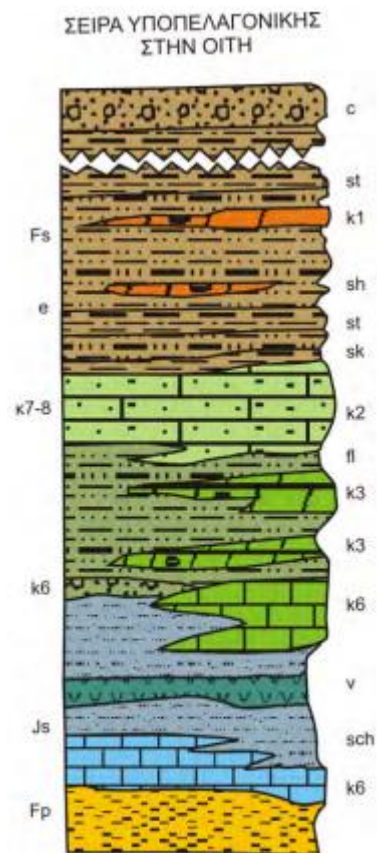
Παράρτημα / Appendix II: Γεωλογικοί σχηματισμοί / Geological formations

Παράρτημα / Appendix III: Καλύψεις - χρήσεις γης / Land use

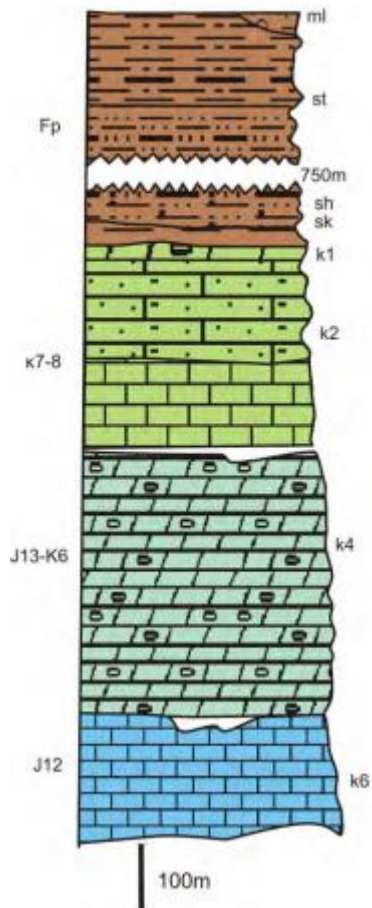
Παράρτημα / Appendix IV: Μέση μηνιαία απορροή [ $\text{hm}^3$ ] Σπερχειού ποταμού στη θέση Γέφυρα Κομποτάδων / Mean annual discharge [ $\text{hm}^3$ ] of Sperchios river at Kompotades bridge

# Παράρτημα Ι: Στρωματογραφικές στήλες

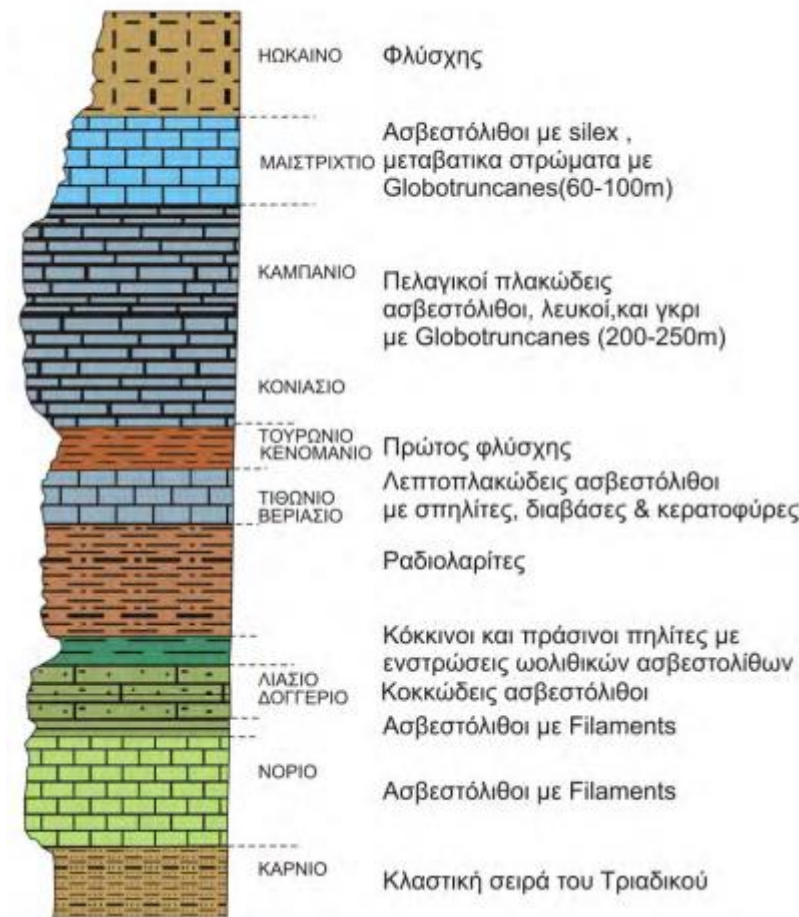
(πηγή: Καρλή Α. Κ. 2013)



ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΝΑΣΣΟΥ ΓΚΙΩΝΑΣ ΣΤΗΝ ΟΙΤΗ



ΖΩΝΗ ΩΛΟΝΝΟΥ ΠΙΝΔΟΥ



- |    |                                  |    |                              |    |   |
|----|----------------------------------|----|------------------------------|----|---|
| ml | Μολασσικοί σχηματισμοί           | fl | Φλυσχοειδή                   | k2 | Ασβεστόλιθοι μικρολατυποπαγείς                                      |
| sh | Αργιλικό σχιστόλιθοι του φλύσχης | Fp | Φλύσχης Παρνασσού-Γκιώνας    | k3 | Μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι                                      |
| st | Ψαμμίτες                         | Fs | Φλύσχης Υποπελαγονικής ζώνης | k4 | Μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι                                       |
| sk | Ασβεσπικοί σχιστόλιθοι           | v  | Οφιόλιθοι                    | k6 | Σκοτεινότεφοι ασβεστόλιθοι εντός της σχιστοκερατολιθικής διαπλάσεως |
| c  | Κροκαλοπαγή                      | k1 | Νουμουλιτοφόροι ασβεστόλιθοι |    |   |

## Παράρτημα ΙΙ: Γεωλογικοί σχηματισμοί

Κωδικός	Είδος	Περιγραφή (για ΛΑΠ Σπερχειού)	RUSLE's K	Gavrilovic's Y	Koutsoyiannis – Tarla's K
δ	Δολερίτης	τόφφοι βασικών εκρηξιγενών πετρωμάτων, ηφαιστειακά λατυποπαγή, διαβασικοί πορφυρίτες, κεροστιλβίτες και διορίτες. Εντός της μεσοζωικής σχιστοκερατολιθικής διαπλάσεως TRJ-sh και Kf.o-sh, και σπανιότερα εντός του ανωκρητιδικού φλύσχη	0.00055	0.8	0.1
δ <sub>1</sub>	Δολερίτες και διαβασικοί τόφφοι	ανοικτοί ελαιοπράσινοι, φαιοί, συμπαγείς και εύθραυστοι	0.00055	0.4	0.1
δ <sub>2</sub>	Βασικά και υπερβασικά εκρηξιγενή πετρώματα	του οφιολιθικού συμπλέγματος που περιλαμβάνουν διαβάση, περιδοτίτες, πυροξενίτες, γάββρους, σερπεντίνες, αμυγδαλόλιθους, προσκεφαλοειδής λάβας και τόφφους	0.00055	0.8	0.1
μ	Σπιλίτης, βασάλτης, μελαφύρης		0.00055	0.8	0.1
π	Περιδοτίτης, δουνίτης με χρώμα, πυροξενικός περιδοτίτης, ολιβινίτης, γάββρος, σερπεντίνης		0.00055	0.8	0.1





<b>al</b>	Προσχώσεις	άργιλοι, άμμοι, χάλικες και κροκάλες	0.0035	1.55	1
<b>al-b</b>	Κατολισθαίνουσα μάζα	κυρίως από φλύσχη	0.003	1.55	1
<b>al-c</b>	Ποταμιαίες αποθέσεις	από άμμο και κροκαλοπαγή	0.0035	1.55	1
<b>al-c1</b>	Χερσαίες αποθέσεις	ερυθρά πηλός, άμμος, ψαμμίτες και κροκολαπαγή. Αναβαθμίδες των 20m	0.0035	1.55	1
<b>al-sc</b>	Ριπίδια, κώνοι κορημάτων	χειμαρρώδους προελεύσεως και πλευρικά κορήματα	0.003	1.55	1
<b>dl-c1</b>	Αποθέσεις χειμάρρου	από ερυθρό πηλό, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Αναβαθμίδες 15-20m	0.0035	2	1



<b>e-k</b>	Ασβεστόλιθοι	λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις, μικρολατυποπαγείς ή ψηφιτοπαγείς, ενίοτε σιφροί, χρώματος ανοικτοτέφρου έως βαθυτέφρου. Πάχος: 20-40m	0.00055	1.3	0.1
<b>Fg</b>	Αργιλίτες και συμπαγής μάργα	συχνές εναλλαγές με σχιστόλιθους και λεπτές στρώσεις γραουβάκων	0.0035	1.3	0.5
<b>Fgc</b>	Γραουβάκες, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή	εντοπίζονται κυρίως γραουβάκες μεταξύ παρενεστρωμένων νομμουλιτοφόρων ασβεστολίθων (k)	0.015	1.3	0.5
<b>Fgs</b>	Σχιστόλιθοι και συμπαγής μάργα	χρώματος βαθέως ερυθρού στη βάση του φλύσχη	0.03	1.3	0.5
<b>fo</b>	Φλύσχη	Αποτελείται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους ή και ψαμμίτες (st). Τοπικά εμφανίζονται και κροκαλοπαγή. Στα ανώτερα μέρη του σχηματισμού παρεμβάλλονται πλακώδεις φακοειδείς ασβεστόλιθοι (k)	0.02	1.15	1
<b>Fp</b>	Φλύσχησ αδιαίρετος	σύστημα πετρωμάτων (αρχαιότερα προς νεότερα) από ερυθροβυσιοχρόους ασβεστιτικούς σχιστολίθους με χαρακτηριστική στυλοειδή κατάτμηση (πάχος 50-70m), ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Κατά θέσεις στους παραπάνω ορίζοντες αναπτύσσονται σημαντικές φακοειδείς ενστρώσεις ασβεστολίθου, συνήθως περιέχοντος κλαστικού υλικού	0.03	1.15	1



<b>Fpc</b>	Ψαμμίτες, λεπτομερή κροκαλοπαγή και γραουβάκες	Κροκαλοπαγής ορίζοντας του παραπάνω συστήματος του φλύσχη. Χαλαρή συνοχή με παρεμβολή ψαμμιτών. Κροκάλες από ασβεστόλιθους, σερπεντίνη, γρανίτη, διορίτη, πυριτολίθου και υλικών φλύσχη	0.015	1.3	0.5
<b>Fpc-ols</b>	Άργιλοι και ιλυόλιθοι	εν μέρει με συχνή εναλλαγή λεπτών στρωμάτων γραουβάκου. Επίσης μεταξύ στρώσεων από ερυθρό αργιλικό σχιστόλιθο και συμπαγούς μάργας ή και παρεμβεβλημένων ολισθοστρωμάτων	0.0035	1.3	0.1
<b>Fs</b>	Φλύσχησ αδιαίρετος	συνίσταται από αδρόκοκκους ψαμμίτες εναλλασσόμενους με αργιλικούς σχιστόλιθους και ψαμμούχες μάργες	0.03	1.3	1
<b>I<sub>13</sub></b>	Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	λεπτροστρωματώδεις, υπέρυρθοι έως πρασινότεφροι και πράσινοι ψαμμίτες σε συχνές εναλλαγές. Πάχος: 50m	0.00055	0.8	0.1
<b>I<sub>12</sub></b>	Ασβεστόλιθοι	ωχρότεφροι, άστρωτοι, αποσαθρούμενοι προς κρητίδα, μετενστρώσεων πράσινων ψαμμιτών. Πάχος: >60m	0.00055	0.8	0.1
<b>J-Ki</b>	Ραδιολαρίτες, κερατόλιθοι και σχιστόλιθοι	παρενεστρωμένοι, πελαγικοί, σφιφροί, θραυσματογενείς και ωλιθικοί ασβεστόλιθοι ποικίλου αριθμού και πάχους. Πάχος: 20-50m	0.025	1	0.5



<b>J-Kil</b>	Ασβεστόλιθοι	με ενστρώσεις ραδιολαριτών, σχιστόλιθων, σερπεντίνων και πράσινων τόφων βασικών ηφαιστιτών. Πάχος: 200m	0.00055	1.15	0.1
<b>J-Kir</b>	Ραδιολαρίτες	ποικιλόχρωμοι σχιστόλιθοι της σχιστοκερατολιθικής διαπλάσεως J-Kir. Πάχος μεγαλύτερο των 800m	0.0005	0.8	0.5
<b>J<sub>12</sub>-k</b>	Ασβεστόλιθοι	παχυστρωματώδεις, μελανότεφροι, σιφροί, ορατού πάχους 150m. Οι ανώτεροι οριζόντες αντιπροσωπεύουν την Κιμμερίδιο εποχή, ενώ οι κατώτατοι οριζόντες ενδεχομένως περιλαμβάνουν και βαθμίδες της μέσης Ιουρασικής εποχής	0.00055	1	0.1
<b>J<sub>13</sub>K<sub>6</sub>-k</b>	Ασβεστόλιθοι "ενδιάμεσοι"	μεσοστρωματώδεις, τέφροι, σιφροί και κατά θέσεις ωλιθικοί. Περιλαμβάνονται μεταξύ του ανωτέρου και μεσαίου βωξίτικου οριζοντα και βρίσκονται σε μικρή γωνιώδη ασυμφωνία με τους υπερκείμενους ασβεστόλιθους. Πάχος: ~300m	0.00055	1.15	0.1
<b>Ji-m-k</b>	Ασβεστόλιθοι	συνήθως σκοτεινόχροιοι, βιτουμένουχοι, με ακανονίστους κηλίδας ανοικτού χρώματος, συχνά ωλιθικοί, περιέχοντες μικρά γαστερόποδα	0.00055	0.8	0.1
<b>Jm-s</b>	Ασβεστόλιθοι	πάχους 10m	0.00055	0.8	0.1



<b>Jm-s-ch</b>	Ασβεστόλιθοι θραυσματογενείς	με κερατόλιθους πάχους 50-100m	0.00055	0.8	0.1
<b>Js-k</b>	Ασβεστόλιθοι	σκοτεινότεφροι έως τεφροί, στιφροί, κατά θέσεις ωλιθικοί, καλώς εστρωμένοι, μεταξύ δολομιρων και δολομιτικών ασβεστολίθων. Πάχος: ~150m	0.00055	1	0.1
<b>Js-sh</b>	Ασβεστόλιθοι	στα νοτιοδυτικά του κεντρικού τμήματος της λεκάνης οι παραπάνω ασβεστόλιθοι Js-k παρεμβάλλονται εντός σχιστοκερατολιθικής διαπλάσεως	0.00055	1	0.1
<b>Js-st</b>	Ασβεστόλιθοι	στα ανατολικά του κεντρικού τμήματος της λεκάνης η διάπλαση Js-k αναπτύσσεται κυρίως με σχιστοψαμμίτες και περιέχει λεπτές στρώσεις ασβεστολίθου	0.00055	1	0.1
<b>Js-m</b>	Ασβεστόλιθοι στιφροί	σκοτεινότεφρου, βιτουμενιούχου, λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις και ωλιθικοί κατά θέσεις. Πάχος: 200m	0.00055	0.8	0.1
<b>K<sub>6</sub></b>	Επικλυσιογενείς σχηματισμοί	συνιστάμενοι από φλυσχοειδή (f), δηλαδή μαργαϊκή άργιλο, ψαμμίτη και ψηφιτοπαγών, και από μικρολατυπτοπαγή ή μικροκροκαλοπαγή ασβεστολίθους (k). Πάχος: ~100m	0.0035	1	0.5



<b>K<sub>7-k</sub></b>	Τέφροι ασβεστόλιθοι	μεσοστρωματώδεις. Πάχος: 20-40m	0.00055	1.3	0.1
<b>K<sub>7-8-k</sub></b>	Σύστημα ασβεστολίθων	υπερκείμενων του ανωτέρου βωξιτικού ορίζοντα. Στα κατώτα μέλη βρίσκονται μεσοστρωματώδεις, μικρολατυπτοπαγή και σκοτεινότεφροι πάχους 20m. Ακολουθούν παχυστρωματώδεις μέλανες βιτουμενιούχοι ασβεστόλιθοι πάχους 60m. Συνεχίζουν τεφρόχροοι μικρολατυπτοπαγείς και μικροκροκαλοπαγείς ασβεστόλιθοι πάχους ~150m εξελισσόμενοι σε πελαγικούς ασβεστόλιθους αξιόλογου πάχους	0.00055	1	0.1
<b>K<sub>8s-k</sub></b>	Ασβεστόλιθοι	ανοικτόχρωμοι, σπιφροί, ενίοτε μικρολατυπτοπαγείς, πολλές μεταβαίνουν πλευρικός σε αργιλοψαμμιτικά ιζήματα χαλαράς συνοχής. Πάχος: 20-60m	0.00055	1.3	0.1
<b>K<sub>i</sub></b>	Ασβεστόλιθοι	άστρωτοι, ωχρότεφροι και πλακώδεις, υπέρυθροι με μεμονωμένες ταινίες κερατόλιθων	0.00055	1	0.1
<b>K<sub>r,o-c</sub></b>	Κροκαλοπαγές	αργιλικό ψαμμίτες, αργιλικό σχιστόλιθοι, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι παρενεστρωμένοι	0.045	1	1
<b>K<sub>r,o-F</sub></b>	Φλύσχης	αργιλικό ψαμμίτες και σχιστόλιθοι, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι παρενεστρωμένοι	0.02	1	1





<b>Kr,o-k</b>	Ασβεστόλιθος	πλακώδεις μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με ραδιολίθους και συμπαγείς ασβεστόλιθοι	0.00055	1	0.1
<b>Kr,o,p-F</b>	Φλύσχη	αργιλικό ψαμμίτες και σχιστόλιθοι, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι παρενεστρωμένοι	0.02	1	1
<b>Kr,o,p-k</b>	Ασβεστόλιθος	εντός του συστήματος του φλύσχη, ενίοτε πλακώδης και κλαστικός. Συνήθως οι επαφές του ασβεστόλιθου με τον περιβάλλοντα φλύσχη είναι διατεταραγμένες εντός ζώνης παρααυτοχθόνων μετακινήσεων	0.00055	1	0.1
<b>Ks</b>	Πελαγικοί και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	πλακώδεις συμπαγείς μεταξύ στρώσεων κερατόλιθων, με συχνή εναλλαγή με κλαστικά μικρολατυποπαγών έως μικροκροκαλοπαγών ασβεστόλιθων, περιέχοντας θραύσματα ρουδιστών	0.00055	1	0.1
<b>Ksc</b>	Κροκαλοπαγή	αποτελούμενα από κερατολιθικές και σινολιθικές κροκάλες. Πάχος: 10m	0.045	1	0.1
<b>Ks-k</b>	Αδιαίρετοι ασβεστόλιθοι	επικλυσιγενείς πλακώδεις μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με ραδιολίτες, εξελισσόμενοι προς τα πάνω σε συμπαγείς ασβεστόλιθους	0.00055	1.3	0.1



<b>Krs</b>	Ψαμμίτες	υποπράσινοι μεταξύ ενστρώσεων αδρομερών κλαστικών ή κροκαλοπαγών ασβεστόλιθων. Στο ανώτερο στρώμα υπάρχει κροκαλοπαγές από κερατόλιθους και πρασινολιθικών κροκάλων. Πάχος: 400m	0.015	1	0.5
<b>Lp</b>	Λιμναίες αποθέσεις	από μάργες, αργίλους, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, με παρεμβολές κοιτών λιγνιτών ασήμαντου πάχους	0.015	1.9	1
<b>ne</b>	Μάργες, άργιλοι, χάλικες, ψαμμίτες, κροκαλοκαγή, μαργαϊκές ασβεστόλιθοι		0.00055	1.55	0.5
<b>O-c</b>	Κλαστικά ιζήματα μολασσικού τύπου από κροκαλοπαγοί.	Επίκεινται υπερβατικώς μεσοζωικών ασβεστολίθων, σχιστοκερατολίθων ή φλύσχη και είναι ελαφρώς πτυχωμένα, παραλληλιζόμενα δε προς τους ολιγοκαινικούς σχηματισμούς της Μεσοελληνικής Αύλακος, αποτελώντας όπως φαίνεται την νοτιοανατολική τους προέκταση	0.003	1.8	1
<b>O-k</b>	Κλαστικά ιζήματα μολασσικού τύπου από ασβεστόλιθους		0.003	1.8	1
<b>O-st</b>	Κλαστικά ιζήματα μολασσικού τύπου από ψαμμίτες		0.003	1.8	1



<b>ol</b>	Ολισθόλιθος	ογκόλιθος, ή μεγαλύτερα μάζα, από αλλοθόνο πέτρωμα με αδιατάρακτη στρώση, που ολίσθησε κατά την ιζηματογένεση των σχηματισμών που την περιβάλλουν	0.00055	0.6	0.1
<b>P-R</b>	Σχιστόλιθοι και ψαμμίτες	αργιλικόι, μαρμαρογιακοί και τοφφικοί σχιστόλιθοι, χαλαζιακοί ψαμμίτες και πυριτιούχοι ασβεστόλιθοι	0.02	0.6	0.5
<b>P-Rt</b>	Τοφφικοί σχιστόλιθοι	φαιοί έως ιώδεις. Πάχος: ~500m	0.02	0.6	0.5
<b>Q</b>	Αποθέσεις ερυθρογής (tr)	τοφφικά υλικά αποτεθέντα από θερμές πηγές (τα)	0.0035	1.9	1
<b>Qal</b>	Παλιές ποταμιαίες αποθέσεις	άργιλοι, άμμοι και χάλικες χωρίς πρόσφατη τροφοδοσία τους	0.0035	1.9	1
<b>Qal1</b>	Αποθέσεις κοιλάδων	άργιλοι, άμμοι, χάλικες, κροκάλες	0.0035	2	1



<b>Qf</b>	Αλλουβιακά ριπίδα	άργιλοι, άμμοι, χάλικες στην κύρια ευρεία κοιλάδα. Κώννοι από κλαστικά υλικά στη δευτερεύουσα κοιλάδα	0.0035	2	1
<b>QI</b>	Αποθέσεις αναβαθμίδων	ερυθρή πηλός από κροκάλες γραουβάκου και άμμο	0.0035	2	1
<b>QIs</b>	Πλευρικά κορήματα	μεταπιπτόντα από αδιαβάθμητες κατολισθαίνουσες μάζες και από μη παγετώδη ολισθαίνουσες μάζες, κυρίως από αργιλικά υλικά	0.003	1.55	1
<b>Qs</b>	Πλευρικά κορήματα	από γωνιώδες και λεπτομερή στοιχεία και αργιλούχων αποθέσεως	0.003	1.55	1
<b>Qsc</b>	Αδρομερείς αποθέσεις κλιτύων	προβολές αποθέσεις (γλώσσες) και παγετώδεις όγκοι από γωνιώδη τεμάχια ποικίλου μεγέθους, κυρίως από ασβεστολίθους και γραουβάκες	0.0035	1.55	1
<b>R</b>	Ραδιολαρίτες	ερυθρόφαιοι, ωχρότεφροι κερατόλιθοι, κατά θέσεις ερυθρά σιδηρούχα πυριτικά ορυκτά	0.0005	0.6	0.5



<b>R-J</b>	Ραδιολαρίτες και σχιστόλιθοι	ερυθρόφαιοι εντός του σχιστοκερατολιθικού και οφιολιθικού συμπλέγματος	0.02	0.6	0.5
<b>R<sub>26</sub></b>	Ασβεστόλιθοι	υπέρυθροι έως ωχροτέφροι, πλακώδεις, κονδυλώδεις ασβεστόλιθοι και υπέρυθροι ασβεστόλιθοι. Πάχος: >1000m	0.00055	0.6	0.1
<b>RJ-k</b>	Ασβεστόλιθος	μεγάλες ασβεστολιθικές μάζες εντός της σχιστοκερατολιθικής διαπλάσεως με οφειολίθους TRJ-sh	0.00055	0.6	0.1
<b>RJ-sh</b>	Σχιστοκερατολιθική διάπλαση	με οφειολίθους και σερπεντίνη. Σύστημα αργιλικών σχιστολίθων, κερατολίθων, μαργαϊκών ασβεστολίθων σε λεπτά εναλλασσόμενα στρώματα. Πλακώδεις και συμπαγείς ασβεστόλιθοι παρενεστρωμένοι, σπανίως κροκαλοπαγή, οφειόλιθοι και τόφφοι	0.02	0.6	0.5
<b>TRJ</b>	Σχιστοκερατολιθική διάπλαση	μετ' οφιολίθων. Σύστημα ερυθρών αργιλικών σχιστολίθων, κερατολίθων και μαργαϊκών ασβεστολίθων σε λεπτά εναλλασσόμενα στρώματα (sh). Ασβεστόλιθοι (k) πλακώδεις ή συμπαγείς και άστρωτοι εντός τους συστήματος των σχιστοκερατολίθων. Ενίοτε απαντούν και κροκαλοπαγή.	0.02	0.6	0.5



### Παράρτημα III: Καλύψεις - χρήσεις γης

Κωδικός Corine	Περιγραφή χρήσης γης	RUSLE's C	Gavriloic's X
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.001	0.00
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.001	0.05
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.01	0.05
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γεινιαζουσα γη	0.001	0.05
123	Ζώνες λιμένων	0	0.00
124	Αεροδρόμια	0.003	0.05
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0.36	0.05
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	0.05	0.05
133	Χώροι οικοδόμησης	0.36	0.05
141	Περιοχές αστικού πράσινου	0.1	0.85
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.001	0.05
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.3	0.90
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.15	0.85
213	Ορυζώνες	0.001	0.85
221	Αμπελώνες	0.3269	0.55
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	0.1	0.45
223	Ελαιώνες	0.2094	0.45
231	Λιβάδια	0.1132	0.60
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	0.35	0.70
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.1476	0.70
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.1307	0.80





244	Γεωργο-δασικές περιοχές	0.13	0.70
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.0014	0.30
312	Δάσος κωνοφόρων	0.001	0.40
313	Μικτό δάσος	0.001	0.20
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.0522	0.60
322	Θάμνοι και χερσότοποι	0.2	0.60
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.03	0.50
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	0.026	0.50
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.06	0.95
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.0001	0.95
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.3062	0.65
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.1	0.80
335	Παγετώνες και αιώνιο χιόνι	0	0.00
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.14	0.10
412	Τυρφώνες	0.14	0.10
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.18	0.10
422	Αλυκές	0.0001	0.05
423	Ζώνες που καλύπτονται από παλιορροιακά ύδατα	0.0001	0.05
511	Υδατορρέυματα	0.00001	0.05
512	Επιφάνειας στάσιμου ύδατος	0.0001	0.05
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	0.0001	0.05
522	Εκβολές ποταμών	0.0001	0.05
523	Θάλασσες και ωκεανοί	0.0001	0.00



## Παράρτημα IV: Μέση μηνιαία απορροή [ $\text{hm}^3$ ] Σπερχειού ποταμού στη θέση Γέφυρα Κομποτάδων

(πηγή: Κουτσογιάννης Δ. et al., 2003)

ΥΔΡΟΛ. ΕΤΟΣ	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΕΤΟΣ
1949-50	33.80	61.60	33.00	73.00	78.70	100.40	77.60	30.50	7.60	3.50	0.90	0.10	500.7
1950-51	4.50	32.30	90.60	87.60	57.70	145.30	55.90	22.60	17.80	6.90	5.50	9.00	535.7
1951-52	81.60	83.10	51.50	109.00	125.60	81.60	48.90	23.90	15.00	10.50	7.30	6.40	644.4
1952-53	9.60	42.10	75.80	64.00	55.90	33.90	48.90	39.00	28.30	14.30	8.10	7.80	427.7
1953-54	38.00	92.90	38.00	71.70	106.20	121.60	86.70	43.30	17.70	8.10	6.80	7.20	638.2
1954-55	10.60	24.30	80.10	86.00	61.50	85.80	86.40	32.20	16.70	11.40	11.20	22.10	528.3
1955-56	57.50	85.30	39.40	81.10	196.30	142.70	115.90	60.60	28.30	14.80	10.40	9.50	841.8
1956-57	17.90	39.80	27.30	62.50	48.60	68.30	36.20	32.80	38.80	29.00	7.20	15.70	424.1
1957-58	116.30	91.30	103.80	88.30	51.30	142.10	78.00	42.70	22.80	12.70	5.90	58.60	813.8
1958-59	31.00	83.90	70.90	135.30	60.50	112.80	90.20	49.10	27.10	20.40	14.50	32.70	728.4
1959-60	35.60	65.30	93.40	155.40	72.40	110.10	76.10	40.20	10.40	1.10	0.10	15.80	675.9
1960-61	1.70	0.40	32.20	39.50	57.50	87.40	34.50	20.00	7.10	6.00	4.90	4.60	295.8
1961-62	16.00	22.00	54.60	26.00	66.80	144.00	42.80	19.80	9.50	5.50	3.20	7.40	417.6
1962-63	56.90	170.50	263.00	193.70	245.20	182.20	104.30	100.50	41.40	22.60	9.90	9.70	1399.9
1963-64	36.00	29.60	73.90	50.80	87.10	138.40	54.90	39.90	30.90	11.80	7.70	8.80	569.8
1964-65	12.50	18.10	46.90	77.80	55.10	75.00	77.20	51.10	20.70	9.60	5.90	6.90	456.8
1965-66	8.90	29.60	54.30	131.60	62.70	64.00	37.10	28.40	14.30	5.90	5.20	7.60	449.6
1966-67	11.30	85.10	100.60	98.10	37.40	50.00	45.00	29.50	10.30	9.30	5.70	9.50	491.8
1967-68	8.20	13.80	14.20	119.00	87.00	103.90	61.30	31.70	20.70	7.10	5.40	7.80	480.1
1968-69	15.00	34.50	152.60	104.50	116.20	173.20	60.40	33.40	15.00	12.20	11.00	14.20	742.2
1969-70	11.40	19.30	105.70	94.90	50.10	117.70	40.70	11.00	10.10	5.30	4.80	9.30	480.3
1970-71	19.30	23.10	42.40	70.50	70.90	177.50	90.60	34.00	13.80	11.30	8.80	5.70	567.9



<b>1971-72</b>	6.90	53.20	54.90	91.40	115.30	64.00	97.90	60.80	32.60	20.10	0.00	10.00	607.1
<b>1972-73</b>	59.80	49.70	27.50	60.70	93.70	97.70	58.90	25.80	8.60	7.60	8.10	6.40	504.5
<b>1973-74</b>	15.70	13.90	39.70	17.00	72.90	97.40	69.20	36.90	19.30	11.40	7.40	18.60	419.4
<b>1974-75</b>	22.40	47.20	55.60	23.00	36.80	70.50	24.30	4.80	20.30	8.70	6.00	5.70	325.3
<b>1975-76</b>	8.50	14.40	44.80	28.80	71.00	55.50	59.60	26.90	12.90	7.10	5.90	5.50	340.9
<b>1976-77</b>	9.60	38.10	72.00	35.60	27.20	22.30	19.10	11.90	8.30	4.30	4.00	4.60	257.0
<b>1977-78</b>	6.10	8.90	26.00	61.50	102.10	52.30	65.90	27.00	11.10	10.10	8.90	13.60	393.5
<b>1978-79</b>	16.30	40.30	83.50	112.40	85.10	55.30	67.40	43.50	30.10	19.00	14.70	11.90	579.5
<b>1979-80</b>	26.70	68.80	75.90	117.20	68.00	146.70	76.50	44.60	23.60	14.10	9.00	4.70	675.8
<b>1980-81</b>	90.70	62.10	76.40	182.70	132.70	41.90	74.80	44.70	25.80	16.50	11.00	13.00	772.3
<b>1981-82</b>	12.70	36.20	50.20	13.90	78.30	147.80	120.30	84.20	54.40	39.60	28.50	7.90	674.0
<b>1982-83</b>	0.70	60.90	52.70	0.00	46.30	130.90	28.60	4.60	0.00	0.00	0.00	0.00	324.7
<b>1983-84</b>	3.30	61.00	73.90	48.50	94.10	115.20	110.50	75.70	48.30	34.60	24.70	7.20	697.0
<b>1984-85</b>	0.00	43.70	46.10	158.60	66.40	127.40	76.10	45.80	26.60	17.10	11.50	1.10	620.4
<b>1985-86</b>	7.00	97.70	50.20	78.20	61.10	92.70	37.60	12.40	2.40	0.00	0.00	0.00	439.3
<b>1986-87</b>	40.50	0.00	38.30	72.30	60.60	200.80	102.60	68.80	43.20	30.60	21.70	0.00	679.4
<b>1987-88</b>	32.80	56.20	37.70	54.50	63.10	86.40	50.50	23.50	10.50	4.10	1.70	0.00	421.0
<b>1988-89</b>	0.00	120.10	64.00	0.00	34.40	114.50	42.00	16.20	5.10	0.00	0.00	0.00	396.3
<b>1989-90</b>	20.30	15.90	30.80	0.00	24.10	23.20	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	129.5
<b>1990-91</b>	0.00	69.70	57.40	73.20	58.20	74.60	72.20	42.40	24.10	15.10	10.00	0.80	497.7
<b>1991-92</b>	0.00	36.20	38.30	0.00	40.70	55.40	31.00	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	208.2
<b>1992-93</b>	0.00	1.70	29.90	0.00	33.10	87.30	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	167.0
<b>1993-94</b>	0.00	76.80	27.90	101.10	101.80	37.00	44.70	18.60	6.80	1.10	0.00	0.00	415.8
<b>Μέση Τιμή</b>	22.5	49.3	62.2	74.5	75.9	99.0	62.4	34.3	18.6	11.1	7.2	8.6	525.7
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	25.7	34.6	40.9	48.4	41.1	44.3	27.3	21.5	13.1	9.3	6.3	10.1	322.7