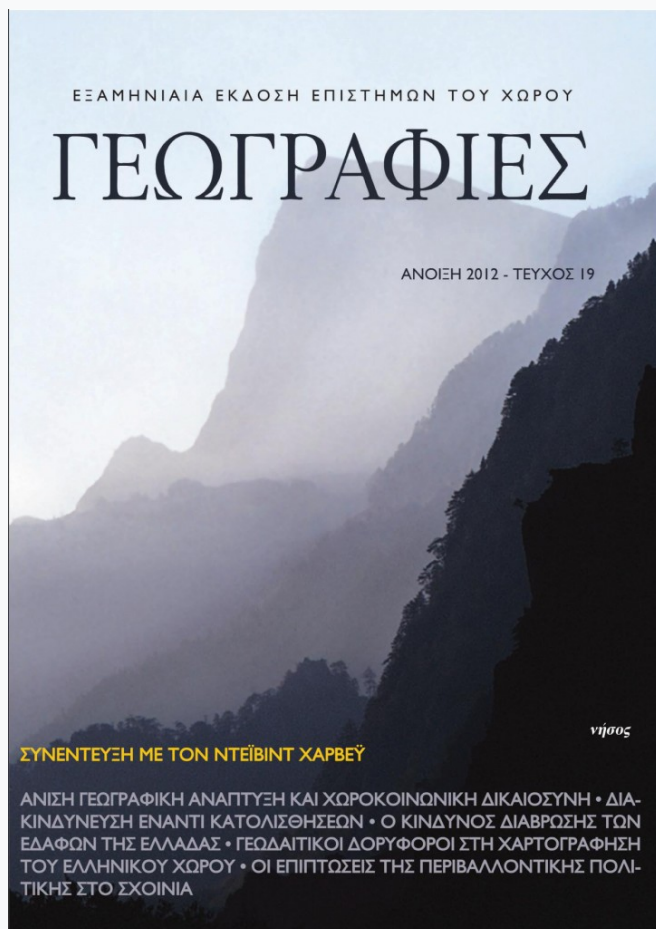


## Γεωγραφίες

Αρ. 19 (2012)

Γεωγραφίες, Τεύχος 19, 2012



### ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

*Δημήτρης Μυρωνίδης*

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Δημήτρης Μυρωνίδης<sup>1</sup>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το έδαφος είναι ένα δυναμικό οικοσύστημα το οποίο επιτελεί διάφορες λειτουργίες και προσφέρει πολύτιμες υπηρεσίες στον άνθρωπο. Το έδαφος υπόκειται σε μια σειρά από διεργασίες και απειλές, όπως είναι ο κίνδυνος διάβρωσης, που μπορούν υπό ξηρές και ημίξηρες συνθήκες να οδηγήσουν στην πλήρη ερημοποίησή του. Λαμβάνοντας υπόψη τη σοβαρότητα του κινδύνου, είναι απαραίτητο να εφαρμόσουμε εξελιγμένες τεχνικές για την εκτίμηση του μεγέθους της διάβρωσης. Ο συνδυασμός του μοντέλου διάβρωσης της Παγκόσμιας Εξίσωσης της Εδαφικής Απώλειας (USLE) με το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης των εδαφών της ελληνικής επικράτειας. Η αποτίμηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα καλύτερα διαθέσιμα γεωγραφικά δεδομένα, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίθηκαν με ανάλογα αποτελέσματα των μοντέλων διάβρωσης (PESERA και SERAE). Η χαρτογράφηση των περιοχών που διατρέχουν κίνδυνο διάβρωσης δύναται ακολούθως να χρησιμοποιηθεί στον προγραμματισμό αντιδιαβρωτικών έργων στις λεκάνες απορροής, ενώ παράλληλα καλύπτει κατά ένα μέρος τις υποχρεώσεις σχετικής Ευρωπαϊκής Οδηγίας.

*Λέξεις κλειδιά:* USLE, κίνδυνος διάβρωσης, GIS, αντιδιαβρωτικά έργα.

An assessment of the soil erosion risk in the Greek territory as a tool for the management of watersheds

**Myronidis Dimitris**

## ABSTRACT

Soil is a dynamic ecosystem which performs many different functions and offers valuable services to humans. Soil is usually underlain under a series of processes and threats, as the erosion risk, which at arid or semi arid conditions can lead to its desertification. Taking into account the importance of the risk, it is necessary to apply sophisticated techniques in order to determine the erosion risk. The combination of the Universal Soil Loss Model (USLE) soil erosion model with the Geographical Information System ArcGIS was used in order to estimate the erosion risk of the Greek Territory. The assessment was realized based on the best available Geographical Data, while the analysis results were compared to the results of other erosion models (PESERA, SERAE). Furthermore, mapping the areas at erosion risk can be used for planning erosion control works in the watersheds while it partially covers the obligations of relevant E.U. Directive.

*Key words:* USLE, Erosion Risk, GIS, erosion control.

1. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Δασολογίας και Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, τηλ. 2310-992736, Τ. Θ. 268, 54124 Θεσσαλονίκη, myronid@gmail.com.

## 1. Εισαγωγή

Το έδαφος αποτελεί, ουσιαστικά, μη ανανεώσιμο πόρο και ένα πολύ δυναμικό σύστημα, το οποίο επιτελεί πολλές λειτουργίες και προσφέρει υπηρεσίες ζωτικής σημασίας για τις δραστηριότητες του ανθρώπου και την επιβίωση των οικοσυστημάτων (E.E. COM 232 2006). Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχει αναγνωρισθεί παγκοσμίως η ανάγκη προστασίας του εδάφους, που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την αειφόρο ανάπτυξη (E.E. COM 231 2006). Το έδαφος έχει την ικανότητα να αποθηκεύει, να διηθεί και να μετασχηματίζει πολλές ουσίες, μεταξύ αυτών το νερό, τα θρεπτικά στοιχεία και ο άνθρακας.

Η διάβρωση απομακρύνει το επιφανειακό γόνιμο έδαφος, ελαττώνει τα θρεπτικά συστατικά και την ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει νερό και αυξάνει τις απώλειες κολλοειδών μειώνοντας έτσι σημαντικά την παραγωγικότητα του εδάφους (Παπαϊωάννου και Τάντος 2008). Με βάση πρόσφατη Κοινοτική Οδηγία (E.E. COM 232 2006), τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (E.E.) εντός πέντε ετών από την ημερομηνία μεταφοράς της οδηγίας στο εθνικό πλαίσιο υποχρεούνται να καταρτίσουν χάρτες οι οποίοι θα αποτυπώνουν τον κίνδυνο υποβάθμισης του εδάφους λόγω διάβρωσης, απομείωσης των οργανικών υλών, συμπίκνωσης, αλάτωσης και κατολισθήσεων. Επίσης, τα κράτη μέλη δύνανται να βασίζονται στον χαρακτηρισμό των περιοχών κινδύνου σε εμπειρικά στοιχεία ή σε μοντέλα (E.E. COM 232 2006).

Ο σκοπός της εργασίας είναι διττός, αρχικά να χαρτογραφηθεί ο κίνδυνος διάβρωσης της Ελληνικής Επικράτειας με τη βοήθεια του μοντέλου της Παγκόσμιας Εξίσωσης της Εδαφικής Απώλειας (U.S.L.E.) (Wischmeier και Smith, 1978) και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.), και ακολούθως να εξεταστεί εάν η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτίμησης της διάβρωσης μπορεί να συνεισφέρει στην εκτίμηση του στερεοφορτίου που παράγεται στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής. Τα συστήματα αυτά, μολονότι απαιτούν τη δημιουργία και τη διαχείριση μιας γεωγραφικής βάσης δεδομένων, διαθέτουν μια σειρά από εργαλεία τα οποία είναι κατάλληλα για την επεξεργασία των δεδομένων και την επίλυση συγκεκριμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως η εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης και της στερεομεταφοράς (Φωτάκης κ.ά. 2006).

Ήδη από τη δεκαετία του 1950 έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα μοντέλα με στόχο την εκτίμησή του, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές (Merritt κ.ά. 2003). Η αποτίμηση βασίζεται συνήθως στον προσδιορισμό διαφόρων επιμέρους παραγόντων αρκετοί από τους οποίους (κλίσεις, χρήσεις γης, το μέγεθος και η ένταση της βροχόπτωσης κ.ά.) είναι κοινοί μεταξύ των μοντέλων (Jetten κ.ά. 1999). Μεταξύ αυτών των μοντέλων η USLE αποτελεί το πιο απλό μαθηματικό μοντέλο αποτίμησης της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης (Wischmeier και Smith 1978) τα αποτελέσματα του οποίου έχουν πολλές φορές κατά το παρελθόν επαληθευτεί σε διαφορετικές μελέτες διάβρωσης (Hudson 1985, Morgan 1995, Σαπουντζής κ.ά. 2009).

Το γεγονός της ευκολίας εφαρμογής του μοντέλου της U.S.L.E., σε συνδυασμό με το ότι έχει χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της διάβρωσης σε μικρές κλίμακες (Kitahara κ.ά. 2000), σε επίπεδο κράτους (Cebecauer και Hofierka 2008) ακόμα και σε επίπεδο λεκάνης απορροής (Onyando κ.ά. 2005), μας ώθησαν στην επιλογή του για τις ανάγκες της έρευνάς μας. Τέλος, τα αποτελέσματα της ανά-

λυσης συγκρίθηκαν με ανάλογα αποτελέσματα των μοντέλων διάβρωσης PESERA και SERAE ενώ επιπρόσθετα μπορούν να χρησιμεύσουν στον προγραμματισμό αντιδιαβρωτικών έργων στις λεκάνες απορροής. Ωστόσο θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι προβλέψεις μοντέλων εδαφολογικής διάβρωσης είναι πολύ ευαίσθητες στις αλλαγές, στις χωρικές και χρονικές κλίμακες (Zhang κ.ά. 2004). Τα σημαντικότερα λάθη στη μοντελοποίηση της διάβρωσης προέρχονται από το ασυμβίβαστο μεταξύ της πρότυπης κλίμακας, της κλίμακας των δεδομένων εισαγωγής και της προοριζόμενης κλίμακας των αποτελεσμάτων.

## 2. Μέθοδος έρευνας

### 2.1. Ανάλυση του μοντέλου και των δεδομένων εισόδου

Σύμφωνα με το μοντέλο της USLE, το μέγεθος της αναμενόμενης εδαφικής απώλειας εκφράζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

όπου,

- A είναι η μέση ετήσια επιφανειακή διάβρωση σε t/ha/έτος.
- R είναι ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hour}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ ) ο οποίος υπολογίζεται με βάση την κινητική ενέργεια και το ύψος του συνόλου των κατακρημνισμάτων του έτους από όλες τις διαβρωτικά ενεργές βροχές.
- K είναι ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ( $\text{ton} \cdot \text{ha} \cdot \text{hr} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) και αποτυπώνει την ευπάθεια του εδάφους στην απόσπαση και μεταφορά εξαιτίας της πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής και της απορροής.
- LS είναι ο συντελεστής αναγλύφου ο οποίος αφορά την τοπογραφία της περιοχής. Όσο πιο απότομες και μεγάλες σε μήκος είναι οι κλίσεις που επικρατούν σε μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος διάβρωσης (Haan κ.ά. 1994).
- C είναι ο συντελεστής φυτοκάλυψης ο οποίος χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας της προστασίας που παρέχει η βλάστηση στη διάβρωση του εδάφους μειώνοντας την κινητική ενέργεια των σταγόνων της βροχής.
- P είναι ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης ο οποίος εκφράζει την ανθρώπινη παρέμβαση για την προστασία από τη διάβρωση. Είναι ανάλογος της κλίσης και εξαρτάται από τις πρακτικές (π.χ. όργωμα κατά την διεύθυνση των ισοϋψών) και κατασκευές (π.χ. φράγματα) ελαχιστοποίησης της διάβρωσης οι οποίες εφαρμόζονται.

Με βάση τα παραπάνω, για την αποτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με την μέθοδο USLE δημιουργήθηκε μια χωρική γεωβάση στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς Ε.Γ.Σ.Α. '87, στην οποία περιλαμβάνονται τα πρωτογενή δεδομένα βροχόπτωσης, τοπογραφίας, εδαφολογικά και χρήσεων γης (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πρωτογενή δεδομένα εισόδου

Τύπος δεδομένων	Πηγή	Μορφή	Χωρική - μονάδα	κλίμακα	Χρονολογία αναφοράς
Χρήσεις γης	Corine	Raster	Cell size 50x50m	1:1.000.000	2000
Βροχομετρικοί Σταθμοί	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών	Point coverage	515 σημεία	1:1.000.000	2007
Εδαφολογικός χάρτης	E.E.	Raster	Cell size 50x50m	1:1.000.000	1985
Τοπογραφικός χάρτης	Γ.Υ.Σ.	Line coverage	Ισοϋψείς ανά 100μ	1:200.000	2000

## 2.2. Εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου

Παρόλο που η Ελλάδα σε σχέση με άλλες Μεσογειακές χώρες παρουσιάζεται σε πλεονεκτική θέση εξαιτίας της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων, ωστόσο οι ποσότητες των υδατικών πόρων δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στο χρόνο και στο χώρο (Sofios κ.ά. 2007). Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής εξαρτάται από την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Δυστυχώς, τέτοιου είδους δεδομένα σε επίπεδο Ελληνικής επικράτειας δεν είναι διαθέσιμα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο R σχετίζεται με το μέγεθος της βροχόπτωσης και ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες υπολογίζουν τον παράγοντα με βάση το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (Onyando κ.ά. 2005), εφαρμόσαμε την ακόλουθη εμπειρική σχέση (Schwertmann κ.ά. 1990, Στάθης και Σαπουντζής 2002) για τον προσδιορισμό του συντελεστής διαβρωτικότητας

$$R = 0,083 \times P - 1,77 \quad (2)$$

όπου P είναι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm) και R ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα βροχομετρικά δεδομένα 515 σταθμών από όλη την Ελλάδα (Γκουβάς κ.ά. 2007) με περίοδο λειτουργίας, στην μεγαλύτερη πλειονότητα τους, τουλάχιστον 10 ετών. Με βάση τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα κατασκευάστηκε χάρτης χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παρεμβολής Krigging (Παπαμιχαήλ 2001) με τη βοήθεια της οποίας οι σημειακές τιμές των βροχομετρικών παρατηρήσεων μετασχηματίστηκαν σε χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στον Ελλαδικό χώρο. Η κατανομή αυτή των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια για να υπολογιστεί ο παράγων R με την βοήθεια της εξίσωσης 2 και του module Spatial Analyst (McCoy και Johnston, 2002) του ArcGIS (Σχήμα 1α).

Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του υποθέματος αναπαριστά την αντίσταση του εδάφους στις διαβρωτικές δυνάμεις που του ασκούνται λόγω των βροχοπτώσεων και της απορροής (Lee 2004). Ο προσδιορισμός του πραγματοποιείται με βάση πέντε ιδιότητες του εδάφους (περιεκτικότητα σε ιλύ και λεπτή άμμο, περιεκτικότητα σε μέση και χονδρή άμμο, περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, ποσοστό οργανικής ουσίας και διαπερατότητα) (Κωτούλας 1998). Συνεπώς, η αποτίμηση του συντελεστή διαβρωσιμότητας του υποθέματος απαιτεί μεγάλο αριθμό

από μετρήσεις πεδίου με συνέπεια να είναι αδύνατος ο προσδιορισμός του μεγέθους του συντελεστή  $K$  σε μικρές κλίμακες. Εξαιτίας της έλλειψης αναλυτικών εδαφολογικών δεδομένων σε επίπεδο χώρας εκτιμήθηκαν οι τιμές του συντελεστή με βάση τον εδαφολογικό χάρτη κλίμακας 1:1.000.000 (E.E. 1985) και τη χρήση πινάκων τους οποίους προτείνει το Υπουργείο Γεωργίας του Καναδά (Omafra 2007). Παρόλο που τέτοιου είδους εκτιμήσεις του συντελεστή διαβρωσιμότητας του υποθέματος δεν μπορούν να υποκαταστήσουν την ακρίβεια των μετρήσεων πεδίου ωστόσο αποτελούν τη μοναδική εναλλακτική λύση όταν πραγματοποιείται έρευνα σε μικρές κλίμακες (Le Roux κ.ά. 2008). Με βάση τα παραπάνω εκτιμήθηκε η χωρική κατανομή του συντελεστή διαβρωσιμότητας στην Ελληνική Επικράτεια (Σχήμα 1β).

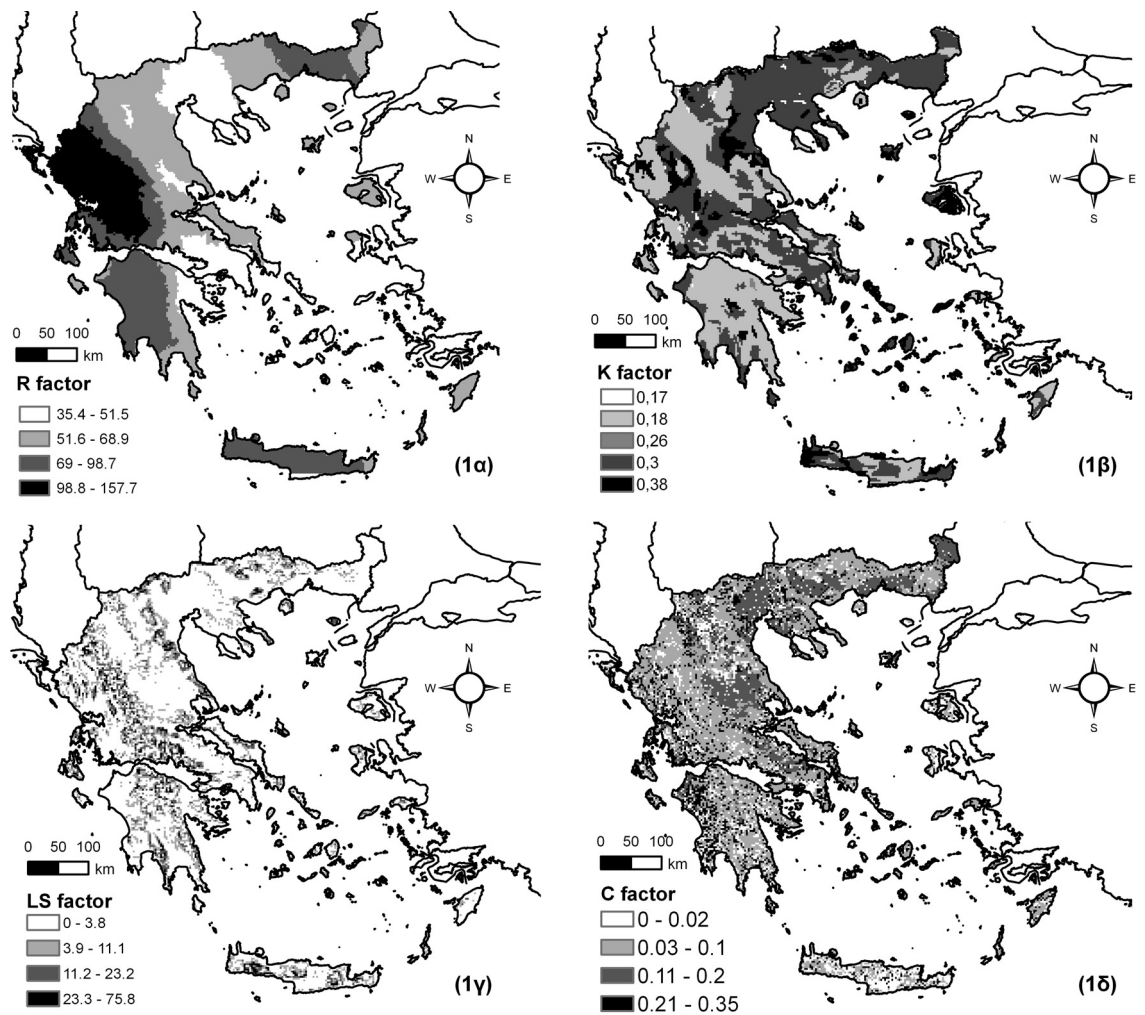
Η υποβάθμιση του εδάφους αυξάνεται με την αύξηση του μήκους  $L$  και της κλίσης  $S$  που επικρατούν σε μια περιοχή εξαιτίας του γεγονότος ότι η αύξηση των μεγεθών αυτών έχει ως συνέπεια να αυξάνει η επιφανειακή απορροή και η συρτική δύναμη του νερού (Κωτούλας 1998). Στην παρούσα εργασία ο τοπογραφικός παράγων ( $LS$ ) υπολογίστηκε με τη βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους το οποίο κατασκευάστηκε από την ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:200.000 (ισοδιάστασης 100m) της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.). Στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους μορφής Grid και με διαστάσεις κανάβου 50x50m εφαρμόστηκε η ακόλουθη εξίσωση με τη βοήθεια εξειδικευμένης ρουτίνας του ARC/INFO (Hickey 2000).

$$LS = (\ell/72.6)^m (65.41 \sin^2\beta + 4.56\sin\beta + 0.065) \quad (3)$$

όπου  $\ell$  είναι το διαβρωτικό μήκος κλιτύος σε πόδια,  $\beta$  είναι η κλίση της κλιτύος,  $m$  μεταβλητή η οποία υπολογίζεται με βάση το μέγεθος της κλίσης (0,5 όταν η κλίση είναι μεγαλύτερη από 2.86°, 0.4 για κλίσεις από 1.72° - 2.86°, 0.3 για κλίσεις από 0.57° ως 1.72° και 0.2 για κλίσεις μικρότερες από 0.57°. Χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη εφαρμογή στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Ελλάδας υπολογίστηκε το μέγεθος του τοπογραφικού συντελεστή για τον ελλαδικό χώρο (Σχήμα 1γ).

Η διάβρωση και η απορροή επηρεάζονται σημαντικά από το είδος της βλάστησης (π.χ. δάσος, λιβάδι κ.λπ.) αλλά και το είδος των πρακτικών ελέγχου της διάβρωσης που εφαρμόζονται (π.χ. αναχώματα, βαθμίδες κ.λπ.). Ο συντελεστής φυτοκάλυψης εξαρτάται από τη βλάστηση μιας και ανάλογα με το τι είδος βλάστησης υπάρχει σε μια περιοχή μειώνεται η κινητική ενέργεια των σταγόνων της βροχής πριν χτυπήσουν στο έδαφος. Η χαρτογράφηση των χρήσεων γης της δεύτερης έκδοσης του CORINE η οποία έχει μεγαλύτερο βαθμό λεπτομέρειας και υπάρχουν χαρτογραφημένες και οι χρήσεις γης των νησιών οι οποίες απουσίαζαν στην πρώτη έκδοση χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση της βλάστησης. Στον ψηφιακό χάρτη της δεύτερης έκδοσης του CORINE (EEA 2000) ανατέθηκαν οι κατάλληλες τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης ανά κατηγορία βλάστησης (Morgan 1995) ώστε να συνταχθεί ο χάρτης κατανομής του συντελεστή φυτοκάλυψης (σχήμα 1δ).

Τέλος, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν ήταν διαθέσιμες οι πληροφορίες της χωρικής κατανομής των ανθρώπινων παρεμβάσεων για τον έλεγχο της διάβρωσης ανατέθηκε παντού τιμή ίση με μονάδα στον συντελεστή ελέγχου διάβρωσης.

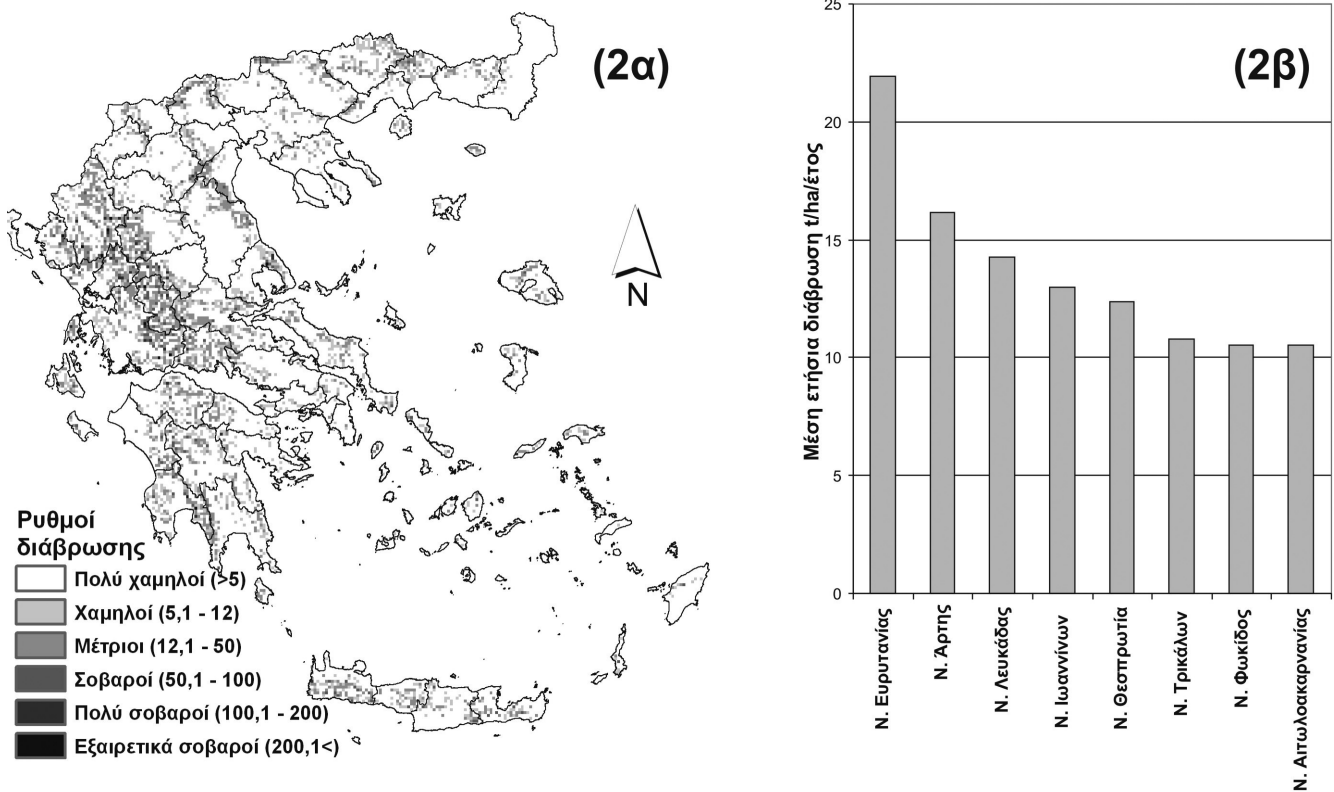


Σχήμα 1: Χωρική κατανομή των παραμέτρων του μοντέλου της U.S.L.E.: ο συντελεστής διαβρωτικότητας R (α), συντελεστής διαβρωσιμότητας K (β), συντελεστής αναγλύφου LS (γ), συντελεστής φυτοκάλυψης C (δ)

### 3. Αποτελέσματα-Συζήτηση

#### 3.1. Εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης

Δεδομένου ότι όλοι οι παράγοντες της U.S.L.E. έχουν χωρική κατανομή, η εφαρμογή του μοντέλου με την χρήση των G.I.S. μας δίνει γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με την εφαρμογή της μεθόδου χωρίς την χρήση των Γ.Σ.Π. (Myronidis κ.ά. 2010). Δημιουργώντας για κάθε παράγοντα του μοντέλου τον αντίστοιχο χάρτη και συνδυάζοντας τους χάρτες με τη βοήθεια απλών εντολών του ArcGIS μπορούμε εύκολα και γρήγορα να υπολογίσουμε τους ρυθμούς διάβρωσης που επικρατούν στην ελληνική επικράτεια. Ακολούθως, πολλαπλασιάζοντας μεταξύ τους τις παραμέτρους του μοντέλου διάβρωσης της U.S.L.E (R, K, LS, C και P) προκύπτει η κατανομή των ρυθμών διάβρωσης για τον Ελληνικό χώρο σε t/ha/έτος. Ομαδοποιώντας στη συνέχεια τον χάρτη κατανομής της διάβρωσης, με



Σχήμα 2: Χωρική κατανομή ρυθμών διάβρωσης στην Ελληνική Επικράτεια σύμφωνα με το μοντέλο της USLE (α) και οι νομοί με την μεγαλύτερη μέση ετήσια διάβρωση με βάση το ίδιο μοντέλο (β)

μέγεθος pixel 50x50m, σε έξι κατηγορίες διάβρωσης αποτυπώνεται η χωρική κατανομή της διάβρωσης (Σχήμα 2α) αλλά και οι νομοί με τη μεγαλύτερη μέση ετήσια διάβρωση (Σχήμα 2β).

### 3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων με άλλα μοντέλα διάβρωσης

Ο έλεγχος της μοντελοποίησης της εδαφικής διάβρωσης σε τόσο μικρές κλίμακες είναι πολύ δύσκολος εξαιτίας του γεγονότος ότι στην Ελλάδα δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία μετρήσεων υπαίθρου οι οποίες να καλύπτουν το σύνολο της γεωγραφικής έκτασης της χώρας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με μεμονωμένες μετρήσεις πεδίου είναι πιθανό να οδηγούσε σε λανθασμένα και μη αξιοποιήσιμα συμπεράσματα. Σε παρόμοιες έρευνες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο χώρας είτε δεν έγινε έλεγχος της μοντελοποίησης (Mirco κ.ά. 2003, Sebcauer και Hofierka 2008), είτε βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες οι οποίες όμως κάλυπταν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (Le Roux κ.ά. 2008) είτε σε μακροχρόνιες μετρήσεις σε πάνω από 60 αντιπροσωπευτικές λεκάνες απορροής (De Vente κ.ά. 2008). Εξαιτίας των παραπάνω περιορισμών δεν πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της μοντελοποίησης αλλά προτιμήθηκε η σύγκριση με τα αποτελέσματα ανάλογων μοντέλων αποτίμησης της εδαφικής διάβρωσης.



Το μοντέλο διάβρωσης PESERA συνδυάζει δεδομένα τοπογραφίας, κλίματος και εδάφους για να αποτιμήσει τον κίνδυνο διάβρωσης και την απορροή σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (Kirkby κ.ά. 2004). Χρησιμοποιώντας ομοιογενή δεδομένα μικρής κλίμακας (π.χ. 1 Km ψηφιακό μοντέλο εδάφους) χαρτογραφείται ο κίνδυνος διάβρωσης. Ωστόσο, δεν χαρτογραφείται η νησιωτική Ελλάδα λόγω της έλλειψης πληροφοριών βλάστησης ενώ με βάση το μοντέλο υψηλοί ρυθμοί διάβρωσης καταγράφονται στις περιοχές με ασβεστόλιθο (Kirkby κ.ά. 2004). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου PESERA, οι νομοί της Ελλάδας οι οποίοι παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους ρυθμούς μέσης ετήσιας διάβρωσης κατά φθίνουσα σειρά είναι της Άρτας, Αιτωλοακαρνανίας, Πιερίας, Μαγνησίας, Θεσπρωτίας, Πρεβέζης, Φωκίδας. Συνεπώς, στο μεγαλύτερο ποσοστό συμφωνούν οι προβλέψεις των δυο μοντέλων (PESERA, USLE) ως προς το ποιοι νομοί εμφανίζουν την μεγαλύτερη επικινδυνότητα ως προς την διάβρωση.

2. France National Institute for Agriculture Research.

Το μοντέλο διάβρωσης SERAE (Soil Erosion Risk Assessment in Europe) αναπτύχθηκε κυρίως από το INRA<sup>2</sup> και αφορούσε την εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης χρησιμοποιώντας ομοιογενή δεδομένα κλίμακας 1:1.000.000. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση βαθμονομήθηκαν σε κλίμακα και συνδυάστηκαν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας εμπειρικούς κανόνες μέσα σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, παράγοντας χάρτες διάβρωσης σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (Le Bissonnais κ.ά. 2001). Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου διάβρωσης SEREA προκύπτει ότι τους μεγαλύτερους ρυθμούς μέσης ετήσιας διάβρωσης παρουσιάζουν με φθίνουσα ταξινόμηση οι νομοί Ανατολικής Αττικής, Κέρκυρας, Φλωρίνης, Λευκάδος, Άρτας, Κορινθίας, Αιτωλοακαρνανίας. Συμπεραίνεται ότι οι προβλέψεις των δυο μοντέλων (SERAE, USLE) συγκλίνουν όσον αφορά την μέση ετήσια διάβρωση στην πλειονότητα των νομών.

### 3.3. Εκτίμηση της διάβρωσης και διαχείριση των λεκανών απορροής

Γνωρίζοντας τους ρυθμούς διάβρωσης που επικρατούν σε μια περιοχή και το βαθμό της στερεομεταφοράς μπορούμε να υπολογίσουμε στη συνέχεια το μέγεθος του στερεοφορτίου με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$Y = SDR * Ag \quad (4)$$

όπου, Y είναι το μέγεθος του στερεοφορτίου (t/year), SDR είναι ο βαθμός στερεομεταφοράς και Ag είναι η μέση ετήσια επιφανειακή διάβρωση σε t/ha/έτος.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμες εξισώσεις (Williams και Berndt 1972, Onyando κ.ά. 2005, Bhattarai και Dutta 2007) τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των εδαφών και των κλιματικών συνθηκών τις περιοχής έρευνας για να υπολογίσουμε το βαθμό της στερεομεταφοράς και οι οποίες θεωρείται ότι δίνουν γενικά καλά αποτελέσματα (Williams και Berndt 1972). Υπολογίζοντας τον βαθμό στερεομεταφοράς και γνωρίζοντας την χωρική κατανομή των ρυθμών διάβρωσης όπως προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου διάβρωσης της U.S.L.E. (Myrondis κ.ά. 2010) μπορούμε ακολουθώντας να υπολογίσουμε το στερεοφορτίο που θα συγκεντρωθεί σε μια συγκεκριμένη θέση. Η γνώση του μεγέθους του στερεοφορτίου είναι απαραίτητη στις περισσότερες των περιπτώσεων για την διαστασιολόγηση των αναγκαίων υδροτεχνικών

έργων όπως φράγματα (Castillo κ.ά. 2007), λιμνοδεξαμενές και ταμιευτήρες (Χρυσάνθου και Πυλιώτης 1995).

Στην Ελλάδα, οι ακόλουθες εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού του βαθμού στερεομεταφοράς (Renfro 1972) σε συνδυασμό με την USLE έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή για την εκτίμηση του στερεοφορτίου λεκάνης απορροής (Χρυσάνθου και Πυλιώτης 1995, Στάθης και Σαπουντζής 2002, Μάρης κ.ά. 2006).

$$\log DR = 1.87680 - 0.14191 \log(10F) \quad (5)$$

$$\log DR = 2.94259 - 0.82362 \log(L/H) \quad (6)$$

όπου F η επιφάνεια της λεκάνης απορροής (m<sup>2</sup>), L το μήκος του κύριου υδατορέματος της λεκάνης απορροής (m) και H η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δυο άκρων του κύριου υδατορέματος (m).

Είναι προφανές ότι χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της αποτίμησης της εδαφικής διάβρωσης στην ελληνική επικράτεια για την εκτίμηση του στερεοφορτίου σε επίπεδο λεκάνης απορροής η πληροφορία που προκύπτει σχετικά με το μέγεθος του αναμενόμενου στερεοφορτίου στην έξοδο της λεκάνης παρέχει μόνο μια ισχυρή ένδειξη της πραγματικής κατάστασης. Ωστόσο, από έρευνες στην Ελλάδα (Myrionidis κ.ά. 2010, Karyotis και Kosmas 2011) και στο εξωτερικό (Irvem κ.ά. 2007, Bhattarai και Dutta 2007) έχει διαπιστωθεί ότι η χρησιμοποίηση δεδομένων μεγαλύτερης κλίμακας για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας μπορεί να αποτυπώσει με ικανοποιητική ακρίβεια το μέγεθος του στερεοφορτίου που παράγεται στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής.

Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την αποτίμηση του στερεοφορτίου που παράγεται σε μια λεκάνη απορροής εξαρτάται από την κλίμακα των δεδομένων τα οποία χρησιμοποιούνται. Η χρήση δεδομένων μικρή κλίμακας μας παρέχει μια ενδεικτική πληροφορία του μεγέθους του αναμενόμενου στερεοφορτίου ενώ η χρησιμοποίηση δεδομένων μεγάλης κλίμακας μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι παραπάνω περιορισμοί οι οποίοι προκύπτουν εξαιτίας της κλίμακας των δεδομένων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

#### 4. Συμπεράσματα

Τα μοντέλα διάβρωσης σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών απλοποιούν τη διαδικασία χαρτογράφησης των περιοχών που εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης. Φυσικά πάντα εγκυμονεί ο κίνδυνος η απλοποίηση, η ομογενοποίηση και οι εύκολες παραδοχές να οδηγήσουν σε λανθασμένα μη αξιοποιήσιμα και υπερ-γενικευμένα αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της USLE για να προσδιοριστούν οι ρυθμοί διάβρωσης που επικρατούν στην ελληνική επικράτεια ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίθηκαν με αυτά δυο πολύ γνωστών μοντέλων διάβρωσης (PESERA, SERAE).

Σε αντίθεση με τα PESERA και SERAE, η εκτίμηση της διάβρωσης στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μεγαλύτερης κλίμακας δεδομένα, ενώ χαρτογραφήθηκε ο κίνδυνος διάβρωσης σε όλη την Ελληνική Επικράτεια συμπεριλαμβανομένου και των νησιωτικών περιοχών με βάση τα καλύ-

τερα διαθέσιμα γεωγραφικά δεδομένα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μοντέλων με βάση το μέγεθος της μέσης ετήσιας διάβρωσης ανά νομό διαπιστώνουμε ότι οι προβλέψεις των μοντέλων συμφωνούν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό. Τέλος, για να μπορέσουμε να καταρτίσουμε χάρτες οι οποίοι θα αποτυπώνουν τον κίνδυνο υποβάθμισης του εδάφους με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως επιτάσσει και η σχετική Ευρωπαϊκή Οδηγία (Ε.Ε. COM 232 2006), αλλά και να εκτιμήσουμε το μέγεθος του στερεοφορτίου που παράγεται στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής, είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων μεγαλύτερης κλίμακας σε συνδυασμό με μεθοδολογίες όπως η προτεινόμενη στην παρούσα εργασία. Η κλίμακα της μελέτης είναι εξαιρετικά μικρή για να προκύπτουν συμπεράσματα αξιοποιήσιμα σε επίπεδο σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων και διαχείρισης φυσικών πόρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γκούβας, Μ., Σακελλαρίου, Ν. και Ξυστράκη, Φ. (2007), *Εκτίμηση του Μέσου Ετήσιου και Μηνιαίου Υψους Υετού Στον Ελλαδικό Χώρο*, Αθήνα: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών: 1-27.
- Ε.Ε. COM 231 (2006), *Θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους*.
- Ε.Ε. COM 232 (2006), *Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τον καθορισμό πλαισίου προστασίας του εδάφους και την τροποποίηση της οδηγίας 2004/35/ΕΚ*.
- ΕΕΑ (2000), *European Commission programme to COoRdinate INformation on the Environment (Corine)*, European Environmental Agency.
- Κωτούλας, Δ. (1998), *Ορεινή Υδρονομική*, Θεσσαλονίκη: Τμήμα Εκδόσεων ΑΠΘ.
- Μάρης, Φ., Βασιλείου, Α., Δεληποστόλου, Δ. και Αϊδίνολου, Ζ. (2006), «Εκτίμηση της στερεοπαροχής στις ορεινές λεκάνες απορροής της νήσου Θάσου με τη χρήση της εξίσωσης εδαφικής απώλειας (U.S.L.E.) με τη συνεργασία των Γ.Σ.Π.», 10<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο της Ε.Υ.Ε., Ξάνθη 2006.
- Παπαϊωάννου, Δ. και Τάντος, Β. (2008), *Δασική Εδαφολογία*, Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Παπαμιχαήλ, Δ. (2001), *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*, Αθήνα: Γιαχούδης.
- Σαπουντζής, Μ., Μυρωνίδης, Δ., Στάθης, Δ. και Στεφανίδης, Π. (2009), «Σύγκριση των αποτελέσματα εφαρμογής των μεθόδων USLE και GAVRILOVIC με πραγματικές μετρήσεις μέσης ετήσιας διάβρωσης», Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ, Βόλος, 27-30 Μαΐου.
- Στάθης, Δ. και Σαπουντζής, Μ. (2002), «Εκτίμηση του στερεοφορτίου λεκάνης απορροής στη θέση κατασκευής φράγματος ταμείωσης νερού», 10<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο, Τρίπολη.
- Φωτιάκης, Δ., Σιδηρόπουλος, Ε., Τζιάφας, Γ., Εμμανουλούδης, Δ., Μυρωνίδης, Δ., Ρίγγος, Β. και Σιώτης, Γ. (2007), «Αποτίμηση του κινδύνου διάβρωσης του εδάφους στην χερσόνησο της Σιθωνίας με την χρήση της παγκόσμιας εξίσωσης εδαφικής απώλειας», 13<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο, Καστοριά, 7-10 Οκτωβρίου 2007.
- Χρυσάνθου, Β. και Πυλιώτης, Α., (1995), «Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σ' έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή», 6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη 1995.
- Bhattarai, R. και Dutta, D. (2007), «Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Using GIS at Catchment Scale», *Water resources management* 21(10), DOI: 10.1007/s11269-006-9118-z
- Castillo, V., Moscha, W., García, C., Barbera, G., Navarro Canoa, N. and López-Bermúdez, F. (2007), «Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain)», *Catena* 30(3): 416-427.
- Cebecauer, T. and Hofierka, T. (2008), «The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia», *Geomorphology* 98: 187-198.
- De Vente, Poesen, J., Verstraeten, G., van Rompaey, A. and Govers, G. (2008), «Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain», *Global and Planetary Change* 60: 393-415.
- E.E. (1985), *Soil Map of the European Communities at 1:1.000.000.*, The Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Coordination of Agricultural Research, Λουξεμβούργο: The Office for Official Publications of the European Communities,

124 σελ.

- Haan, C., Barfield, B. and Hayes, J. (1994), *Design Hydrology and Sedimentology for Small II Catchments*, Σαν Ντιέγκο: Academic Press.
- Hickey, R. (2000), «Slope angle and slope length solutions for GIS», *Cartography* 29: 1-8.
- Hudson, N. (1985), *Soil conservation*, Λονδίνο: Batsford Academic and Educational.
- Irvem, A., Topaloglu, F. και Uygur V. (2007), «Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey», *Journal of Hydrology* 336: 30-37.
- Jetten, V., De Roo, A. και Favis-Mortlock, D. (1999), «Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models», *Catena* 37: 521-541.
- Karyotis, Th. και Kosmas, C. (2011), «Soil erosion and conservation in Greece», 6th International Congress of the European Society for Soil, Θεσσαλονίκη, 9-14 Μαΐου 2011.
- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Bissonnais, Y. Le, Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. και Huting, J. (2003), *Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map*, εκδόχη 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2003 (Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 [S.P.I.04.73]). European Soil Bureau Research Report No.16, EUR 21176, 18pp. and 1 map in ISO B1 format), Λουξεμβούργο: Office for Official Publications of the European Communities.
- Kitahara, H., Okura, Y., Sammori, T. και Kawanami, A. (2000), «Application of Universal Soil Loss Equation (USLE) to mountainous forests in Japan», *Journal of Forest Research* 5: 231-236.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J. και King, D. (2001), «Mapping erosion risk for cultivated soil in France», *Catena* 46: 207-220.
- Le Roux, J., Morgenthal, T., Malherbe, J., Pretorius, D. και Sumner, P. (2008), «Water erosion prediction at a national scale for South Africa», *Water SA* 34(3).
- Lee S. (2004), «Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea», *Environmental Geology* 45: 457-465.
- McCoy, J. και Johnston, K. (2002), *Using ArcGIS Spatial Analyst*, ESRI PRESS.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A. και Jakeman, A.J. (2003), «A review of erosion and sediment transport models», *Environmental Modelling & Software* 18: 761-799.
- Mirco, G., Robert, J., Rusco, E. και Montanarella, L. (2003), *Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach*, European Soil Bureau Research Report No.11, EUR20677 EN, Λουξεμβούργο: Office for Official Publications of the European Communities.
- Morgan, R.P.C. (1995), *Soil erosion and Conservation*, δεύτερη έκδοση, Harlow: Longman.
- Myronidis, D., Emmanouloudis, D., Mitsopoulos, I. και Riggos, E. (2010), «Soil erosion potential after fire and rehabilitation treatments in Greece», *Environmental Modelling and Assessment*, 15(4): 239-250.
- Omafra, E. (2007), Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, Ontario Canada <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/00-001.htm>.
- Onyando, J., Kisoyan, P. και Chemelil, M. (2005), «Estimation of potential soil erosion for River Perkerra Catchment in Kenya», *Water Resources Management* 19: 133-143.
- Renfro, G.W. (1972), «Use of erosion equations and sediment-delivery ratios for predicting sediment yield, in "Sediment-yield workshop: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources"», Proceed. USDA Sedim. Labor. Oxford, Miss. USA.
- Schwertmann, U., Vogl, W. και Kainz, M. (1990), *Bodenerosion durch Wasser*, Στουτγάρδη: Eugen Ulmer.
- Sofios, S., Arabatzis, G., και Baltas, E. (2008), «Policy for management of water resources in Greece», *The Environmentalist* 28(3), DOI: 10.1007/s10669-007-9126-4.
- Williams, J.R. και Berndt, H.D. (1972), «Sediment yield computed with Universal equation», *J. Hydraul. Div. ASCE* 98: 2087-2098.
- Wischmeier, W.H. και Smith D.D. (1978), *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*, Agricultural Handbook no. 537, USDA, Ουάσινγκτον: Forest Service.
- Zhang, K., Douglas, B. και Leatherman, S. (2004), «Global Warming and Coastal Erosion», *Climatic Change* 64(1-2): 41-58.