

Σ. Καραλής¹, Υποψήφιος διδάκτορας, **Ε. Καρύμπαλης¹**, Καθηγητής, **Ν.Μαμάσης²**,
Επίκουρος Καθηγητής

¹Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας & Εφαρμοσμένων
Οικονομικών, Τμήμα Γεωγραφίας, Ελευθερίου Βενιζέλου 70, Καλλιθέα 176 76, Ελλάδα
²Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας υδατικών πόρων και
περιβάλλοντος, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780 Ζωγράφου
skaralis@teiath.gr, karymbalis@hua.gr, nikos@itia.ntua.gr

ΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΡΕΙΝΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία διερευνούνται οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την στερεοαπορροή χρησιμοποιώντας τις τιμές της ειδικής στερεοαπορροής παλαιότερων μελετών, σε 11 θέσεις στερεοϋδρομετρήσεων που ανήκουν στις λεκάνες απορροής 6 ποταμών της Δυτικής και Βόρειας Ελλάδας (Άραχθος, Αώος, Αχελώος, Καλαμάς, Εύηνος και Αλιάκμονας). Οι τιμές αυτές (80 έως 2150 t km⁻²γ⁻¹) προέρχονται από ανάλυση υφιστάμενων στερεοϋδρομετρήσεων της ΔΕΗ, υιοθετώντας την μέθοδο της τεθλασμένης καμπύλης παροχής – στερεοπαροχής. Εξετάζονται οι συσχετίσεις με παραμέτρους των λεκανών απορροής που περιλαμβάνουν την τοπογραφία - ανάγλυφο (κλίσεις, υψόμετρα), την μορφομετρία - τοπολογία, την υδρογραφική υφή, τον τεκτονισμό, την λιθολογία, τις χρήσεις-καλύψεις γης καθώς και με 2 παράγοντες της USLE (LSUSLE, RUSLE), από πρόσφατους χάρτες του European Soil Data Center. Διαπιστώνεται ότι οι κύριοι παράγοντες ελέγχου με την σειρά είναι η κλίση των λεκανών, το λιθολογικό τους υπόβαθρο και η βροχόπτωση. Κατόπιν, με την τεχνική της πολλαπλής παλινδρόμησης, εξάγεται μία σχέση που προβλέπει την ειδική στερεοαπορροή συναρτήσει της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, της κλίσης της λεκάνης και του ποσοστού συμμετοχής ευδιάβρωτων πετρωμάτων σε αυτήν. Η σχέση αυτή δίνει πολύ καλά μέτρα προσαρμογής στα δεδομένα ($R^2 = 0.93$).

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Στερεοαπορροή, έλεγχοι στερεοαπορροής, μοντέλα πρόβλεψης, Ελληνικές ορεινές λεκάνες

Εισαγωγή

Η πρώτη προσπάθεια εξαγωγής μιας εμπειρικής σχέσης που να προβλέπει την ειδική στερεοαπορροή (ανά μονάδα επιφανείας) για την Ελλάδα, επιχειρήθηκε από τους Κουτσογιάννη & Ταρλά (1987). Οι συγγραφείς μελέτησαν 7 θέσεις σε 3 ποταμούς της ΒΔ Ελλάδας (Άραχθος, Καλαμάς και Αλιάκμων), εξήγαγαν τις καμπύλες απορροής – στερεοαπορροής με βάση τις στερεοϋδρομετρήσεις της ΔΕΗ και στην συνέχεια εξέτασαν την επιρροή των εξής παραμέτρων πάνω στα αποτελέσματά τους: κλίση, γεωλογική σύσταση, βροχόπτώσεις και θερμοκρασία. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την στερεοαπορροή είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση και το γεωλογικό υπόβαθρο των λεκανών, το οποίο αποδίδεται με έναν μεσοσταθμικό συντελεστή. Μια δεύτερη προσπάθεια είναι αυτή των Roulos et al. (1996). Οι συγγραφείς αυτοί ενδιαφέρονταν ειδικότερα στην προέλαση των δέλτα των ποταμών και κατέληξαν σε μια απλή σχέση που συνδέει την στερεοαπορροή μόνο με το εμβαδόν της λεκάνης.

Περίπου 10 χρόνια μετά ακολούθησε η έρευνα των Ζαρρή – Λυκούδη (2007), στην οποία συγκεντρώθηκαν συνολικά 11 θέσεις σε 6 ποταμούς (προστέθηκαν ο Αχελώος και ο Εύηνος). Η έρευνα αυτή βασίστηκε σε νέες τιμές της ειδικής στερεοαπορροής οι οποίες εξήχθησαν από τις υπάρχουσες στερεοϋδρομετρήσεις με την *μέθοδο της τεθλασμένης καμπύλης παλινδρόμησης* (Koutsoyiannis, 2000, Zarris & Koutsoyiannis, 2005). Σαν ερμηνευτικές μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν όλες οι μορφομετρικές - τοπολογικές, φυσιογραφικές και υδρολογικές παράμετροι (μέση ετήσια παροχή, μέση ετήσια πλημμύρα, όχι όμως βροχοπτώσεις). Οι συγγραφείς δεν διαπίστωσαν κάποια σημαντική σχέση της στερεοαπορροής με τις μορφομετρικές παραμέτρους αλλά, και αυτό ίσως είναι το πιο σημαντικό εύρημα της έρευνας αυτής, μια στατιστικά σημαντική, ισχυρή σχέση μεταξύ της ειδικής στερεοαπορροής και της μέσης ετήσιας πλημμύρας.

Σχετικές με το θέμα είναι οι μελέτες προέλασης των δέλτα των ελληνικών ποταμών, ωστόσο εδώ παίζουν καθοριστικό ρόλο οι θαλάσσιες διεργασίες στο θαλάσσιο περιβάλλον των εκβολών. Σε ποταμούς της κεντρικής Ελλάδας διαπιστώθηκε μια σημαντική σχέση με το ανάγλυφο καθώς και το επιμήκες σχήμα των λεκανών απορροής (Karymbalis et al., 2001).

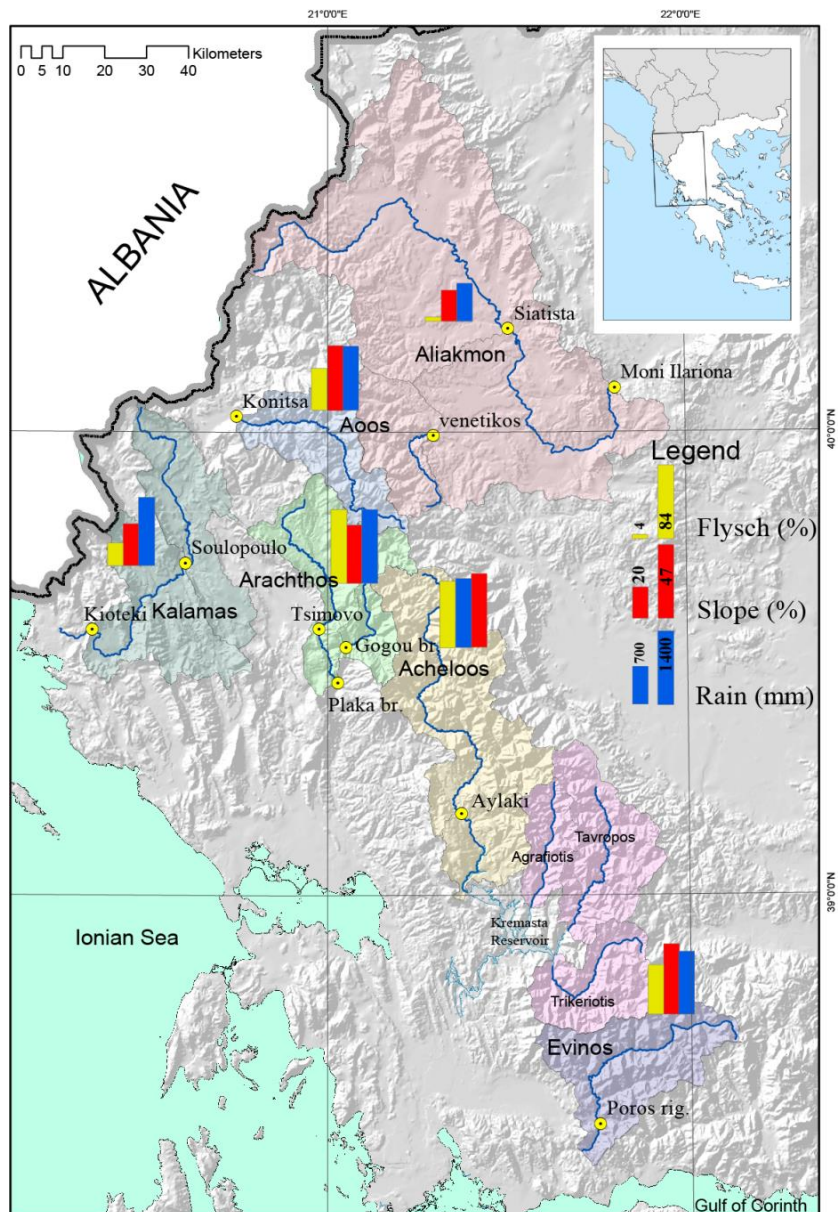
Μια καλή συνολική επισκόπηση των μεσογειακών συνθηκών μαζί με τιμές στερεοαπορροής δίνεται από τον J.C.Woodward (1995). Σαν καθοριστικοί παράγοντες ελέγχου της ειδικής στερεοαπορροής καθώς και της στερεοπαροχής στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου αναγνωρίζονται κατ' αρχάς η κλίση της λεκάνης απορροής («τοπογραφία» ή ανάγλυφο), οι βροχοπτώσεις ή/και η ένταση των βροχοπτώσεων, το λιθολογικό υπόβαθρο των λεκανών (ευδιάβρωτα ή όχι πετρώματα), και τέλος η χρήση και η κάλυψη της γης, ενώ επισημαίνεται η σημασία της παρουσίας των badlands στη λεκάνη απορροής. Οι παράμετροι αυτές έχουν ήδη επισημανθεί από τους Milliman & Syvitski (1992), που σαν βασικούς παράγοντες ελέγχου θεωρούν το ανάγλυφο και την έκταση της λεκάνης, ενώ η απορροή και οι βροχοπτώσεις κρίνονται ως δευτερεύοντες παράγοντες. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στο γεωλογικό – λιθολογικό υπόβαθρο της λεκάνης καθώς και στην κάλυψη της γης (του εδάφους) ως παράγοντες που πρέπει να αξιολογούνται ανά περίπτωση.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τους Ζαρρή & Λυκούδη (2007) (πίνακας 1) για να εξετασθούν οι συσχετίσεις με δείκτες των λεκανών απορροής (πίνακας 2). Στην συνέχεια, με τη χρήση της τεχνικής της βηματικής (stepwise) πολλαπλής παλινδρόμησης, κατασκευάστηκε ένα εμπειρικό στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης της στερεοαπορροής στις ορεινές λεκάνες του Ελληνικού χώρου.

Δεδομένα

Στον πίνακα 2 δίνονται συνοπτικά οι παράμετροι/δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν και ο τρόπος υπολογισμού τους. Κρίνεται σκόπιμο παρακάτω να διευκρινισθεί η χρήση κάποιων απ' τις παραμέτρους αυτές.

Η βάση CORINE δεν είναι η καταλληλότερη για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας (Verstraeten et al., 2003). Στην συγκεκριμένη ανάλυση αυτό που ενδιαφέρει είναι το εάν υφίσταται ή όχι προστατευτική φυτοκάλυψη του εδάφους (contact cover). Γι' αυτούς τους λόγους γίνεται ένας δυαδικός διαχωρισμός: θεωρούνται μόνο οι χρήσεις με τον κωδικό 33 (ελάχιστη βλάστηση), δηλαδή εδάφη γυμνά ή σχεδόν γυμνά από βλάστηση, σαν παράγοντας προς συσχέτιση με την στερεοαπορροή.



Σχήμα 1: Χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των 6 λεκανών: κλίση, μέση ετήσια βροχόπτωση και ποσοστό φλύσχη (ως ο κατ'εξοχήν ευδιάβρωτος σχηματισμός).

Πίνακας 1: Οι θέσεις των στερεοϋδρομετρήσεων που συγκεντρώθηκαν στην έρευνα των Ζαρή & Λυκούδη (2007) και οι εκτιμήσεις της ειδικής στερεοαπορροής σε αυτές. Στον πίνακα δίνονται και οι εκτιμήσεις των Κουτσογιάννη & Ταρλά (1987) για κάποιες από αυτές τις θέσεις. SSY σε $t\ km^{-2}\ y^{-1}$

α/α	Υδρομετρικοί σταθμοί	Ποταμός (Λεκάνη απορροής)	Επιφάνεια (Km ²)	SSY Zarris-Lykoudi	SSY Koutsoyiannis	Παρατηρήσεις
1	Αυλάκι	Αχελώος	1355	1706	-	
2	Πόρος Ρηγαίου	Εύηνος	914	1448	-	
3	Γ. Πλάκας	Άραχθος	970	1249	1570	
4	Γ. Τσίμοβου	Άραχθος	640	1049	891	
5	Γ. Γκόγκου	Αραχθος	203	1592	1176	Π. Καλαρίτικος
6	Γ. Κόνιτσας	Αώος	830	2151	-	
7	Κιοτέκι	Καλαμάς	1481	533	386	
8	Γ. Σουλόπουλο	Καλαμάς	660	280	203	
9	Μ. Ιλαρίονα	Αλιάκμων	5005	415	-	
10	Σιάτιστα	Αλιάκμων	2724	233	84	
11	Γ. Γρεβενών	Αλιάκμων	847	81	-	Π. Βενέτικος

Ο διψήφιος CLC κωδικός 33 περιέχει τους εξής τριψήφιους κωδικούς: κ.331 – παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές, κ.332 – απογυμνωμένοι βράχοι, κ.333 - αραιή βλάστηση. Παρατηρείται-στο GoogleEarth- ότι η εμφάνιση του κ.331 στις λεκάνες, ουσιαστικά υποδεικνύει τις περιοχές αλλουβιακών πλημμυρικών πεδίων των ποταμών. Λαμβάνοντας υπόψη το εύρημα των Ζαρρή-Λυκούδη περί της ισχυρής συσχέτισης μέγιστης ετήσιας πλημμύρας και στερεοαπορροής και θεωρώντας αυτές τις περιοχές σαν πηγές ιζήματος κατά τη διάρκεια μεγάλων πλημμυρικών συμβάντων, δημιουργήθηκε ένας νέος δείκτης για τον οποίο προτείνεται η ονομασία *αλλουβιακή κατάσταση* του ποταμού. Αυτός ο δείκτης είναι είτε το ποσοστό του μήκους του υδατορεύματος που διέρχεται από αλλουβιακές αποθέσεις (κωδικός 331), ή το ποσοστό του κωδικού 331 στην συνολική επιφάνεια της λεκάνης. Στην λιθολογία των λεκανών έγινε η ίδια δυαδική κατηγοριοποίηση: ευδιάβρωτοι – μη ευδιάβρωτοι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπου σαν ευδιάβρωτος θεωρήθηκε ο φλύσχης.

Πίνακας 2: Οι παράμετροι - δείκτες των λεκανών που συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν ως ερμηνευτικές μεταβλητές.

Κατηγορία	Παράμετροι	Πηγή - Παρατηρήσεις
Τοπογραφία ανάγλυφο	- Κλίση λεκάνης, κλίση κύριου ρεύματος, κλίση κυρίου ρεύματος κοντά στο σημείο μέτρησης, Relief, reliefratio.	Υπολογίστηκαν σε περιβάλλον ArcGIS σαν %. (DEM 25m.)
Μορφομετρία τοπολογία	- Εμβαδόν λεκάνης, περίμετρος λεκάνης, μέγιστο υψόμετρο λεκάνης, υψόμετρο της εξόδου της λεκάνης, συνολικό μήκος των κοιτών του υδρογραφικού δικτύου. Δείκτες: κυκλικότητας λεκάνης, επιμήκυνσης λεκάνης, συγκέντρωσης, αναγλύφου, τραχύτητας λεκάνης. Λόγοι διακλάδωσης Horton	Υπολογίστηκαν από το r.basin του λογισμικού GRASS(DiLeoM., DiStefano, 2013)
Υδρογραφική Υφή	Υδρογραφική συχνότητα, υδρογραφική πυκνότητα	Υπολογίστηκαν με βάση τα στοιχεία του ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ (ψηφιοποιημένα ρεύματα στο 1:50,000)
Χρήση – κάλυψη γής	Ποσοστό κατηγορίας 33 στην λεκάνη, αλλουβιακή κατάσταση (Ποσοστό κατηγορίας 331 στην λεκάνη)	Πηγή: Corine Land Cover, 2006 (CLC) Διψήφιος + Τριψήφιος κωδικός
Γεωλογία Λιθολογία	- Ποσοστό φλύσχη στην λεκάνη	Πηγή: Χάρτες του ΙΓΜΕ 1:50,000 – προηγούμενες μελέτες
«Τεκτονισμός»	Δείκτης Συχνότητας Κατολισθήσεων, Πυκνότητα ρηγμάτων (Συνολικά μήκη ρηγμάτων -km/ επιφάνεια λεκάνης -km ²)	Πηγές: Χάρτες κατολισθήσεων(Koukis et. al, 2006)+ δεδομένα ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ
Βροχοπτώσεις	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	Πηγή: Διαχειριστικές μελέτες, 2006. Μέθοδος: πολύγωνα Thiessen
USLE factors	R USLE, LS USLE	Πηγή: European Soil Data Center – RUSLE 2015 (Panagos et al., 2015)

Ανάλυση και αποτελέσματα

Η ανάλυση έγινε σε δύο στάδια: Πρώτα αναλύθηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ των ερμηνευτικών μεταβλητών προκειμένου να εντοπισθούν οι κύριοι παράγοντες ελέγχου και κατόπιν αναζητήθηκαν κατάλληλα γραμμικά μοντέλα, - σχέσεις πολλαπλής παλινδρόμησης-, για την κατασκευή και στατιστική εκτίμηση των εξισώσεων.

Πίνακας 3: τιμές των κύριων ερμηνευτικών μεταβλητών για τις 11 θέσεις μετρήσεων σε 6 λεκάνες απορροής

α/α	Θέση	A	SSY	R	P	LS	LCov	Lith	DD	Allv	Shpe	FIt	SLope	LFI
1	Αυλάκι	1355	1705	988	1314	8.40	0.59	0.63	3.02	0.15	13.29	0.24	46.50	4.70
2	Πόρος Ρηγ.	914	1447	1354	1198	7.96	0.30	0.48	3.15	0.23	11.35	0.21	44.60	4.60
3	Γ.Τσιμοβο	640	1049	1207	1307	6.01	0.38	0.84	3.63	0.01	13.10	0.37	33.50	3.60
4	Γ.Γκόγκου	203	1592	939	1753	8.69	0.91	0.59	2.97	0.16	5.71	0.26	45.40	2.70
5	Γ.Πλάκας	970	1249	1256	1400	6.58	0.51	0.71	3.46	0.01	13.10	0.54	36.80	3.50
6	Σουλόπ/λο	660	279	1749	1270	3.53	0.44	0.11	2.29	0.01	14.08	0.11	21.80	2.30
7	Κιοτέκι	1481	532	1838	1297	4.51	0.41	0.23	2.19	0.01	14.08	0.09	26.40	2.20
8	Κόνιτσα	706	2150	721	1215	7.27	0.44	0.42	2.90	0.04	8.66	0.07	40.90	2.00
9	Βενέτικος	847	81	682	782	5.49	0.42	0.13	6.46	0.01	8.66	0.08	29.90	1.00
10	Σιάτιστα	2724	233	651	687	3.74	0.32	0.02	5.62	0.04	21.95	0.09	20.10	1.40
11	Μ.Ιλαρ/ος	5005	415	650	719	3.59	0.32	0.04	6.08	0.03	24.15	0.06	19.60	1.40

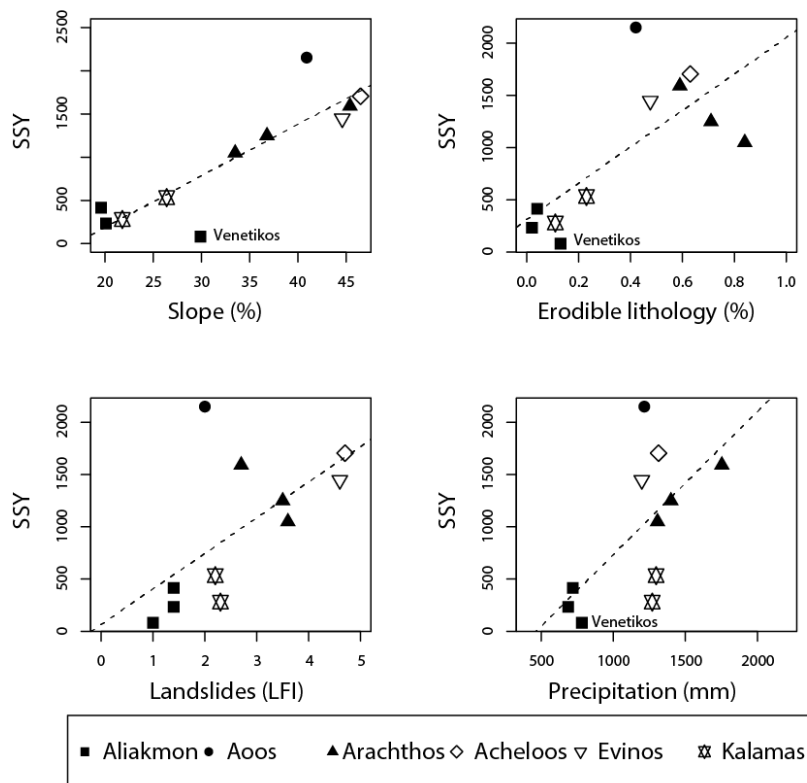
A:επιφάνεια της λεκάνης (km^2), **SSY:** η ειδική στερεοαπορροή, ($\text{t km}^{-2} \text{y}^{-1}$), **R** παράγοντας διαβρωσιμότητας της βροχής της **USLE** ($\text{Mj mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$), **P:** μέση ετήσια βροχόπτωση (mm). **LS** ο τοπογραφικός παράγοντας της **USLE**, αδιάστατος, **LCov** το κλάσμα της χρήσης CORINE-33 στην λεκάνη, **Lith** το κλάσμα των ευδιάβρωτων στη λεκάνη (εδώ το κλάσμα του φλύσχη), **DD:** υδρογραφική πυκνότητα, **Allv** το κλάσμα της χρήσης CORINE-333 στην λεκάνη, **Shpe** είναι ο form factor Horton, **FIt** η πυκνότητα των ρηγμάτων (km^{-1}), **Slope** η κλίση (%), **LFI** είναι ο δείκτης συχνότητας των κατολισθήσεων (αριθμός κατολισθήσεων ανά 100km^2).

Η πιο ισχυρή θετική συσχέτιση της ειδικής στερεοαπορροής είναι με την κλίση καθώς και με τον «τοπογραφικό» όρο μήκους πλαγιάς LS (Length Slope) της USLE (πίνακας 4). Οι δύο αυτές μεταβλητές είναι και μεταξύ τους πολύ ισχυρά συσχετισμένες ($r=0.99$). Η ειδική στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται ισχυρά με το κλάσμα ευδιάβρωτης λιθολογίας στην λεκάνη και, κάπως λιγότερο, με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Με την κάλυψη γης – το ποσοστό αραιής/καθόλου βλάστησης στην λεκάνη- η ειδική στερεοαπορροή εμφανίζει μια μετρίως θετική συσχέτιση. Η αλλουβιακή κατάσταση του ποταμού παρουσιάζει ισχυρότερη θετική συσχέτιση αν και υπάρχουν πολλές μηδενικές τιμές οι οποίες προφανώς οφείλονται στην ανάλυση του CORINE (100m). Η ειδική στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται με την μέση ετήσια βροχόπτωση, επηρεάζοντας κυρίως τις λεκάνες με ευδιάβρωτες λιθολογίες ή/και μεγαλύτερες κλίσεις. Παρατηρείται μικρή συσχέτιση με την διαβρωτικότητα της βροχής R της USLE ($r=0.49$) ενώ το σχήμα λεκάνης που ευνοεί την στερεοαπορροή είναι το επιμήκες. Οι παράγοντες του «τεκτονισμού» και ειδικότερα ο δείκτης των κατολισθήσεων εμφανίζεται, όπως είναι αναμενόμενο, να ευνοεί την στερεοαπορροή ενώ η πυκνότητα των ρηγμάτων δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση. Αυτό μπορεί και να οφείλεται στην ποιότητα των δεδομένων (ακρίβεια χαρτογράφησης ρηγμάτων, ενημέρωση της βάσης, ενεργά – μη ενεργά, κ.λπ).

Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η συνήθης τεχνική της βηματικής παλινδρόμησης (stepwise regression) σε κατάλληλα πακέτα της γλώσσας R (R Development CoreTeam, 2013).

Πίνακας 4: Συντελεστές συσχέτισης των κύριων ερμηνευτικών μεταβλητών. Μετοπισμένα και υπογραμμισμένα νούμερα είναι οι συσχετίσεις με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%.

	SSY	R.	P	LS.	LCov	Lith	DD	Allv	Shpe	Flt	Slope	LFI
SSY	1.00	-0.09	<u>0.63</u>	<u>0.86</u>	0.44	<u>0.72</u>	-0.54	0.55	-0.53	0.38	<u>0.88</u>	<u>0.62</u>
R		1.00	0.49	-0.12	-0.04	0.15	-0.74	-0.04	-0.14	0.20	-0.04	0.37
P			1.00	0.65	0.74	0.72	-0.82	0.35	-0.67	0.56	0.67	0.58
LS				1.00	0.59	0.75	-0.39	0.72	-0.72	0.45	<u>0.99</u>	0.67
LCo					1.00	0.42	-0.35	0.33	-0.59	0.32	0.55	0.18
Lith						1.00	-0.48	0.31	-0.51	<u>0.83</u>	<u>0.76</u>	<u>0.77</u>
DD							1.00	-0.25	0.45	-0.28	-0.45	-0.57
Allv								1.00	-0.31	0.09	0.71	0.63
Shp									1.00	-0.24	-0.73	-0.27
Flt										1.00	0.45	0.63
Slo											1.00	0.72
LFI												1.00



Σχήμα 2: Διαγράμματα διασποράς της ειδικής στερεοαπορροής με: Κλίση, Ευδιάβρωτη λιθολογία, Κατολισθήσεις και Βροχόπτωση. Ο ποταμός Αώος φαίνεται να αφίσταται από όλες σχεδόν τις τάσεις, καθώς και ο Βενέτικος (παραπόταμος του Αλιάκμονα). Τα δύο αυτά ποτάμια αντιπροσωπεύουν την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή αντίστοιχα.

Η κλίση της λεκάνης συσχετίζεται με την ειδική στερεοαπορροή με την επόμενη εξίσωση:

$$SSY = -1005,77 + 59,63 * SL \quad (1)$$

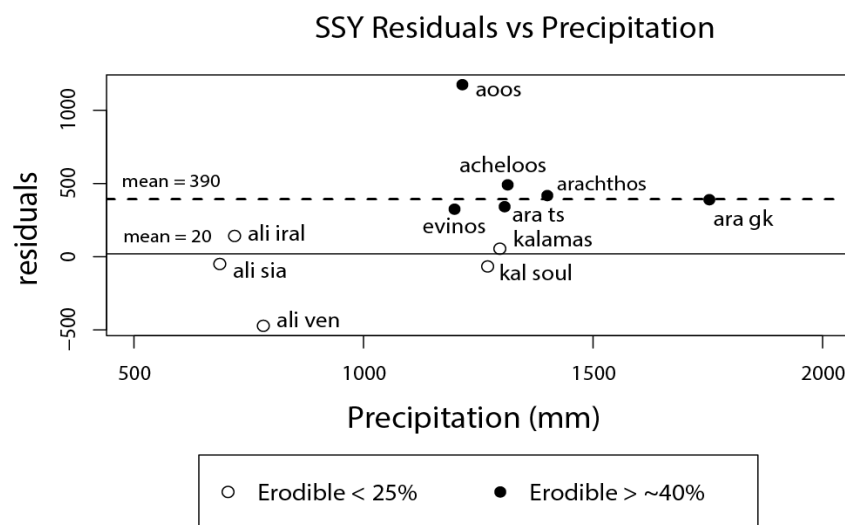
για κλίσεις >20%, με $R^2 = 0.77$ και p-value: 0.000377.

Για την εξαγωγή ενός μοντέλου που να περιέχει μόνο τις τρεις σημαντικότερες αναγνωρισμένες μεταβλητές: κλίση, βροχόπτωση και λιθολογία, μπορούν να γίνουν δύο βήματα (δουλεύοντας με τους λογάριθμους των μεταβλητών):

1. Εξάγεται η ειδική στερεοαπορροή από την κλίση και την βροχόπτωση. Θεωρείται ότι η εξίσωση αυτή είναι κατάλληλη για τις «δυσδιάβρωτες λιθολογίες». Πράγματι, ο μέσος όρος των υπολοίπων αυτής της εξίσωσης για τις λεκάνες με ποσοστό ευδιάβρωτων γεωλογικών σχηματισμών μικρότερο από ~25%, είναι κοντά στο μηδέν (Σχήμα 3). Η εξίσωση αυτή είναι

$$SSY = SL^{1.65}P^{0.11} \quad (2)$$

Προκύπτει όμως (για τις λεκάνες με ευδιάβρωτους σχηματισμούς >~40%), ένα υπόλοιπο ειδικής στερεοαπορροής (SSY_residual), με μέση τιμή περίπου 400.



Σχήμα 3: Τα υπόλοιπα μετά την πρόβλεψή τους με την σχέση (2), έναντι της βροχόπτωσης. Οι μέσες τιμές υπολογίστηκαν χωρίς τους ποταμούς Αώο και Βενέτικο. Για την ίδια βροχόπτωση (~1300-1500 mm) οι λεκάνες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στην στερεοαπορροή τους και αυτό συναρτάται επίσης με τη λιθολογία τους (αλλά και τις μορφολογικές κλίσεις).

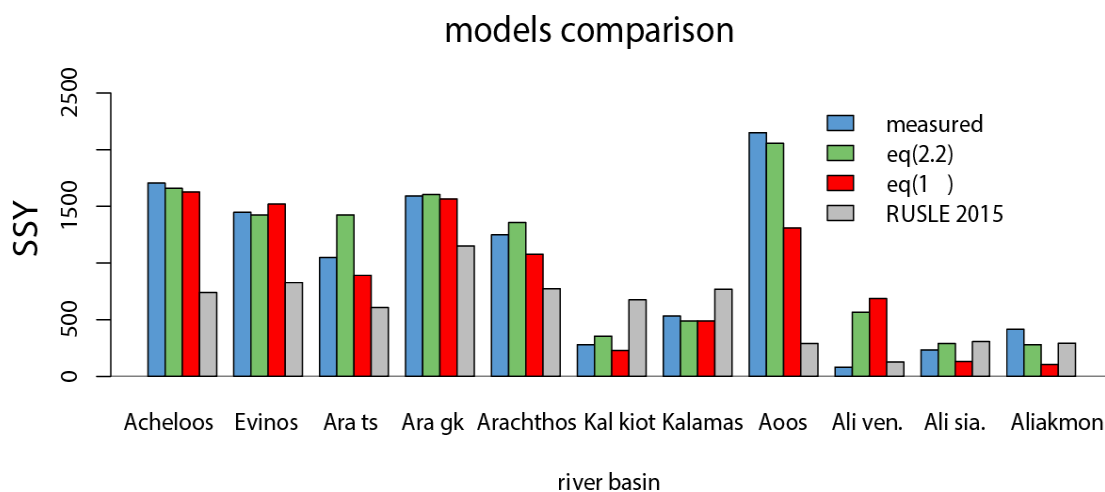
2. Το υπόλοιπο αυτό ερμηνεύεται με την παρουσία ευδιάβρωτων γεωλογικών σχηματισμών στην λεκάνη και αθροίζεται στην προηγούμενη σχέση. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:
 - a. Θεωρώντας τους ευδιάβρωτους σχηματισμούς σαν περίπτωση (ή στάθμη-factor) και προσθέτοντας τη μέση τιμή. Η εξίσωση αυτή είναι η εξής:

$$SSY = SL^{1.65}P^{0.11} + 390 \quad (2.1)$$

- b. Θεωρώντας τους ευδιάβρωτους σχηματισμούς σαν συνεχή μεταβλητή με εκθετική αύξηση. Ο προσθετικός όρος είναι η γραμμή τάσης σχέσης δύναμης σε διάγραμμα ποσοστού ευδιάβρωτων σχηματισμών - SSY_residual (με τον Αώο 100% ευδιάβρωτο).

$$SSY = SL^{1.65}P^{0.11} + 80 * e^{2.58 * Lith} \quad (2.2)$$

Οι δύο προηγούμενες εξισώσεις, 2.1 και 2.2, έχουν R^2 , 0.83 και 0.93 αντίστοιχα.



Σχήμα 4: Σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρημένες τιμές. Οι εκτιμήσεις της RUSLE 2015 υποτιμούν τις τιμές της στερεοαπορροής σε όλα τα ποτάμια πλην του Αλιάκμονα.

Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή προτείνεται ένα εμπειρικό στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης της στερεοαπορροής για τις ορεινές λεκάνες του Ελληνικού χώρου διερευνώντας τις συσχετίσεις μετρήσιμης ειδικής στερεοαπορροής 6 ποταμών της Δυτικής και Βόρειας Ελλάδας με παραμέτρους των λεκανών απορροής τους.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την διεθνή (και ελληνική) εμπειρία που αναγνωρίζει το σημαντικό ρόλο των χαρακτηριστικών του αναγλύφου της λεκάνης απορροής και κατόπιν της λιθολογίας στην στερεοαπορροή. Λαμβάνοντας σαν μοναδική παράμετρο την μορφολογική κλίση της λεκάνης απορροής μπορεί κανείς να πλησιάσει αρκετά τις μετρημένες τιμές για τα υδρογραφικά δίκτυα που μελετήθηκαν (Σχ. 4). Το προτεινόμενο μοντέλο ωστόσο, επιτυγχάνει καλύτερη προβλεπτικότητα στο υπάρχον δείγμα, και προσφέρει μια ορισμένη ερμηνεία του φαινομένου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της προτεινόμενης εξίσωσης είναι ότι μπορεί να δώσει κατώτερα και ανώτερα όρια (χωρίς ή με τον προσθετικό όρο της λιθολογίας) της στερεοαπορροής.

Οι εκτιμήσεις της RUSLE 2015 φαίνεται ότι υποτιμούν συστηματικά τις μετρημένες τιμές (και μάλιστα, καθώς πρόκειται περί gross και όχι net erosion, θα πρέπει να θεωρούνται ακόμα μικρότερες, κατά έναν συντελεστή στερεοαπορροής). Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην υποτίμηση της σημασίας της λιθολογίας (στην οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η παρουσία γεωμορφών που οφείλονται στη διάβρωση και μετά το σχηματισμό τους ευνοούν σημαντικά την ενίσχυσή της όπως είναι τα Badlands και τα gullies) από την RUSLE. Η περίπτωση του Αώου (που είναι ένα μέγιστο που δεν ερμηνεύεται από κάποια άλλη παράμετρο: κλίση, λιθολογία, βροχόπτωση), είναι πιθανόν να οφείλεται ακριβώς στην ύπαρξη Badlands (Woodward, 1995). Έτσι, και η δική μας υπόθεση (περί του ~100% ευδιάβρωτου της λεκάνης αυτής) δεν είναι εξ'ολοκλήρου αυθαίρετη. Η RUSLE, από την άλλη, φαίνεται να προβλέπει καλύτερα τη στερεοαπορροή ποταμών με παρουσία δυσδιάβρωτων γεωλογικών σχηματισμών (όπως ο Αλιάκμων).

Βιβλιογραφία

- Di Leo M., Di Stefano M., 2013. An Open-Source Approach for Catchment's Physiographic Characterization, In: Proceedings of AGU Fall Meeting, S.Francisco, CA, USA.
- Karymbalis, E., Tegou, M and Tsalkitzi, O. 2001. Study of Delta formation factors at central Greece (inGreek). Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol.XXXIV/1, 381-388.
- Koukis G, Sabatakakis N, Nikolaou N, Loupasakis C., 2005. «Landslide hazard zonation in Greece». In: Sassa K, Fukuoka H, Wang F, Wang G (eds) Landslides risk analysis and sustainable disaster management, part IV. Springer, Berlin. pp 291–296. doi: 10.1007/3-540-28680-2_37
- Koutsoyiannis, D., 2000. Broken line smoothing: a simple method for interpolating and smoothing data series, Environmental Modelling & Software, 15, 139-149.
- Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella I., Alewell C. , 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, Environmental Science & Policy 54 (2015) 438–447
- Poulos, S.E, Collins, M and Evans, G, 1996. Water-sediment fluxes from Greek rivers, southeastern Alpine Europe: annual yields, seasonal variability, delta formation and human impact. Zeitschrift fur geomorphologie, N.F.,40/2,243-261.
- R Development Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Verstraeten G., Poesen J., de Vente J., Koninckx X.,2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. Geomorphology 50 (2003) 327–348.
- Woodward, J.C. 1995. Patterns of Erosion and Suspended Sediment Yield in Mediterranean River Basins In: IDL Foster and BW Webb (Ed.), Sediment and Water Quality in River Catchments. John Willey & Sons Ltd.
- Zarris, D., and Koutsoyiannis, D. 2005. Evaluating sediment yield estimations from large-scale hydrologic systems using the rating curve concept, RMZ-Materials and Geoenvironment, Vol. 52, No. 1, 157-159.
- Zarris D., Lykoudi E. and Panagoulia D. 2007. Sediment yield estimates in North-western Greece and analyses with hydrologic and geomorphologic factors. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII, 2007 Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May,2007

A MODEL FOR SEDIMENT YIELD IN MOUNTAINOUS GREEK CATCHMENTS

Abstract

In this study we explore the controls over sediment yield in 11 stations situated along 6 major rivers of Western – Northern Greece (Arachthos, Achelooos, Evinos, Aoos, Kalamas and Aliakmon). Measurements of area specific sediment yield (SSY in $t\ km^{-2}y^{-1}$) for these stations come from reanalysis of existing records, by adaptation of a broken rating curve concept ($80 - 2150\ tkm^{-2}y^{-1}$). We study the correlations with ca.35 topographic, morphometric, textural, physiographic, tectonic, geological-lithological, land cover and climatic (precipitation) characteristics of the basins, along with USLE factors (LS USLE, R USLE), from the maps of the European Soil Data Center. We find the principal controls to be the following: slope, lithology and precipitation. With the use of stepwise multiple regression analysis we build a model that employs three variables: Slope (in percent), Precipitation (mean annual, in mm) and Lithology (as percentage of the easily erodible geological formations within the catchment, mainly flysch), where the contribution of lithology is an additive term to the slope-precipitation, kind of stream power, relationship. The validation of the proposed model using the results of the sediment yield measurements has good statistics ($R^2=0.93$).

KEY WORDS:Sediment transport controls, models, mountainous basins, Greece