

## **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΟΡΕΙΝΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ RUSLE ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ**

**Στεφανίδης Στέφανος<sup>\*</sup>, Χατζηχριστάκη Χρυσούλα, Στεφανίδης Παναγιώτης**

Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων, Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος,  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη,

<sup>\*</sup>[ststefanid@gmail.com](mailto:ststefanid@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος RUSLE για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου του Νομού Τρικάλων χρησιμοποιώντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Για τον ακριβέστερο και ταχύτερο υπολογισμό της μεθόδου αναπτύχθηκε εργαλείο στο περιβάλλον Model Builder, μία εφαρμογή του ArcGIS που επιτρέπει τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μαθηματικών μοντέλων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από τη χρήση του Model Builder για την εφαρμογή του μοντέλου της RUSLE είναι ότι επιταχύνονται οι υπολογισμοί, μειώνεται ο χρόνος και το κόστος εργασίας.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** διάβρωση, λεκάνη απορροής, GIS, Model Builder, RUSLE

## **ESTIMATION OF SOIL EROSION IN MOUNTAINOUS WATERSHEDS WITH THE COMBINED USE OF RUSLE MODEL AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS**

**Stefanidis Stefanos<sup>\*</sup>, Chatzichristaki Chrysoula, Stefanidis Panagiotis**

Laboratory of Mountainous Water Management and Control, Faculty of Forestry & Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki

<sup>\*</sup>[ststefanid@gmail.com](mailto:ststefanid@gmail.com)

### **ABSTRACT**

This paper deals with the implementation of RUSLE method for the estimation of the mean annual soil erosion in Klinovitikos watershed at Trikala Prefecture using Geographical Information Systems. For more accurate and faster results, a GIS tool was developed in Model Builder environment, an application that allows the creation, editing and management of mathematical models. The main advantages of using Model Builder so as to estimate erosion with the RUSLE method is that accelerates calculation and reduces cost and time.

**KEY WORDS:** erosion, watershed, GIS, Model Builder, RUSLE

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των χειμαρρικών ρευμάτων είναι ότι αποσπών στερεά υλικά από τον χώρο των λεκανών απορροής, τα μεταφέρουν και στη συνέχεια τα αποθέτουν στις πεδινές περιοχές (Kotoulas, 1984). Η διάβρωση των ορεινών λεκανών απορροής και η αντίστοιχα προκαλούμενη υποβάθμιση αποτελούν σπουδαίο μορφογενετικό παράγοντα στην επιφάνεια του στερεού φλοιού της γης (Μαργαρόπουλος, 1963).

Μεγάλο ενδιαφέρον από χειμαρρική άποψη έχει η ποσότητα των φερτών υλικών, που παράγεται ετησίως και κατά μέσο όρο σε κάθε λεκάνη απορροής. Ο όγκος των παραγόμενων υλικών, αναγόμενος στην επιφάνεια της λεκάνης, ως ιδεατό αποσπώμενο στρώμα γης με ομοιόμορφο πάχος, αποτελεί την υποβάθμιση της λεκάνης. Η αποτροπή της διάβρωσης και της υποβάθμισης, καθώς και η διευθέτηση των χειμάρρων, αποτελεί ένα βασικό έργο υποδομής (Zlatic et al., 2010, Myronidis et al., 2010a). Για να ευδοκιμήσει, όμως, ένα τέτοιο έργο θα πρέπει να γίνει γνωστό το μέγεθος της διάβρωσης, ώστε να επιλεγεί και να εφαρμοστεί το κατάλληλο σύστημα ελέγχου της διάβρωσης και διευθέτησης των χειμάρρων (Myronidis and Arabatzis, 2009, Myronidis et al., 2010b, Χατζηχριστάκη κ.ά., 2013, Vulević et al., 2015).

Η εκτίμηση της διάβρωσης με εργασίες υπαίθρου είναι μία χρονοβόρα διαδικασία που δύσκολα μπορεί να καλύψει το σύνολο μίας λεκάνης απορροής, αλλά περιορίζεται σε πειραματικές επιφάνειες της λεκάνης (Stefanidis et al., 2002, Verstraeten and Poesen, 2002, Vanmaercke et al., 2012). Για αυτούς ακριβώς τους λόγους, η ανάπτυξη μεθόδων σχετικά με την πρόβλεψη της διάβρωσης και της υποβάθμισης του εδάφους είναι πλούσια τις τελευταίες δεκαετίες.

Τα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης χρησιμοποιούν μαθηματικές εξισώσεις για να εκφράσουν τη σχέση μεταξύ παραγόντων και διεργασιών διάβρωσης. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν την τοπογραφία, τις μετεωρολογικές μεταβλητές, εδαφικές ιδιότητες και χρήσεις γης (Κουράκλη και Στεφανίδης, 2011). Γενικά, τα μοντέλα ανήκουν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις φυσικές διεργασίες που προσομοιώνουν και τις εξισώσεις που χρησιμοποιούν. Αυτές οι κατηγορίες είναι εμπειρικά, στοχαστικά και προσδιοριστικά μοντέλα. Τα εμπειρικά μοντέλα είναι τα απλούστερα, βασίζονται σε αναλύσεις πειραμάτων υπαίθρου και απαιτούν τα λιγότερα δεδομένα. Τα σπουδαιότερα εμπειρικά μοντέλα είναι της USLE (Wischmeier and Smith, 1978, RUSLE (Renard et al., 1991), RMMF (Morgan, 2001) και Gavrilovič (1972). Σε ό,τι αφορά τα στοχαστικά μοντέλα, είναι τοποθετημένα ανάμεσα στα εμπειρικά και τα προσδιοριστικά και στοχεύουν στην προσομοίωση των διαδικασιών της διάβρωσης, χρησιμοποιώντας και εμπειρικές σχέσεις. Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούν, μεταξύ άλλων, την έννοια της πιθανότητας, των χρονοσειρών και της αυτοσυσχέτισης, καθώς και τη μέθοδο της παλινδρόμησης και την έννοια του συντελεστή συσχέτισης και του συντελεστή προσδιορισμού. Τα πιο διαδεδομένα από αυτά είναι τα AGNPS (Young et al., 1989, SWAT (Arnold, 1996) και LASCAM (Viney and Sivapalan, 1999). Τέλος, τα προσδιοριστικά μοντέλα προσομοιώνουν την εδαφική διάβρωση χρησιμοποιώντας εξισώσεις μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας, με σημαντικότερα τα ANSWERS (Beasley et al., 1980), CREAMS (Knisel, 1995), KINEROS2 (Smith et al., 1995), EUROSEM (Morgan et al., 1998), EROSION-3D (von Werner, 2000), EPIC (Sharpley and Williams, 1990), WEPP (Nearing et al., 1989) and PESERA (Kirkby et al., 2000).

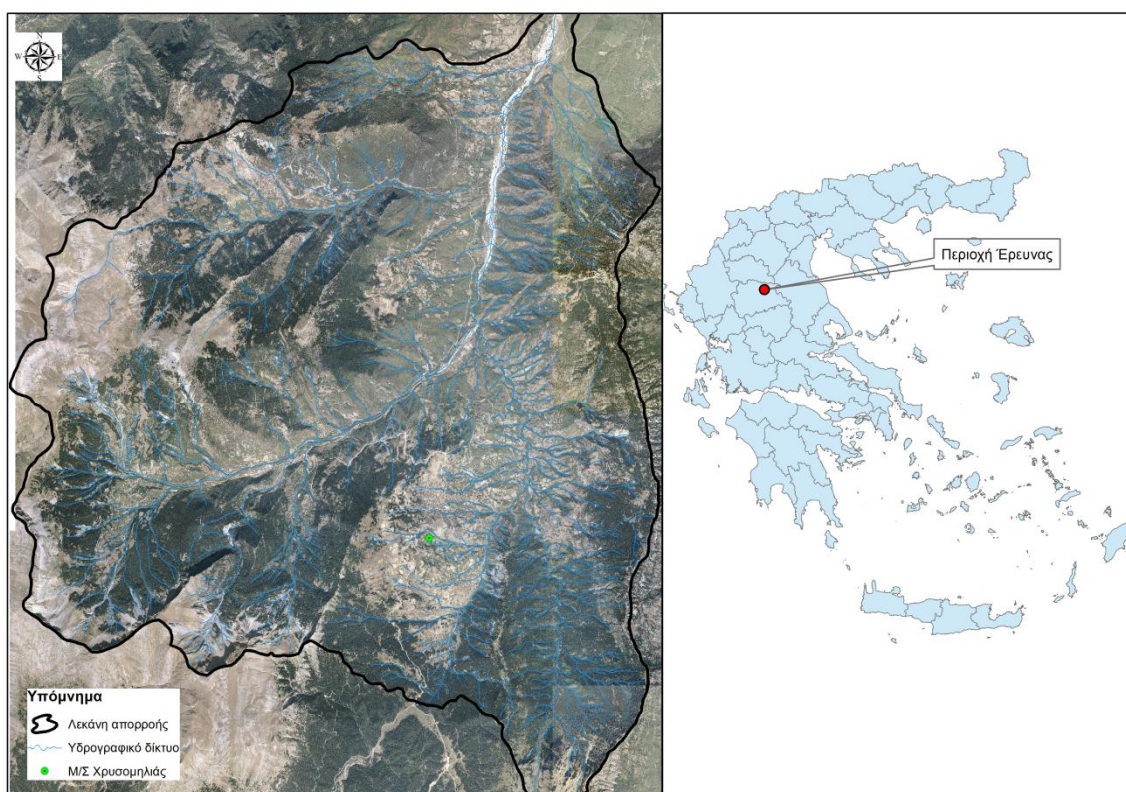
Το μοντέλο USLE είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπειρικό μοντέλο εδαφικής διάβρωσης. Αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ για την εκτίμηση του ρυθμού της επιφανειακής και της αυλακωτής διάβρωσης σε γεωργικά καλλιεργούμενες εκτάσεις. Έχει επικρατήσει ως μία από τις πιο πρακτικές μεθόδους για την εκτίμηση της πιθανής διάβρωσης τους εδάφους σε όλο τον κόσμο λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε υπολογισμούς. Παρά την απλότητα στην εφαρμογή, παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς και έλλειψη δεδομένων σε χώρες εκτός ΗΠΑ (Kinnell, 2010).

Για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες τροποποιήσεις στον αρχικό σχεδιασμό του μοντέλου. Μία από αυτές είναι η RUSLE, η οποία διατηρεί τη μορφή της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας, αλλά εμφανίζει διαφοροποιήσεις στον υπολογισμό των επιμέρους παραμέτρων. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αναθεωρημένης USLE (RUSLE) είναι ότι ο παράγοντας της φυτοκάλυψης μπορεί να εκτιμηθεί απευθείας από τις χρήσεις γης χωρίς να χρειάζονται στοιχεία από πειραματικές επιφάνειες, καθώς και ότι εφαρμόζεται πέραν από γεωργικές περιοχές και σε ορεινές λεκάνες απορροής (Tanyas et al., 2015, Zini et al., 2015, Li et al., 2016). Έρευνες σε ορεινές λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου έχουν δείξει ότι η χρήση του μοντέλου RUSLE σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα (Ξανθάκης, 2011, Αναστασίου, 2013, Efthimiou et al., 2016).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη εργαλείου για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση RUSLE σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην ορεινή λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου, η οποία έχει εμβαδόν 171,09 km<sup>2</sup>. Αποτελεί συμβάλλοντα του Πηνειού ποταμού, που είναι το τρίτο μεγαλύτερο ποτάμι της Ελλάδος, και βρίσκεται στην περιοχή της Καλαμπάκας του Νομού Τρικάλων (Σχήμα 1). Η περιοχή ανήκει στο δίκτυο προστασίας Natura 2000 και έχει χαρακτηριστεί ως Τόπος Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ), σύμφωνα με την οδηγία 92/43/ΕΟΚ.



Σχήμα 1: Περιοχή έρευνας.

Το κλίμα της περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταβατικό (μεσογειακό-μεσευρωπαϊκό) με πολύομβρο και ψυχρό χειμώνα και σχετικά θερμό και ξηρό θέρος. Εντός της λεκάνης απορροής του χειμάρρου, σε υψόμετρο 940 m, βρίσκεται ο μετεωρολογικός σταθμός της Χρυσομηλιάς, για τον οποίον υπάρχουν μακροχρόνιες χρονοσειρές

βροχόπτωσης για το χρονικό διάστημα 1960-2011. Με βάση τα στοιχεία του σταθμού, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται σε 1074 mm. Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως ορεινή με μέσο υψόμετρο 1112 m (μέγιστο 2204 m), μέση κλίση λεκάνης απορροής 48,2% και μέση κλίση κεντρικής κοίτης 6,45%. Σε ό,τι αφορά τη βλάστηση, παρατηρήθηκαν δασοσκεπείς εκτάσεις ελάτης, δρυός και οξιάς, ενώ η γεωλογική συγκρότηση της περιοχής αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο και φλύσχη.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

#### 3.1 MONTELO RUSLE

Η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικών Απωλειών (RUSLE) υπολογίζει το μέγεθος της αναμενόμενης εδαφικής απώλειας που προέρχεται από αυλακωτή και επιφανειακή διάβρωση. Βασίζεται σε πέντε παράγοντες που καθορίζουν τον ρυθμό διάβρωσης (διαβρωτικότητα βροχής, διαβρωσιμότητα εδάφους, ανάγλυφο, φυτοκάλυψη και έργα ελέγχου της διάβρωσης), σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (3.1)$$

A: υπολογισμένη μέση ετήσια γενική εδαφική διάβρωση (tn/ha/έτος). Το μέγεθός της εκτιμήθηκε από τον συνδυασμό των επιμέρους παραγόντων.

R: συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής ( $MJ * ha^{-1} * h^{-1} * year^{-1}$ ). Ο συντελεστής ορίζεται από τη σχέση

$$\sum_{j=1}^n 60 * e * P * I_{30} \quad (3.2)$$

όπου P το ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm),  $I_{30}$  η μέγιστη ένταση της βροχής στο χρονικό διάστημα των 30 min, n ο ετήσιος αριθμός βροχοπτώσεων και e η κινητική ενέργεια που εκφράζεται από τη σχέση

$$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-3i)] \quad (3.3)$$

και i η μέση ένταση βροχής (mm/h). Ο προσδιορισμός του  $I_{30}$  απαιτεί ετήσια βροχομετρικά δεδομένα βήματος 30 λεπτών. Η πληροφορία αυτή δεν ήταν διαθέσιμη στους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής έρευνας. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που αναπτύχθηκε στη Γερμανία (Schwertmann et al., 1990) και έχει χρησιμοποιηθεί κατ' ανάγκη και για ελληνικές συνθήκες (Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995):

$$R = 0,83 * N - 17,7 \quad (3.4)$$

όπου N η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

K: συντελεστής για τη διαβρωσιμότητα του εδάφους που κυμαίνεται από 0,2 έως 0,6 ( $tn * ha * h * ha^{-1} * MJ^{-1} * mm^{-1}$ ). Προσδιορίζεται από πέντε ιδιότητες του εδάφους: την περιεκτικότητα σε ιλύ και λεπτή άμμο, σε μέση και χονδρή άμμο, σε οργανική ύλη, τον τύπο της εδαφικής δομής και τον βαθμό διαπερατότητας. Το K ορίζεται με τη χρήση νομογραφημάτων ή εξισώσεων. Οι τιμές που προκύπτουν από τα νομογραφήματα, είναι εκφρασμένες σε διαφορετικές μονάδες από αυτές του παράγοντα K και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να διαιρούνται με 10.

LS: συντελεστής αναγλύφου που αναπαριστά την επίδραση του αναγλύφου και συγκεκριμένα του μήκους της κλιτύς (L) και της κλίσης της κλιτύς (S). Το μήκος κλιτύς ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση από το σημείο έναρξης της απορροής μέχρι το σημείο που είτε η κλίση μειώνεται αρκετά, ώστε να ξεκινήσει η απόθεση των φερτών υλικών, είτε η απορροή συγκεντρώνεται σε κάποιο ρέμα. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του μήκους κλιτύς ανάλογα με την επί τοις εκατό κλίση της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται παρακάτω (McCool et al., 1987):

$$S = 10,8 * \sin \theta + 0,03 \quad (\text{για κλίσεις} < 9\%) \quad (3.5)$$

$$S = 16,8 * \sin \theta - 0,5 \quad (\text{για κλίσεις} \geq 9\%) \quad (3.6)$$

όπου  $\theta$  είναι η κλίση σε μοίρες.

Το μήκος κλιτύς (L) δίνεται από την εξίσωση:

$$L = (A / 22,13)^m \quad (3.7)$$

όπου A είναι η έκταση της επιφάνειας, για την οποία υπολογίζεται το μήκος κλιτύς, ενώ ο αριθμός 22,13 εκφράζει το μήκος της πειραματικής επιφάνειας του μοντέλου RUSLE. Τέλος, το m ορίζεται από την εξίσωση:

$$m = J^3(1 + J^3) \quad (3.8)$$

όπου:

$$J = (\sin \theta / 0,0896) / (3(\sin \theta)^{0,8} + 0,56) \quad (3.9)$$

με το  $\theta$  να είναι η κλίση σε μοίρες.

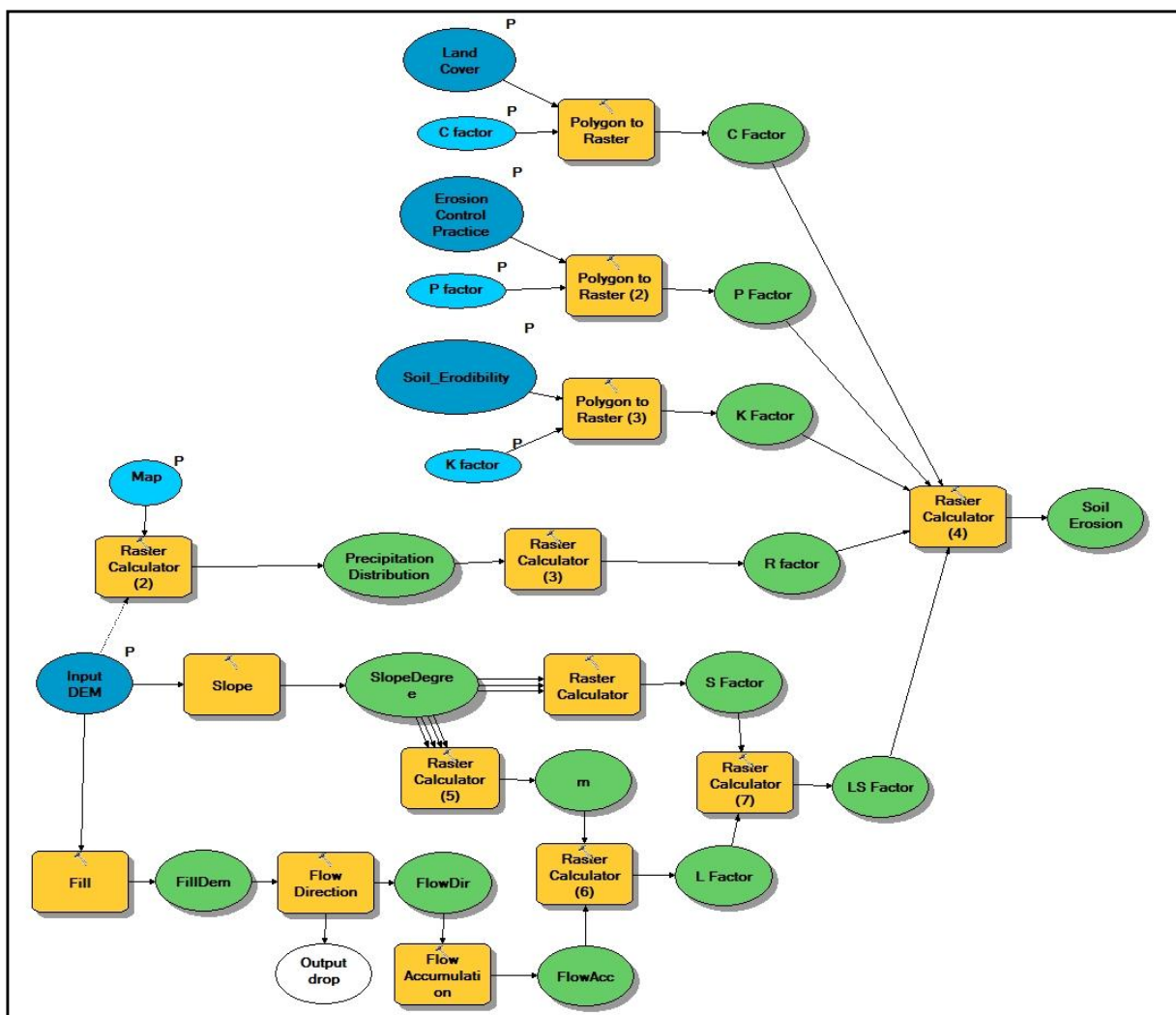
C: συντελεστής για την κάλυψη με βλάστηση και την διαχειριστική πρακτική της επιφάνειας (χωρίς μονάδα μέτρησης, κυμαίνεται από 0 έως 1). Ο παράγοντας αυτός εκτιμά την επιρροή των τεχνικών καλλιέργειας και της διαχειριστικής πρακτικής στον ρυθμό διάβρωσης του εδάφους. Στο μοντέλο της RUSLE υπολογίζεται ως συνάρτηση του ρυθμού εδαφικής απώλειας υπό συγκεκριμένες συνθήκες φυτοκάλυψης, επιφανειακής κάλυψης, εδαφικής τραχύτητας και εδαφικής υγρασίας. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή έγινε φωτοερμηνεία πρόσφατων ορθοφωτοχαρτών, έτους λήψης 2007 για την περιοχή μελέτης.

P: συντελεστής για την επίδραση των διαχειριστικών πρακτικών και έργων κατά της διάβρωσης (χωρίς μονάδα μέτρησης, κυμαίνεται από 0 έως 1). Ορίζεται ως η αναλογία της εδαφικής απώλειας υπό συγκεκριμένη διαχειριστική πρακτική προς την αντίστοιχη εδαφική απώλεια υπό καλλιεργήσιμο έδαφος.

### 3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ RUSLE ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμογής της εξίσωσης του μοντέλου RUSLE πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Model Builder, μίας εφαρμογής των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, που επιτρέπει τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μοντέλων. Είναι ένα γραφικό εργαλείο για τον σχεδιασμό, προσομοίωση και ανάλυση μαθηματικών μοντέλων που αποτελούνται από ένα σύστημα εξισώσεων και αποτελεί έναν εύχρηστο τρόπο αυτοματοποίησης μιας σειράς εργαλείων.

Στο Model Builder, το μοντέλο αναπαρίσταται με ένα διάγραμμα ροής σε γραφικό περιβάλλον που διευκολύνει τον χρήστη στην απεικόνιση μοντέλων. Το διάγραμμα του μοντέλου αντιπροσωπεύει τη ροή εργασιών με μία ή περισσότερες διαδικασίες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Κάθε διαδικασία αποτελείται από ένα εργαλείο, τις παραμέτρους του (δεδομένα εισόδου, παραγόμενα αποτελέσματα) και τις γραμμές σύνδεσης. Με τη χρήση του Model Builder, κάθε συστατικό του μοντέλου έχει χαρακτηριστικό χρώμα και σχήμα, γεγονός που βοηθάει τον χρήστη στην αναγνώριση των συστατικών και τη δημιουργία του μοντέλου. Συγκεκριμένα, με μπλε έλλειψη απεικονίζονται τα δεδομένα εισόδου, με κίτρινο παραλληλόγραμμο τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και με πράσινη έλλειψη απεικονίζονται τα παραγόμενα αποτελέσματα.



**Σχήμα 2:** Γραφική αναπαράσταση εφαρμογής του μοντέλου RUSLE σε περιβάλλον Model Builder.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής, τα διανυσματικά αρχεία με τις χρήσεις γης, τη διαβρωσιμότητα του εδάφους, τις πρακτικές ενάντια στη διάβρωση, καθώς επίσης και η εξίσωση της βροχοβαθμίδας της περιοχής (Σχήμα 2). Η εφαρμογή των εξισώσεων που αναλύθηκαν παραπάνω για τον υπολογισμό του κάθε παράγοντα, καθώς και ο τελικός πολλαπλασιασμός των παραγόντων έγινε με τη χρήση του εργαλείου raster calculator. Επιπρόσθετα, για την εκτίμηση του παράγοντα LS χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Fill, Flow Direction και Flow



Accumulation από την εργαλειοθήκη Spatial Analyst→Hydrology και το εργαλείο Slope από την εργαλειοθήκη Spatial Analyst→Surface του λογισμικού ArcGIS 10.2.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι τιμές που δόθηκαν για τον παράγοντα της φυτοκάλυψης C καθορίστηκαν με βάση τη βιβλιογραφία (Wischmeier and Smith, 1978, Morgan, 2005). Οι τιμές αυτές είναι για τα δάση: 0,003, θαμνώνες: 0,014, γεωργικές καλλιέργειες: 0,3, γυμνά-άγονα: 0,35 και οικισμοί: 0.

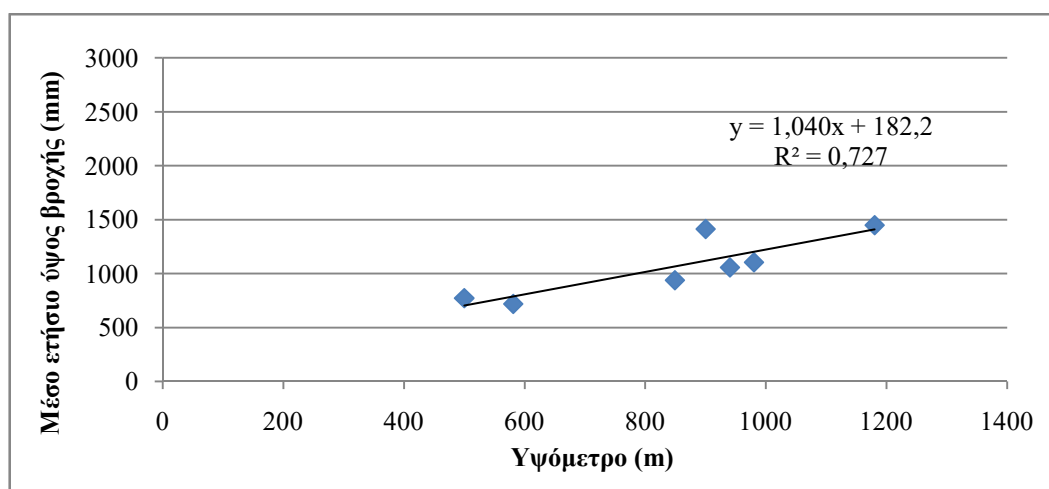
Σε ό,τι αφορά τις τιμές του συντελεστή για τη διαβρωσιμότητα του εδάφους K, έχουν υπολογιστεί βάσει άμεσων παρατηρήσεων πεδίου από 500 ερευνητές στα πλαίσια του προγράμματος LUCAS 2009 (Land Use and Cover Area Frame Survey) για 27 ευρωπαϊκές χώρες, ανάμεσα στις οποίες είναι και η Ελλάδα. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών διατίθενται σε μορφή ψηφιδωτού αρχείου (raster) από το ESDAC (European Soil Data Centre) (Panagos et al., 2014).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχής R απαιτείται η γνώση της σχέσης μεταβολής του ετήσιου ύψους βροχής με το υπερθαλάσσιο υψόμετρο. Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των κάτωθι μετεωρολογικών σταθμών (Πίνακας 1):

**Πίνακας 1:** Μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Α/Α	Μετεωρολογικός σταθμός	Συντεταγμένες		Υψόμετρο σταθμού (m)	Περίοδος παρατηρήσεων
		X	Y		
1	Αγιόφυλλο	291664,98	4415401,65	581	1951-2011
2	Ελάτη	287744,71	4376627,60	900	1950-2011
3	Κατάφυτο	296683,37	4389347,09	980	1953-2011
4	Μαλακάσι	267146,17	4415401,65	849	1951-2011
5	Μεγάλη Κερασιά	285600,09	4402608,09	500	1974-2011
6	Περτούλι	282117,05	4380487,00	1180	1961-2011
7	Χρυσομηλιά	285135,99	4385957,09	940	1960-2011

Αναλύοντας τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών του Πίνακα 1, προσδιορίστηκε η σχέση της βροχοβαθμίδας στην περιοχή έρευνας και δίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3):

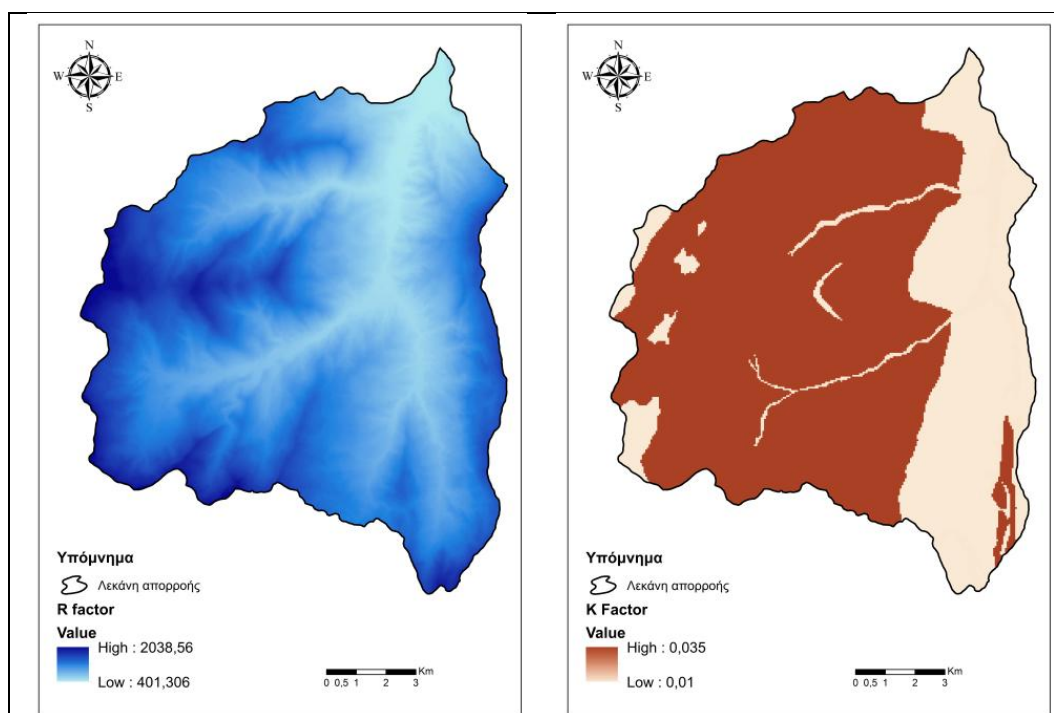


**Σχήμα 3:** Η σχέση μεταξύ του μέσου ετήσιου ύψους βροχής και του υπερθαλάσσιου ύψους στην περιοχή έρευνας.

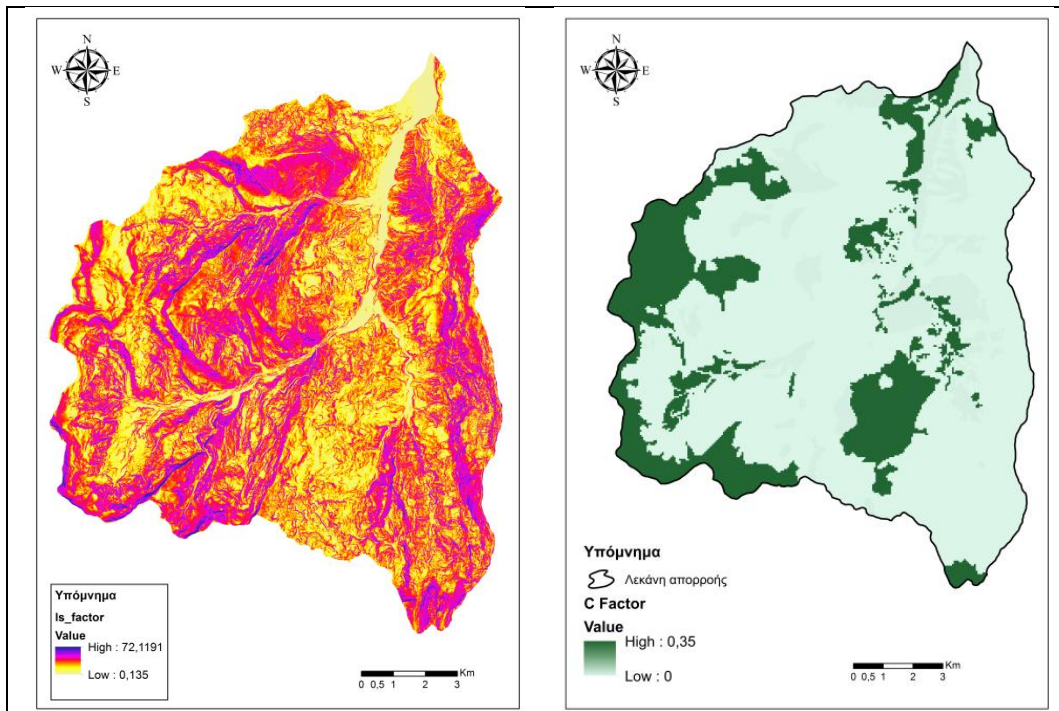
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 3) παρατηρείται ότι ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι ισχυρός, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ποσοστό 73% της συνολικής μεταβολής του ύψους βροχής οφείλεται στη μεταβολή του υπερθαλάσσιου ύψους. Για τον υπολογισμό του παράγοντα R χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Χρυσομηλιάς αναγόμενα στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης βάση της σχέσης της βροχοβαθμίδας.

Ο συντελεστής αναγλύφου LS υπολογίστηκε από το εργαλείο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Model Builder των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών λαμβάνοντας ως δεδομένο εισόδου υψηλής ακρίβειας ψηφιακό μοντέλο εδάφους (5 m\*5 m). Τέλος, στη λεκάνη απορροής του ρέματος δεν υπάρχουν συγκεκριμένες πρακτικές ή έργα προστασίας ενάντια στη διάβρωση (Καλινδέρης, 2006), με αποτέλεσμα να θεωρείται ο αντίστοιχος συντελεστής P παντού ίσος με τη μονάδα. Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με βάση το μοντέλο RUSLE, δίνονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4).

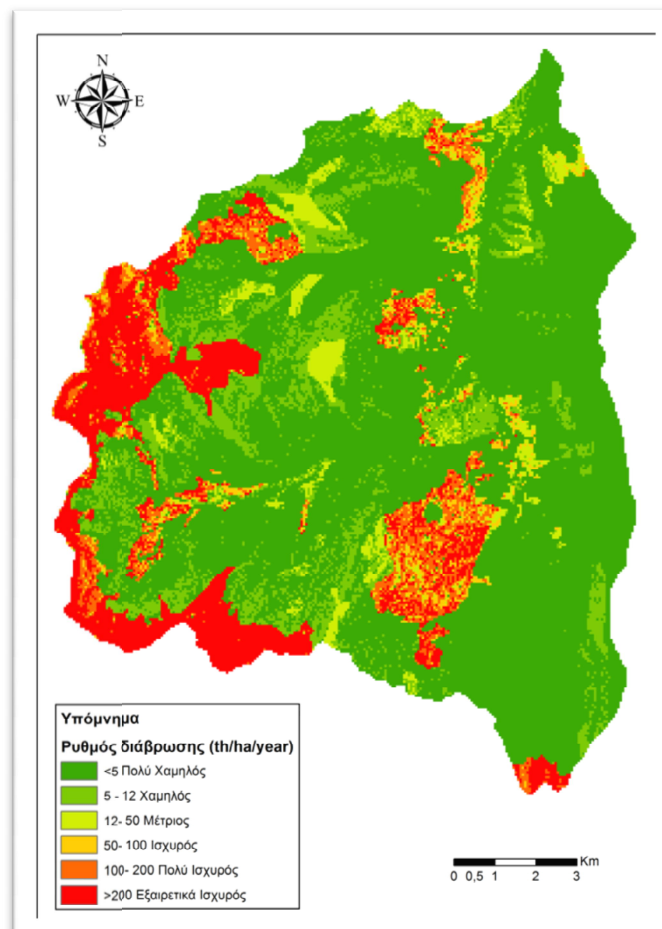
Λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές των παραμέτρων και την εξίσωση του μοντέλου της RUSLE, εκτιμήθηκε η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου ίση με 73 tn/ha/έτος. Επειδή το μοντέλο επικεντρώνεται κυρίως στον προσδιορισμό της επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης, το μέγεθος αυτό πρέπει να προσαυξηθεί ώστε να συμπεριληφθούν και τα υλικά που παράγονται από τη διάβρωση της κοίτης των υδατορευμάτων. Ο Χρυσάνθου (1985) βασιζόμενος στα αποτελέσματα του Roehl (1962) για παραπλήσια έρευνα σε υδατορεύματα των ΗΠΑ, χρησιμοποίησε προσαύξηση 20%. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η μέση ετήσια εδαφική διάβρωση 88 tn/ha/έτος. Το μέγεθος της διάβρωσης, καθώς και η χωρική κατανομή της στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου δίδονται στο Σχήμα 5.







Σχήμα 4: Προσδιορισμός των παραμέτρων της εξίσωσης RUSLE.



Σχήμα 5: Εφαρμογή της εξίσωσης RUSLE στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου.

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους (RUSLE) εφαρμόστηκε για την εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου του Νομού Τρικάλων με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και τη δημιουργία μοντέλου στο ArcGIS Model Builder.

Η εξίσωση RUSLE είναι μία εμπειρική εξίσωση που δεν αντιπροσωπεύει μαθηματικά τις φυσικές διεργασίες της διάβρωσης. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματά της θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως εκτιμήσεις και ως ενδείξεις του μεγέθους της διάβρωσης. Από την εφαρμογή της μεθόδου προέκυψε ότι στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κλεινοβίτικου αναπτύσσεται, κατά Reneuve και Galevsky (1955), ισχυρή διάβρωση. Η ταξινόμηση των τιμών διάβρωσης σε κατηγορίες κινδύνου (π.χ. πολύ χαμηλός, χαμηλός, πολύ ισχυρός κ.λ.π.) παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης και της έκτασης των απειλούμενων από διάβρωση περιοχών. Ο συνδυασμός της RUSLE με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών επιτρέπει τη χαρτογράφηση και τη χωρική κατανομή του κινδύνου διάβρωσης του εδάφους και παράγει χρήσιμα και αναγνώσιμα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους αρμόδιους φορείς, για την επιλογή της ορθής πολιτικής και των ενδεδειγμένων έργων ενάντια στη διάβρωση και την υποβάθμιση του εδάφους.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση του ArcGIS Model Builder για την αυτοματοποίηση διαδικασιών και ανάπτυξη μοντέλων γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από τη χρήση του Model Builder για την εφαρμογή του μοντέλου της RUSLE είναι ότι επιταχύνονται οι υπολογισμοί, μειώνεται ο χρόνος και το κόστος εργασίας, καθώς επίσης ότι είναι απλό και εύκολο στη χρήση. Επιπρόσθετα, καθίσταται δυνατή η χρήση του μοντέλου και από άλλους χρήστες για την εφαρμογή του σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασίου, Σ. 2013. *Προσδιορισμός της υποβάθμισης και των εστιών παραγωγής φερτών υλικών των λεκανών απορροής των χειμάρρων της πόλης των Σερρών με τη χρήση των GIS*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας Α.Π.Θ., 130 σελ.
- Καλινδέρης, Ι. 2006. *Η υδρονομία στην Ελλάδα στα πλαίσια της κοινοτικής οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των υδατικών πόρων*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 330 σελ.
- Κουράκλη, Π. και Στεφανίδης, Π. 2011. *Διάβρωση και ανάπτυξη μοντέλων διάβρωσης στην Ευρώπη*. Πρακτικά του 4<sup>ου</sup> Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη (Πρακτικά σε CD).
- Μαργαρόπουλος, Π. 1963. *Η υδατική διάβρωση και το χειμαρρικό φαινόμενο*. Εκδόσεις Δανιγγέλης, Αθήνα, 209 σελ.
- Ξανθάκης, Μ., 2011. *Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών., 288 σελ.
- Χατζηχριστάκη, Χ., Στεφανίδης, Σ. και Στεφανίδης, Π. 2013. *Ορθολογική διαχείριση λεκανών απορροής της λίμνης Κορώνειας για έλεγχο των φερτών υλικών*. Πρακτικά 16<sup>ου</sup> Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, 878-889.
- Χρυσάνθου, Β. 1985. *Στερεοπαροχή μιας λεκάνης απορροής και συσσώρευση φερτών υλών στην αντίστοιχη τεχνητή λίμνη*. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ, Ξάνθη, 389-397.

- Χρυσάνθου, Β. και Πυλιώτης, Α. 1995. Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σ' έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, 355-362.
- Arnold, J. G. and Allen, P. M. 1996. *Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds*. Journal of Hydrology, 176(1): 57-77.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F. and Monke, A. 1980. *ANSWERS: A model for watershed planning*. Transactions of the ASAE, 23(4): 938-944.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., Panagoulia, D. and Karavitis, C. 2016. *Assessment of soil susceptibility to erosion using the EMP and RUSLE models: The case of Venetikos river catchment*. Global Nest Journal, 18(1):164-179.
- Gavrilovič, S., 1972. *Engineering of debris flow and erosion*. Izgradnja, Beograd, Serbia, p. 292.
- Knisel, W. G., Williams, J. R. and Singh, V. P. 1995. *Hydrology components of CREAMS and GLEAMS models*. Computer models of watershed hydrology, 1: 1069-1114.
- Kotoulas, D. 1984. *Denudation and sedimentation in Greece as an example from the mountains and the plain of Salonica*. Proceedings of the International Symposium of INTERPRAEVENT, Villach, 343-353.
- Kirkby, M. J., Le Bissonais, Y., Coulthard, T. J., Daroussin, J. and McMahon, M. D. 2000. *The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 81(2): 125-135.
- Kinnell, P.A. 2010. *Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review*. Journal of Hydrology, 385(1): 384-397.
- Li, Y., Bai, X., Zhou, Y., Qin, L., Tian, X., Tian, Y. and Li, P. 2016. *Spatial–Temporal Evolution of Soil Erosion in a Typical Mountainous Karst Basin in SW China, Based on GIS and RUSLE*. Arabian Journal for Science and Engineering, 41(1): 209-221.
- McCool D. K., Brown L. C., Foster G. R., Mutchler C. K. and Mayer L. D. 1987. *Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation*. Transactions of the ASAE, 30:1387–1396.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci P., Torri, D. and Styczen, M. E. 1998. *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. Earth Surface Processes and Landforms, 23(6): 527-544.
- Morgan, R. P. C. 2001. *A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model*. Catena, 44(4): 305-322.
- Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing, Third Edition.
- Myronidis, D. and Arabatzis, G. 2009. *An evaluation of the Greek post fire erosion mitigation policy through spatial analysis*. Polish Journal of Environmental Studies, 18: 865-872.
- Myronidis, D. I., Emmanouloudis, D. A., Mitsopoulos, I. A. and Riggos, E. 2010a. *Soil erosion potential after fire and rehabilitation treatments in Greece*. Environmental Modeling & Assessment, 15(4), 239-250.
- Myronidis, D., Ioannou, K., Sapountzis, M. and Fotakis, D. 2010b. *Development of a sustainable plan to combat erosion for an island of the Mediterranean region*. Fresenius Environmental Bulletin, 19(8): 1694-1702.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. and Finkner, S. C. 1989. *A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology*. Transactions of the ASAE, 32(5): 1587-1593.
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P. and Alewell, C. 2014. *Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS*. Science of the Total Environment, 479: 189-200.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A. and Porter, J. P. 1991. *RUSLE: Revised universal soil loss equation*. Journal of Soil and Water Conservation, 46(1): 30-33.
- Reneuve, P. and Galevsky, M. 1955. *La corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion (d'après les observations faites dans un périmètre torrentiel)*. Annales de l'école nationale des eaux et forêts et de la station de recherches et expériences, 379-428.
- Roehl, J. W., 1962. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. In Symposium of Bari, 1–8 October 1962, Commission of Land Erosion. Publication 59, IAHS: Wallingford: 202–213.
- Schwertmann, U., Vogl, W. und Kainz, M. 1990. *Bodenerosion durch Wasser*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 12-14.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. 1990. *EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation*. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture.
- Smith, R. E., Goodrich, D. C. and Quinton, J. N. 1995. *Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models*. Journal of Soil and Water Conservation, 50(5): 517-520.
- Stefanidis, P., Sapountzis, M. and Stathis, D. 2002. *Sheet erosion after fire at the urban forest of Thessaloniki (Northern Greece)*. Silva Balcanica, 21: 65-77.
- Tanyaş, H., Kolat, Ç. and Süzen, M. L. 2015. *A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam*. Journal of Hydrology, 528: 584-598.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D. and Anderson, W. P. 1989. *AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds*. Journal of Soil and Water Conservation, 44(2): 168-173.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Radoane, M., Govers, G., Ocakoglu, F. and Arabkhedri, M., 2012. *How long should we measure? An exploration factors controlling the inter-annual variation of catchment sediment yield*. Journal of Soils and Sediments, 12: 603-619.
- Verstraeten, G. and Poesen, J., 2002. Using sediment deposits in small ponds to quantify sediment yield from small catchments: possibilities and limitations. Earth Surface Processes and Landforms, 27: 1425-1439.
- Viney, N. R. and Sivapalan, M. 1999. *A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia*. Hydrological Processes, 13(5): 727-743.
- von Werner, M. 2000. *EROSION-3D Technical user manual*, Department of Soil Science and Water Protection. TU, Bergakademie Freiberg, Berlin, Germany.
- Vulević, T., Dragović, N., Kostadinov, S., Simić, S. and Milovanović, I. 2015. *Prioritization of soil erosion vulnerable areas using multi-criteria analysis methods*. Polish Journal of Environmental Studies, 24(1): 317-323.
- Wischmeier W. H. and Smith, D. D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*. U. S. Dep. of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, 62 p.
- Zini, A., Grauso, S., Verrubbi, V., Falconi, L., Leoni, G. and Puglisi, C. 2015. *The RUSLE erosion index as a proxy indicator for debris flow susceptibility*. Landslides, 12(5): 847-859.
- Zlatic, M., Andrijanić, T., Vladimir, Š., Dragović, N. and Todosijević, M. 2010. *Natural and economic effect and assessment of risk and uncertainty of sustainable soil management in Pariguz watershed*. Proceedings of the First Serbian Forestry Congress - Future with Forests, Belgrade, 826-834.