



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ  
ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ  
ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ**

**Παπαπέτρου Μελπομένη**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2017**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Ν. Μαμάσης**

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμητικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με επιβλέπουσα τριμελή επιτροπή τους: Μαμάση Νικόλαο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, Παναγούλια Διονυσία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ και Μακρόπουλο Χρήστο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Μαμάση Νικόλαο, για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, την άριστη συνεργασία και τη διαρκή βοήθεια του.

Η επιλογή του θέματος έγκειται στον επιστημονικό μου κλάδο και παρόλο τον ελάχιστο χρόνο που διαθέτω λόγω ερχομού του παιδιού μου και των λοιπών οικογενειακών υποχρεώσεων έδωσα ότι καλύτερο μπορούσα.

Ευχαριστώ το οικογενειακό μου περιβάλλον ιδιαίτερα τους γονείς μου που από πάντα ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα της ζωής μου, φοιτητικής και μη...

Παπαέτρου Μελπομένη  
Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iv
Abstract	v
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο και σκοπός μελέτης .....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	2
<b>2 Επισκόπηση εννοιών και μεθοδολογιών</b>	<b>3</b>
2.1 Βασικές έννοιες και ορολογία .....	3
2.2 Εκτιμήσεις εδαφικής διάβρωσης και στερεοαπορροής.....	6
2.2.1 Εμπειρικά μοντέλα.....	6
2.2.2 Προσδιοριστικά μοντέλα .....	9
2.2.2.1 Μοντέλο CREAMS .....	9
2.2.2.2 Μοντέλο ANSWERS.....	9
2.2.2.3 Μοντέλο EPIC.....	10
2.2.2.4 Μοντέλο WEPP .....	10
2.2.2.5 Μοντέλο GHO .....	10
2.2.2.6 Μοντέλο γενικής συνθέσεως MO-SEM, τροποποιημένο μοντέλο διαβρώσεως.....	11
<b>3 Μεθοδολογία</b>	<b>12</b>
3.1 Μέθοδος RUSLE .....	12
3.2 Περιγραφή των συντελεστών της RUSLE.....	14
3.2.1 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R.....	14
3.2.2 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K .....	15
3.2.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS.....	17
3.2.4 Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης C.....	17
3.2.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης P.....	18
3.3 Συσχέτιση διάβρωσης-στερεοαπορροής – Συντελεστής στερεοαπορροής.....	18

<b>4 Μεθοδολογία κατά Πανάγο 2015</b>	<b>21</b>
4.1 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K).....	21
4.2 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) .....	31
4.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS) .....	40
4.4 Ο συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (C).....	44
4.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P).....	50
4.6 Η εκτίμηση της εδαφικής απώλειας από τη υδατική διάβρωση στην Ευρώπη .....	56
<b>5 Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στον Ελλαδικό χώρο</b>	<b>61</b>
5.1 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K).....	61
5.2 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) .....	67
5.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS) .....	73
5.4 Ο συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (C).....	75
5.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P).....	77
5.6 Εκτίμηση της εδαφικής απώλειας στην Ελλάδα .....	79
<b>6 Εκτίμηση της στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής στην Ελλάδα</b>	<b>81</b>
6.1 Υδρολογική λεκάνη του π. Αχελώου στη θέση του ταμειυτήρα Κρεμαστών .....	81
6.2 Υδρολογική λεκάνη της λίμνης Μαραθώνα .....	93
<b>7 Συμπεράσματα</b>	<b>105</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>108</b>

## Περίληψη

Σε μια περίοδο ραγδαίων αλλαγών, τόσο του κλίματος όσο και των χρήσεων γης, είναι ζωτικής σημασίας η αξιολόγηση της κατάστασης της εδαφικής διάβρωσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο, χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική μεθοδολογία. Η μεθοδολογία αυτή αφορά το εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της εδαφικής διάβρωσης, RUSLE. Το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, έχοντας συγκεντρώσει δεδομένα από όλες της χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκτιμά σε διάφορες αναλύσεις raster τους συντελεστές του μοντέλου αλλά και την ίδια την εδαφική διάβρωση (RUSLE2015). Τα αρχεία διατίθενται ελεύθερα χωρίς χρέωση στην ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού Κέντρου Εδάφους (<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion>).

Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K υπολογίζεται για τα 20.000 σημεία δειγματοληψίας που συλλέγονται στο πλαίσιο του προγράμματος LUCAS. Η παρεμβολή των σημείων γίνεται με ένα μοντέλο κυβιστικής παλινδρόμησης παράλληλα με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων και χαρακτηριστικών του εδάφους ώστε να παραχθεί ο χάρτης του συντελεστή K στη Ευρώπη με 500 m ανάλυση. Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας της βροχοπτώσης R υπολογίζεται χρησιμοποιώντας υψηλής ανάλυσης χρονικά δεδομένα βροχοπτώσης (5, 10, 15, 30 και 60 min) που συλλέγονται από 1.541 καλά κατανομημένους βροχομετρικούς σταθμούς σε όλη την Ευρώπη. Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης C υπολογίζεται στις μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό των χρήσεων γης και της πυκνότητας βλάστησης, ενώ στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις υπολογίζεται βάση της σύνθεσης των καλλιεργειών και των πρακτικών διαχείρισης της γης (μειωμένη/καθόλου άροση, καλλιέργειες που φυτεύονται προσωρινά και φυτικά υπολείμματα). Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS υπολογίζεται με το πρόσφατο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) σε 25 m ανάλυση εφαρμόζοντας τις εξισώσεις που προτείνουν οι Desmet και Govers (1996). Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης ή υποστηρικτικών πρακτικών P λαμβάνει υπόψη α) τη καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς καμπύλες που εφαρμόζεται λόγω των αγρο-περιβαλλοντικών πολιτικών της ΕΕ, και τη προστασία ενάντια στην εδαφική απώλεια που παρέχεται από (β) τους πέτρινους τοίχους και (γ) το γρασίδι στα περιθώρια του χωραφιού.

Τα δεδομένα επεξεργάζονται σε περιβάλλον λογισμικού γεωπληροφορικής (arcGIS), ώστε να αποδοθεί γραφικά για την Ελλάδα και τα επιμέρους Υδατικά Διαμερίσματα, υπό μορφή χαρτών ο κάθε συντελεστής, αλλά και να προσδιοριστούν οι πιο ευάλωτες στη διάβρωση περιοχές. Επίσης, βάσει των προσφερόμενων δυνατοτήτων των ΣΓΠ εξάγονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του κάθε συντελεστή και η τιμή της εδαφικής διάβρωσης στον Ελλαδικό χώρο και στους ταμιευτήρες των Κρεμαστών και Μαραθώνα. Εν συνεχεία υπολογίζεται ο συντελεστής στερεοαπορροής (Vanoni, 1975) για τον προσδιορισμό της στερεοαπορροής και γίνεται σύγκριση των προκύπτουσων τιμών με τις αντίστοιχες τιμές από παλαιότερες μελέτες.

## **Abstract**

In a period of rapid changes in both climate and land use, due to global change, it is vitally important to be able to assess the state of soil erosion at a European level, using an objective methodology. This methodology refers to the empirical model calculation of soil erosion, RUSLE equation. The Joint Research Centre (JRC) which is the European Commission's science and knowledge service, has obtained data from all EU countries to estimate the factors model in various raster analysis, and the soil erosion (RUSLE2015). The files are freely available without charge to the site of European Ground Centre (<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion>).

The K-factor is estimated for the 20,000 field sampling points included in the Land Use/Cover Area frame (LUCAS) survey and then interpolated with a Cubist regression model using spatial covariates such as remotely sensed data and terrain features to produce a 500 m resolution K-factor map of Europe. The R-factor is calculated based on high-resolution temporal rainfall data (5, 10, 15, 30 and 60 min) collected from 1.541 well-distributed precipitation stations across Europe. The C-factor was modelled in non-arable lands using a combination of land-use class and vegetation density while in arable lands C-factor is based on crop composition and land management practices (reduced/no tillage, cover crops and plant residues). The LS-factor is calculated using the recent Digital Elevation Model (DEM) at 25 m and applying the equations proposed by Desmet and Govers (1996). The P-factor takes into account a) contour farming implemented in EU agro-environmental policies, and the protection against soil loss provided by (b) stone walls and (c) grass margins.

The data processed in a environment of GIS software to create the maps of each RUSLE factor for Greece and the individual water districts, afterwards to identify the most vulnerable in erosion areas. Moreover, according to the offered possibilities by the GIS, exported the statistical characteristics of each factor and the value of soil erosion in Greece and in reservoirs of Kremasta and Marathona. Then is calculated the sediment delivery ratio (Vanoni, 1975) to determine the sediment yield in order to compare the result values with the corresponding values from previous studies.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο & σκοπός μελέτης

Η διάβρωση του εδάφους αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκαλεί αλυσιδωτά προβλήματα σε πολλές περιοχές της γης, ειδικότερα στις χώρες της Μεσογείου. Οι προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας θα πρέπει να οδηγούν πρώτα στην πρόληψη της και μετέπειτα εφόσον δεν είναι δυνατό στην αντιμετώπιση των κινδύνων που προκαλούνται από αυτή.

Το ενδιαφέρον από υδρολογική σκοπιά εστιάζεται περισσότερο στις διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης των φερτών υλικών. Σε λεκάνες απορροής ταμιευτήρων, τα φερτά υλικά που παράγονται με τη διαδικασία της διάβρωσης του εδάφους αποτίθενται ανάντη του φράγματος καλύπτοντας τον νεκρό όγκο του ταμιευτήρα. Η αύξηση του όγκου των φερτών υλικών συνεπάγεται πλήρωση του ταμιευτήρα πέρα του νεκρού όγκου με αποτέλεσμα την μείωση της αποθηκευτικής του ικανότητας, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τους σκοπούς για τους οποίους έχει κατασκευαστεί το φράγμα και μειώνει την οικονομική ζωή του έργου. Επομένως, μια ορθολογική διαχείριση ενός ταμιευτήρα πρέπει να περιλαμβάνει και εκτιμήσεις της εδαφικής διάβρωσης στις λεκάνες απορροής του, που εκ των πραγμάτων προηγείται της απόθεσης των φερτών υλικών σε αυτούς.

Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και στερεοπαροχής στον Ελλαδικό χώρο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα επίπεδα πληροφορίας των συντελεστών της Αναθεωρημένης Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδάφους RUSLE όπως έχουν εκτιμηθεί από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Εδάφους. Τα δεδομένα επεξεργάζονται σε περιβάλλον λογισμικού γεωπληροφορικής (arcGIS), ώστε να αποδοθεί γραφικά υπό μορφή χαρτών ο κάθε συντελεστής, αλλά και να προσδιοριστούν οι πιο ευάλωτες στη διάβρωση περιοχές. Επίσης, βάσει των προσφερόμενων δυνατοτήτων των ΣΓΠ εξάγονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του κάθε συντελεστή και η τιμή της εδαφικής διάβρωσης για την Ελλάδα, για τα Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας και για τους ταμιευτήρες των Κρεμαστών και Μαραθώνα.

## **1.2 Διάρθρωση εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που άπτονται της διεργασίας της διάβρωσης. Επίσης γίνεται αναφορά στα μοντέλα υπολογισμού της εδαφικής διάβρωσης και στις μεταβλητές που συνδέονται με αυτήν.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα χαρακτηριστικά που αφορούν το μοντέλο της RUSLE και τους συντελεστές της.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Εδάφους, με υπεύθυνο τον Παναγιώτη Πανάγο, για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στην Ευρώπη.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών της RUSLE για τον Ελλαδικό χώρο.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών της RUSLE για τους ταμιευτήρες στα Κρεμαστά και Μαραθώνα, εκτιμάται η στερεοαπορροή και συγκρίνεται με τιμές προηγούμενων μελετών.

Στο Κεφάλαιο 7 συμπυκνώνονται και σχολιάζονται τα συμπεράσματα.



## 2. Επισκόπηση εννοιών και μεθοδολογιών

### 2.1 Βασικές έννοιες και ορολογία

Η διάβρωση του εδάφους (Soil Erosion) ξεκινά όταν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την διηθητικότητα του εδάφους (Infiltration) ή σε μια άλλη περίπτωση, όταν η βροχή πέφτει σε ένα κορεσμένο με νερό έδαφος εξαιτίας προγενέστερων συνθηκών υγρασίας ή λόγω αυξημένης υπόγειας στάθμης νερού. Έτσι, μένει νερό στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο θα κινηθεί χαμηλότερα στο ανάγλυφο εφόσον υπάρχει εδαφική κλίση συμπαρασέρνοντας και έδαφος (Μισοπολινός, 1992).

Οι πέντε βασικοί παράγοντες που συνεπιδρούν στη φυσική διεργασία της διάβρωσης είναι η γεωλογία/εδαφολογία, η γεωμορφολογία, το υδρολογικό καθεστώς, η φυτοκάλυψη και ο ανθρώπινος παράγοντας.

Η εδαφική διάβρωση αρκετές φορές συγχέεται ή προσδιορίζεται με τον όρο εδαφική απώλεια (Soil Loss). Η εδαφική απώλεια ουσιαστικά αποτελεί την πρώτη φάση στη διεργασία της διάβρωσης, δηλαδή της απόσπασης μεμονωμένων εδαφικών τεμαχιδίων από τη μάζα του εδάφους, που προηγείται της δεύτερης φάσεως της μεταφοράς από το κινούμενο νερό ή τον άνεμο. Όταν όμως δεν παρέχεται ικανή ποσότητα ενέργειας για τη μεταφορά τότε λαμβάνει μέρος μια τρίτη φάση, η απόθεση. Εκφράζεται σε όρους μάζας εδαφικών υλικών στη μονάδα του χρόνου ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας της ανάντη λεκάνη απορροής (μάζα/χρόνος/επιφάνεια). Τα περισσότερα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης εκτιμούν σε πρώτο επίπεδο ποσότητες εδαφικής απώλειας και μετέπειτα –ενδεχομένως– ποσότητες μεταφοράς ή απόθεσης φερτών υλικών (Βαχαβιώλος, 2014).

Η μεταφορά των εδαφικών φερτών υλικών περιγράφεται με τον όρο στερεομεταφορά και συντελείται από τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Έννοιες σχετικές με τη στερεομεταφορά είναι οι παρακάτω (Ζαρρής κ.α., 2001):

Η στερεοαπορροή (Sediment Yield), είναι το φυσικό μέγεθος που μπορεί να εκφράσει και τις τρεις φάσεις της εδαφικής διάβρωσης (εδαφική απώλεια, μεταφορά και απόθεση). Εκφράζει τη συνολική μάζα των φερτών υλικών που παροχετεύονται από μια διατομή ενός υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας της ανάντη λεκάνη απορροής (μάζα / χρόνος / επιφάνεια).

Η στερεοπαροχή (Sediment Discharge), ακολούθως εκφράζει τη συνολική μάζα των φερτών υλικών που παροχετεύονται από μια διατομή ενός υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου χωρίς αναφορά στη λεκάνη απορροής (μάζα / χρόνος).

Ο συντελεστής στερεοαπορροής (Sediment Delivery Ratio) είναι ο λόγος της στερεοαπορροής προς την εδαφική απώλεια και εκφράζει το ποσοστό των φερτών υλικών που αποκολλήθηκαν από το έδαφος και τα οποία μεταφέρθηκαν μέσω της επιφανειακής απορροής μέχρι την υπόψη θέση του υδατορεύματος. Έμμεσα ο αριθμός αυτός εκτιμά και

την απόθεση, λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό των φερτών υλικών τα οποία αποτέθηκαν είτε στην επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής, είτε στις βάσεις των κλιτύων, είτε στην κοίτη και στις όχθες του υδρογραφικού δικτύου πριν μεταφερθεί στην υπόψη διατομή.

Το φερτά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με δύο τρόπους (Δ.Παναγούλια-Γ.Δήμου, Σημειώσεις Μηχανικής των Φερτών Υλικών):

(a) Με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς και διακρίνονται σε:

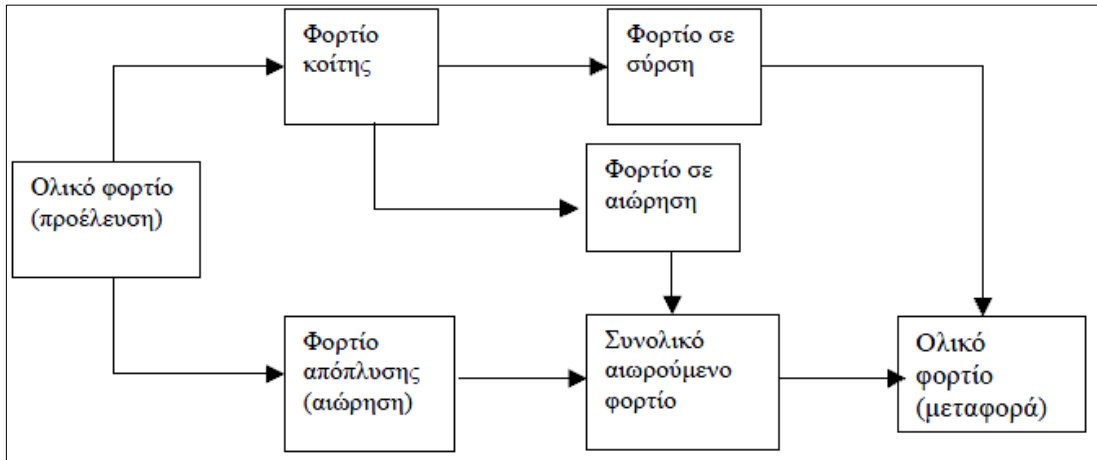
- Φορτίο σε αιώρηση (Suspended Load): τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Φορτίο σε σύρση (Bed Load): τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη.

Η διάκριση αυτή δεν 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). Χονδροειδώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ως φερτά υλικά σε σύρση είναι εκείνα με μέγεθος άνω των 0,85 mm, διάκριση που βασίζεται στο κριτήριο που αναφέρει ότι η ταχύτητα καθίζησης γίνεται ίση με τη συρτική ταχύτητα (Vanoni, 1975).

(b) Με βάση την προέλευση του υλικού και διακρίνονται σε:

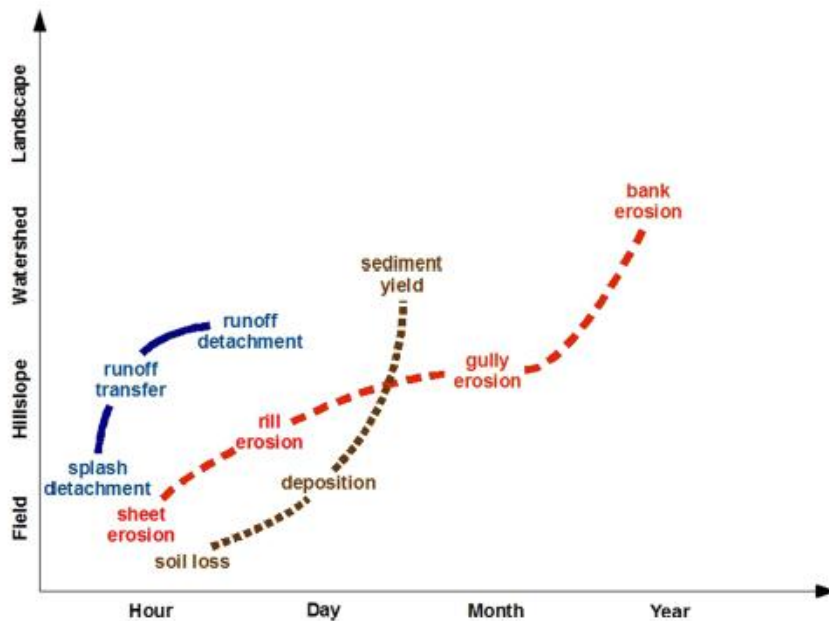
- Φορτίο κοίτης (Bed Material Load): μπορεί να είναι είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση και αναφέρεται σε φερτά υλικά που βρίσκονται ήδη στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου αποτελώντας τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους.
- Φορτίο απόπλυσης (Wash Load): παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών 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 κατανεμημένο στη διατομή της κοίτης του ποταμού. Η στερεοπαροχή του φορτίου απόπλυσης σε ένα τμήμα ενός υδατορεύματος εξαρτάται από το ρυθμό που τα φερτά υλικά είναι διαθέσιμα στη λεκάνη απορροής και όχι από τη στερεομεταφορική ικανότητα της ροής. Το φορτίο απόπλυσης ιδιαίτερα στις Μεσογειακές χώρες αποτελεί το συντριπτικό ποσοστό της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης και συνήθως μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων έντονων πλημμυρικών επεισοδίων το χρόνο.

Η σχηματική παρουσίαση των μορφών στερεομεταφοράς ως προς τις παραπάνω διακρίσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1.



**Εικόνα 2.1:** Μορφές στερεομεταφοράς ως προς την προέλευση και τον τρόπο μεταφοράς (Ζαρρής κ.α., 2001).

Η χωρική και χρονική κλίμακα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της διάβρωσης, στις μορφές που αυτή λαμβάνει αλλά και τις παραμέτρους που την καθορίζουν. Στην παρακάτω Εικόνα 2.2, συμπυκνώνονται τα σκέλη της διεργασίας της διάβρωσης (μπλε γραμμή), οι μορφές που λαμβάνει (κόκκινη γραμμή) και οι χαρακτηριστικές καταστάσεις εξέλιξης του φαινομένου (καφέ γραμμή) όπως εκτυλίσσονται ενδεικτικά σε χρονική και χωρική κλίμακα.



**Εικόνα 2.2:** Διεργασία της διάβρωσης (μπλε γραμμή), μορφές που λαμβάνει (κόκκινη γραμμή) χαρακτηριστικές καταστάσεις εξέλιξης (καφέ γραμμή) σε χώρο-χρονική κλίμακα (Karydas et al., 2012).

## 2.2 Εκτιμήσεις εδαφικής διάβρωσης και στερεοαπορροής

Το πρόβλημα της εκτίμησης της στερεοαπορροής σε μια θέση υδατορεύματος (Sediment Yield) είναι πολυσύνθετο, αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους με στοχαστικό χαρακτήρα αφενός και αφετέρου δεν υπάρχει κάποια αξιόπιστη διαδικασία μέτρησης των συγκεντρώσεων των φερτών υλικών είτε πρόκειται για φερτά σε αιώρηση είτε ακόμα περισσότερο για φερτά σε σύρση. Οι περισσότερες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς αφορούν είτε σε πειραματικές λεκάνες, είτε σε μικρές λεκάνες απορροής στην πιο σύνθετη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει γιατί σε τέτοια κλίμακα μπορεί πιο εύκολα να γίνει η μέτρηση και η κατανόηση των φυσικών διεργασιών.

Η μέτρηση της στερεοπαροχής είναι αρκετά τυποποιημένη όσον αφορά τα φορτία σε αιώρηση, περιλαμβάνοντας τη λήψη δειγμάτων από το ποτάμι και τον εργαστηριακό προσδιορισμό της περιεκτικότητας τους σε αιωρούμενα φερτά, ενώ τα τελευταία χρόνια διατίθενται και αισθητήρες για την πραγματοποίηση των 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 ζύγισης τους. Η διαδικασία είναι πέρα από ακριβή και χρονοβόρα δεδομένου ότι ο ρυθμός στερεοπαροχής των συρόμενων εξαρτάται σημαντικά από την πραγματοποίηση ιδιαίτερα ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων και την προηγούμενη κατάσταση της λεκάνης.

Οι δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων για την εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής είναι οι εμπειρικές (επαγωγικές) συσχετίσεις (με τα αντίστοιχα μοντέλα) και τα προσδιοριστικά/εννοιολογικά μοντέλα, που και αυτά βέβαια σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό περιέχουν και μια βάση εμπειρικών συσχετίσεων που υποβοήθησε στην ανάπτυξή τους.

Παρακάτω, αναπτύσσονται ενότητες για τους δύο τύπους μοντέλων, μεταξύ των οποίων σημειώνεται πως δε μπορεί πάντα να τεθεί ένας σαφής διαχωρισμός. Παρουσιάζεται επίσης και μία μετρητικού τύπου λύση, η μέτρηση αποθέσεων σε ταμιευτήρες, που 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 στη διαχείριση φυσικών πόρων αλλά και των υψηλών τεχνικοοικονομικών απαιτήσεων (Βαχαβιώλος, 2014).

### 2.2.1 Εμπειρικά μοντέλα

Με τον όρο εμπειρικά μοντέλα στερεοαπορροής μπορούν να χαρακτηριστούν 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. Μπορούν όμως να χρησιμοποιούνται, σε περιπτώσεις αδυναμίας

προσδιορισμού της στερεοαπορροής με ακριβέστερες και ακριβότερες τεχνικοοικονομικά λύσεις και με την προϋπόθεση 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 εξαιρετική απλότητα και η ευκολία στη χρήση.

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.

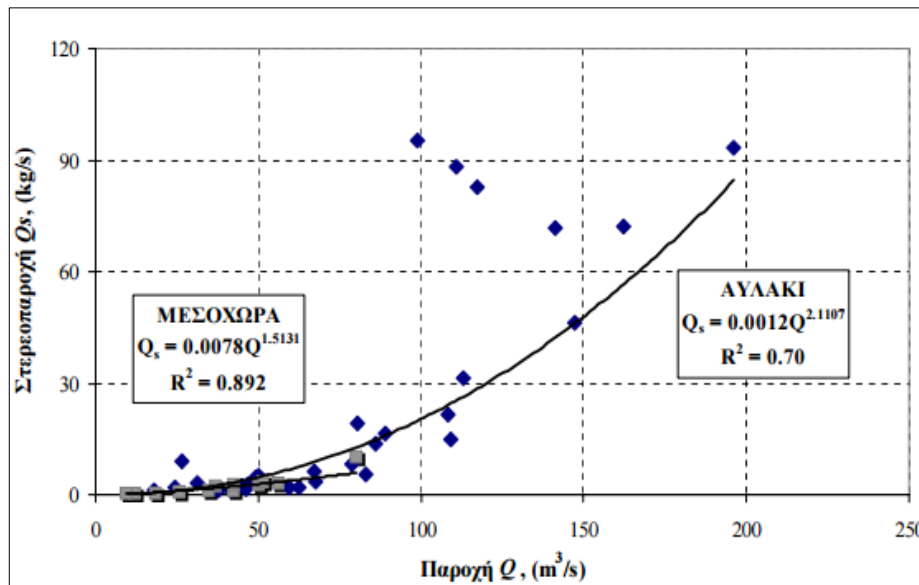
Η συσχέτιση των μεγεθών παροχής-στερεοπαροχής παρουσιάζει, λόγω της πολυπλοκότητας των διεργασιών, αυξημένη μεταβλητότητα οδηγώντας σε μειωμένη αξιοπιστία των εκτιμήσεων στερεοαπορροής. Η μεταβλητότητα είναι τέτοια που μπορεί να εμφανιστούν περιπτώσεις που σε μία τιμή παροχής αντιστοιχούν τιμές στερεοπαροχής δύο και τρεις τάξης μεγέθους διαφορετικές.

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

$$Q = a \cdot S^b \quad (2.1)$$

Όπου  $a$  και  $b$  οι παράμετροι συσχέτισης.

Μια χαρακτηριστική καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής παρουσιάζεται από την Εικόνα 2.3, για τις δύο θέσεις του π. Αχελώου ως μια ενιαία εξίσωση δύναμης για όλο το εύρος των μετρημένων παροχών. Το εύρος διακύμανσης των παροχών στη Μεσοχώρα είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το Αυλάκι. Ειδικότερα για το Αυλάκι, διαπιστώνεται ότι για τις μεγάλες παροχές οι στερεοϋδρομετρήσεις συγκεντρώνονται στην πάνω πλευρά της καμπύλης παροχής– στερεοπαροχής, με αποτέλεσμα η εφαρμογή των υψηλών παροχών στις καμπύλες να οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση των στερεοπαροχών στις παροχές αυτές, κατά τις οποίες μεταφέρεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ετήσιας στερεοαπορροής. Αυτό οφείλεται προφανώς στο σημαντικό αριθμό στερεοϋδρομετρήσεων στις μικρές παροχές, των οποίων η επίδραση στη συσχέτιση είναι ιδιαίτερα σημαντική (<http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=6064>).



**Εικόνα 2.3:** Καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής για τις θέσεις Αυλάκι και Μεσοχώρα (οι στερεοϋδρομετρήσεις στο Αυλάκι εμφανίζονται με ρόμβους ενώ οι αντίστοιχες στη Μεσοχώρα με τετράγωνα).

Οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής αποτελούν ουσιαστικά ένα εμπειρικό μοντέλο καθώς συσχετίζονται με μια απλή γραμμική παλινδρόμηση οι φυσικοί λογάριθμοι των δύο μεγεθών. Παρόμοιες συσχετίσεις (π.χ. μη - γραμμική ή / και πολλαπλή παλινδρόμηση) με υδρολογικές (π.χ. βροχόπτωση, απορροή) ή και φυσιογραφικές παραμέτρους οδήγησαν στην ανάπτυξη απλών εμπειρικών μοντέλων στερεοαπορροής, όπως οι Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987.

Το πιο διαδεδομένο από τα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης είναι η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας ΠΕΕΑ (Universal Soil Loss Equation (USLE)) (Wischmeier and Smith, 1965). Το μοντέλο, που εκτιμά εδαφική απώλεια, αναπτύχθηκε αξιοποιώντας μεγάλη βάση δεδομένων διάβρωσης στις ΗΠΑ, βασιζόμενο και σε εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση των διαφόρων παραγόντων. Με την πάροδο των δεκαετιών και τις αναθεωρήσεις ή τροποποιήσεις που επιχειρήθηκαν –MUSLE και RUSLE–, η μέθοδος απέκτησε περισσότερα χαρακτηριστικά προσδιοριστικού μοντέλου. Σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η ευκολία στη χρήση και η μεγάλη εφαρμογή που απολαμβάνει παγκοσμίως, ενώ στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται η αδυναμία εκτίμησης ποσοτήτων απόθεσης και στερεοαπορροής.

Βασισμένο σε δεδομένα από λεκάνες απορροής των Βαλκανίων, το μοντέλο Gavrilovic 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.

Άλλα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι του Corbel, του Fournier και του Kronfellner – Kraus ή του μέγιστου δυνατού στερεοφορτίου (Βαχαβιώλος, 2014).

### 2.2.2 Προσδιοριστικά μοντέλα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πιο δεδομένα προσδιοριστικά (αναλυτικά) μοντέλα εδαφικής διάβρωσης.

#### 2.2.2.1 Μοντέλο CREAMS

Το μοντέλο CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) είναι κατ' αρχήν ένα μοντέλο μεταφοράς ρύπων, συνδυάζει όμως τη πρόβλεψη της βροχόπτωσης, τη διάβρωση και τη χημική μεταφορά από τα γεωγραφικά συστήματα διαχείρισης. Ουσιαστικά αποτελείται από τα τρία παρακάτω υπό-μοντέλα:

- Το μοντέλο των υδρολογικών διαδικασιών.
- Το μοντέλο των διαβρωτικών διαδικασιών.
- Το μοντέλο των χημικών διεργασιών στο έδαφος.

Χρησιμοποιείται μόνο για εκτιμήσεις σε μεμονωμένες επιφάνειες, όπου όμως στην έννοια της επιφάνειας περιέχεται, εκτός από την περιοχή απαγωγής, και εκείνη της απόθεσης των υλικών στο κάτω πέρασ της επιφάνειας (Κωτούλας, 2001).

#### 2.2.2.2 Μοντέλο ANSWERS

Το μοντέλο ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershead and Enviromment Response Simulation) αναπτύχθηκε κυρίως για λεκάνες απορροής. Η διαδικασία της υποβάθμισης εκφράζεται και για ολόκληρες λεκάνες απορροής με μέγιστη έκταση 10.000 ha. Για το σκοπό αυτό κατανέμεται μια λεκάνη απορροής σε 1.700 τετραγωνικές επιφάνειες με έκταση  $1\div 4$  ha (μέγιστος αριθμός επιφανειών: 1.700), ώστε να είναι δυνατόν να επικρατούν σε κάθε επιφάνεια οι ίδιες παράμετροι διάβρωσης.

Διακρίνονται δύο τρόποι διαχωρισμού των επιφανειών αυτών στη λεκάνη ως εξής:

- Διαχωρισμός με απορροή κατά επιφάνειες και
- Διαχωρισμός με απορροή κατά γραμμές.

Σε κάθε λεκάνη απορροής μπορούν να χρησιμοποιούνται έως 20 τυπικές κατηγορίες εδαφών, για τις οποίες θα πρέπει να παρέχονται δεδομένα σε ό,τι αφορά τις φυσικές ιδιότητές του (πορώδες, διαπερατότητα, διήθηση), τη διαβρωσιμότητα, την αρχική περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους κλπ. Επίσης μπορούν να δοθούν έως 20 παράμετροι, που περιγράφουν το είδος χρήσης τω υπό έρευνα επιφανειών και παρέχουν πληροφορίες για την υδατοσυγκράτηση, την τραχύτητα των ρείθρων, τον παράγοντα κάλυψης και κατεργασίας C, και τον παράγοντα P στη μέθοδο USLE. Για κάθε τετράγωνη επιφάνεια δίνονται επίσης στοιχεία για την έκθεση, το μήκος και την κλίση της κλιτύς.

Η μέθοδος παρέχει ως τελικό αποτέλεσμα τη χρονική πορεία της απορροής στο κατώτατο πέρας της λεκάνης και το καθαρό φορτίο της (εξαγόμενη μείον εισαγόμενη ποσότητα) για όλα τα τετράγωνα (Κωτούλας, 2001). Ως πλεονέκτημα της μεθόδου θεωρείται η δυνατότητα εφαρμογής της σε τοπία με έντονη διάβρωση.

#### 2.2.2.3 Μοντέλο EPIC

Το μοντέλο EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) παίρνει υπόψη της τόσο την υδατική, όσο και την αιολική διάβρωση. Χρησιμοποιείται για την πρόγνωση των απωλειών συγκομιδής σε διαβρωνόμενες επιφάνειες. Επίσης η μέθοδος διερευνά τη σχέση μεταξύ μεθόδου καλλιέργειας, κινδύνου διάβρωσης, απώλειας θρεπτικών συστατικών και δαπανών λίπανσης.

Συνίσταται από περισσότερα επιμέρους μοντέλα, τα οποία περιγράφουν τις υδρολογικές εξελίξεις, τη διαδικασία της διάβρωσης, τη μετακίνηση των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος κλπ. Τέλος με την βοήθεια ενός ειδικού μοντέλου που περιγράφει την αύξηση των φυτών, καθίσταται δυνατή η παροχή οικονομικών πληροφοριών. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει αποτελέσματα τόσο σε ημερήσια βάση και για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η εφαρμογή της όμως απαιτεί πολύ μεγάλο αριθμό δεδομένων (Κωτούλας, 2001).

#### 2.2.2.4 Μοντέλο WEPP

Το μοντέλο WEPP (Water Erosion Prediction Project) έχει πλέον προσδιοριστικό χαρακτήρα σε σχέση με τα τρία προηγούμενα μοντέλα. Προσομοιώνει πολλές από τις φυσικές διεργασίες που είναι σημαντικές στη διάβρωση του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της διήθησης, της απορροής, της βροχόπτωσης και της απόσπασης της ροής, της μεταφοράς ιζημάτων, της απόθεσης, της ανάπτυξης των φυτών και της αποσύνθεσης των υπολειμμάτων. Το μοντέλο WEPP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κοινές εφαρμογές σε πλαγιές λόφων και για μικρές λεκάνες.

#### 2.2.2.5 Μοντέλο GHO

Το ελβετικό μοντέλο GHO (Groupe de travail pour l'hydrologie operationnelle) παρέχει το συνολικό φορτίο φερτών υλών, το οποίο παράγουν και μεταφέρουν μικρά χειμαρρικά ρεύματα (ιδίως χείμαρροι των ορεινών, πολύ ορεινών και αλπικών περιοχών) κατά τη διάρκεια ενός απορροϊκού γεγονότος.

Εφαρμόζεται σε ορεινές λεκάνες απορροής με έκταση συνήθως έως 50 km<sup>2</sup>. Συνεπώς, η μέθοδος ενδείκνυται για ορεινές περιοχές και αφορά κυρίως κινητούς πυθμένες με αδρομερή φερτά υλικά, τα οποία μεταφέρονται με παραπυθμένα κίνηση (στερεομεταφορά) και με μαζική μεταφορά (χειμαρρολάβη).

Όπως και οι αντίστοιχες αμερικάνικες μέθοδοι, η ελβετική μέθοδος δεν είναι πλήρως προσδιοριστική. Ο βαθμός όμως των στοχαστικών (εμπειρικών) δεδομένων που δέχεται, είναι περιορισμένος. Η μέθοδος δεν υποκαθιστά, αλλά συμπληρώνει τις αμερικανικές



μεθόδους, οι οποίες όπως αναφέρθηκε, προσιδιάζουν για γεωργικά καλλιεργούμενες, λοφώδεις λεκάνες απορροής και αφορούν στη γενική διάβρωση που συνίσταται μόνο από αιωροϋλικά.

Η διαδικασία εφαρμογής της γίνεται σε τρεις φάσεις, ως εξής:

- προκαταρτικές εργασίες
- εργασίες υπαίθρου
- επεξεργασία στοιχείων, αποτελέσματα.

Η ελβετική μέθοδος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την υδρονομική πράξη στην ορεινή χώρα μας ιδίως σε ότι αφορά τα χειμαρρικά ρεύματα των ορεινών και πολύ ορεινών περιοχών της (Κωτούλας, 2001).

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία μοντέλων που ανήκουν μεν στα γενικής συνθέσεως, πλην όμως αναφέρονται σε μέση χρονική κλίμακα (μήνας, έτος), όπως τα εμπειρικά και όχι σε στιγμιαίες χρονικές συνθήκες (πρώτα λεπτά, ώρες).

Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το MO-SEM που ουσιαστικά αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή του SEM, για μέσες χρονικές συνθήκες (μήνας, έτος).

#### *2.2.2.6 Μοντέλο γενικής συνθέσεως MO-SEM, τροποποιημένο μοντέλο διαβρώσεως*

Το μοντέλο αυτό είναι σπονδυλωτό και περιλαμβάνει τα εξής στάδια υπολογισμού:

- Προσδιορισμός της ποσότητας παραγόμενων φερτών λόγω αποκόλλησης εδαφικού υλικού και μεταφοράς του από την βροχόπτωση (Rainfall Splash Detachment).
- Υπολογισμός της επιφανειακής απορροής (Overland Flow).
- Μεταφορική ικανότητα σε φερτά της απορροής και πραγματικό στερεοφορτίο λόγω επιφανειακής απορροής (Transport Capacity Of Overland Flow And Flow Entrainment).
- Συνολικό φορτίο φερτών και καθαρή διάβρωση/απόθεση (Total Sediment Load And Net Erosion/Deposition).

Το πλέον αξιόλογο χαρακτηριστικό του MO-SEM είναι ότι ως μοντέλο χωρικής κατανομής επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό των ευπαθών στη διάβρωση περιοχών, στο εσωτερικό μιας υδρολογικής λεκάνης. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη λήψη μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας και ελέγχου της διάβρωσης στις πλέον «ευάλωτες» περιοχές λεκανών με ορεινό ή και ημιορεινό ανάγλυφο.

Στο πλαίσιο εισαγωγής των δεδομένων εισόδου, η υδρολογική λεκάνη διακριτοποιείται σε «μονάδες επιφάνειας», συνήθως τετραγωνικού σχήματος, στο οριζόντιο επίπεδο, σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων. Στη συνέχεια τα στάδια υπολογισμού του μοντέλου εφαρμόζονται σε κάθε μια μοναδική λεκάνη, λαμβάνοντας υπόψη την επικοινωνία των

μοναδικών λεκανών με βάση το ανάγλυφο της περιοχής, υιοθετώντας μια σειρά απλουστευτικές παραδοχές.

### 3. Μεθοδολογία

#### 3.1 Μέθοδος RUSLE

Η μέθοδος RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation (Renard et al., 1997) αποτελεί την αναθεωρημένη έκδοση της USLE - Universal Soil Loss Equation (Wischmeier and Smith, 1978). Μαζί με τη MUSLE – Modified Universal Soil Loss Equation, που αποτελεί διάβρωση σε επίπεδο πλημμυρικού επεισοδίου και για την εκτίμηση της εδαφικής απώλειας χρησιμοποιούνται όροι απορροής και όχι βροχής (όπως στις άλλες δύο), αποτελούν την «οικογένεια» των USLE μοντέλων.

Η RUSLE είναι εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας που προκαλείται από επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση. Ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων εδαφικής διάβρωσης αποτελώντας το πιο διαδεδομένο του είδους παγκοσμίως. Η μέθοδος και οι αναθεωρήσεις της έχουν προκύψει ως επιστέγασμα δεκαετιών ερευνητικής ανάπτυξης από ερευνητές, πανεπιστήμια αλλά και αρμόδιες για τη γεωργία και τη διαχείριση εδαφικών και υδατικών πόρων υπηρεσιών στις ΗΠΑ.

Η USLE ως ολοκληρωμένο τεχνολογικό εργαλείο για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1965 (Wischmeier and Smith, 1965) στο εγχειρίδιο 282 του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ, ενώ η αναθεώρησή της (Wischmeier and Smith, 1978) περιγράφεται στο εγχειρίδιο 537. Η RUSLE ως πλήρως μηχανογραφημένη έκδοση δημοσιεύτηκε αρχικά το 1991 (Renard et al., 1991) και περιέχεται στο εγχειρίδιο 703 (Renard et al., 1997).

Η μέθοδος βασίζεται στην παρακάτω πολλαπλασιαστική σχέση:

$$= \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

Όπου:

A: χωρικά και χρονικά (συνήθως ετήσια) μέση εδαφική απώλεια ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )

R: συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) (Rainfall Erosivity factor)

K: συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους ( $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) (Soil Erodibility factor)

L: συντελεστής μήκους κλίσης (-) (Slope Length factor)

S: συντελεστής βαθμού κλίσης (-) (Slope Steepness factor)

C: συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (-) (Cover Management factor)

P: συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (-) (Support Practice factor)

Αναφορικά με τις μονάδες της παραπάνω σχέσης, η μέση εδαφική απώλεια λαμβάνει τις μονάδες που επιλέγονται για το συντελεστή διαβρωσιμότητας K και για το χρονικό διάστημα που επιλέγεται για το συντελεστή διαβρωτικότητας R.

Η USLE αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης πολυετούς χρονικής κλίμακας σε συγκεκριμένες εδαφικές κλίσεις και για συγκεκριμένες χρήσεις γης και διαχειριστικές πρακτικές (καλλιέργειες, βοσκότοποι). Σύμφωνα με το θεμελιωτή της (Wischmeier, 1976), η μέθοδος δημιουργήθηκε για να καθοδηγεί την επιλογή διαχειριστικών πρακτικών σε καθορισμένες εκτάσεις, για την εκτίμηση της ενδεχόμενης μείωσης της εδαφικής απώλειας σε περίπτωση υιοθέτησης μιας διαχειριστικής πρακτικής, τον καθορισμό της αποδεκτής έντασης καλλιεργειών για εναλλακτικά διαχειριστικά μέτρα και τέλος τον προσδιορισμό των μέγιστων αποδεκτών μηκών κλίσεως πλαγιάς για δοσμένο τύπο καλλιέργειας και διαχειριστικής πρακτικής. Ταυτόχρονα, η USLE δε συνίσταται για χρήση σε περιοχές όπου οι συντελεστές της εξίσωσης δε μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν, σε λεκάνες απορροής με σύνθετες (φυσικές και ανθρωπογενείς) χρήσεις γης (με προσαρμογές όπως η επιλογή μέσων τιμών για μεγέθη όπως τα μήκη κλίσης πλαγιάς) και για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης από επιμέρους επεισόδια βροχόπτωσης (Βαχαβιώλος Φ., 2014).

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω παράθεση, αρχικά η USLE αναπτύχθηκε αποκλειστικά και μόνο για εκτίμηση της εδαφικής απώλειας σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Με την πάροδο όμως των δεκαετιών, αφενός με την αναθεώρηση και βελτίωση της μεθόδου μέσω της RUSLE που περιλαμβάνει αναθεωρημένους τύπους για τη διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης, τιμές και για άλλες, πλέον της καλλιεργήσιμης, χρήσεις γης (Renard and Freimund, 1994), και βελτιωμένες σχέσεις για συνθετότερες και πιο απότομες εδαφικές κλίσεις, και αφετέρου με την εφαρμογή από μια σειρά ερευνητές του μοντέλου σε επίπεδο λεκάνης απορροής και όχι αγρού σε μεγάλη ποικιλία κλιμάτων και περιοχών ανά την υφήλιο, η αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα της μεθόδου μπορεί πλέον να θεωρηθεί άκρως ικανοποιητική για χρήση της σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Βασική βέβαια προϋπόθεση της σωστής χρήσης, είναι, όπως σε κάθε εφαρμογή μοντέλου, η σωστή κρίση του μελετητή και η εξοικείωση με τη φυσική διαδικασία και τη μέθοδο που αυτή μελετάται, με τις κατάλληλες προσαρμογές και επιλογές παραμέτρων.

Στα πλεονεκτήματα της USLE σε σχέση με άλλα μοντέλα διάβρωσης περιλαμβάνονται η ευκολία στη χρήση και η ταχύτητα στην εφαρμογή, τόσο λόγω της βασικής και απλής δομής που ακολουθεί και συνάμα της μεγάλης δυνατότητας βιβλιογραφικών αναφορών.

Από την άλλη, το αδύναμο σημείο του μοντέλου είναι η αδυναμία σύνδεσης της εδαφικής διάβρωσης/απώλειας με τη στερεοαπορροή. Η λειτουργία της USLE συνίσταται στην εξαγωγή αποτελεσμάτων εδαφικής διάβρωσης, με τους υπολογισμούς να περιορίζονται στην εκτίμηση εδαφικής απώλειας (στις περιοχές που ενυπάρχει η δυνατότητα παραγωγής φερτών υλικών), μην περιλαμβάνοντας την επίδραση και τον καθορισμό των περιοχών

απόθεσης, και τον προσδιορισμό του κλάσματος της διάβρωσης που μετατρέπεται σε στερεοαπορροή στη φυσική αλυσίδα διάβρωση-μεταφορά-εναπόθεση-απορροή.

Συνοψίζοντας τα συν και τα πλην, η USLE πλεονεκτεί στην ευκολία χρήσης και εφαρμογής και μειονεκτεί όντας αποκλειστικά μοντέλο διάβρωσης και όχι διάβρωσης και στερεοαπορροής (Βαχαβιώλος, 2014).

Το πρόβλημα μεγενθύνεται όταν η USLE/RUSLE χρησιμοποιείται ως εργαλείο υδρολογικής και όχι εδαφολογικής ή γεωργικής διαχείρισης. Στις περιπτώσεις αυτές, η μέθοδος εφαρμόζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής, όπου το ενδιαφέρον δεν περιορίζεται στην εκτίμηση της παραγωγής εδαφικής διάβρωσης συγκεκριμένων περιοχών και χρήσεων γης, αλλά επεκτείνεται στον προσδιορισμό της ποσότητας φερτών υλικών που τελικά θα μεταφερθεί μέσω του υδρογραφικού δικτύου εκτός της λεκάνης αναφοράς, δηλαδή της στερεοαπορροής.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος και της συσχέτισης της εδαφικής διάβρωσης με τη στερεοαπορροή, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής – συνήθως αναφέρεται ως συντελεστής στερεοαπορροής SDR (Sediment Delivery Ratio), που πολλαπλασιάζεται με την εκτιμημένη ποσότητα εδαφικής διάβρωσης για να προκύψει η ποσότητα φερτών υλικών που απορρέει. Η έρευνα γύρω από το συντελεστή στερεοαπορροής ξεκινά ήδη από τη δεκαετία του 1960 και οι πιο συνήθεις συσχετίσεις για τον προσδιορισμό του είναι είτε με την έκταση της λεκάνης απορροής είτε με γεωμορφολογικά/φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης ή/και του υδρογραφικού δικτύου (Βαχαβιώλος, 2014). Εκτενέστερη αναφορά στο SDR γίνεται στο υποκεφάλαιο 3.3.

### **3.2 Περιγραφή των συντελεστών της RUSLE**

#### *3.2.1 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R*

Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης θεωρείται πως έχει τη σημαντικότερη επίδραση στο ενδεχόμενο ανάπτυξης εδαφικής διάβρωσης (Renard and Freimund, 1994). Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R (Rainfall Erosivity factor) ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), στηρίζεται στην ανάλυση των εγχειριδίων των USLE και RUSLE, όπως αυτή περιγράφεται από τους Wischmeier and Smith (1978) και Renard et al. (1997).

Για τον υπολογισμό όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστων και αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων είναι επιθυμητή η ύπαρξη πολυετών (>20 ετών) αναλυτικών δεδομένων βροχογράφου. 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.

Ο συντελεστής διαβρωτικότητας R, εν προκειμένω ο μέσος ετήσιος, προκύπτει ως το άθροισμα των συντελεστών διαβρωτικότητας των επιμέρους επεισοδίων βροχής κατά τη

διάρκεια του έτους. Οι τιμές διαβρωτικότητας προκύπτουν από τον υπολογισμό του δείκτη διαβρωτικότητας E130 για κάθε επεισόδιο, όπου ο όρος E (MJ ha<sup>-1</sup>) αντιπροσωπεύει την ενέργεια του επεισοδίου βροχής και I30 (mm h<sup>-1</sup>) είναι η μέγιστη ένταση μισάωρου.

### 3.2.1 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K

Σύμφωνα με τα εγχειρίδια των USLE και RUSLE, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους K (Soil Erodibility factor) (t h MJ<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>) προσδιορίζεται μέσω νομογραφημάτων όπως αυτό της Εικόνας 3.1, ή, στην περίπτωση εδαφών με περιεκτικότητα σε άργιλο <70%, μέσω της σχέσης των Wischmeier and Smith, 1978.

$$K = [2.1 \cdot 10^{-4} (12 - \text{C})^{1.14} + 3.25 (\text{A} - 2) + 2.5 (\text{S} - 3)] / 100 \quad (3.2)$$

Όπου:

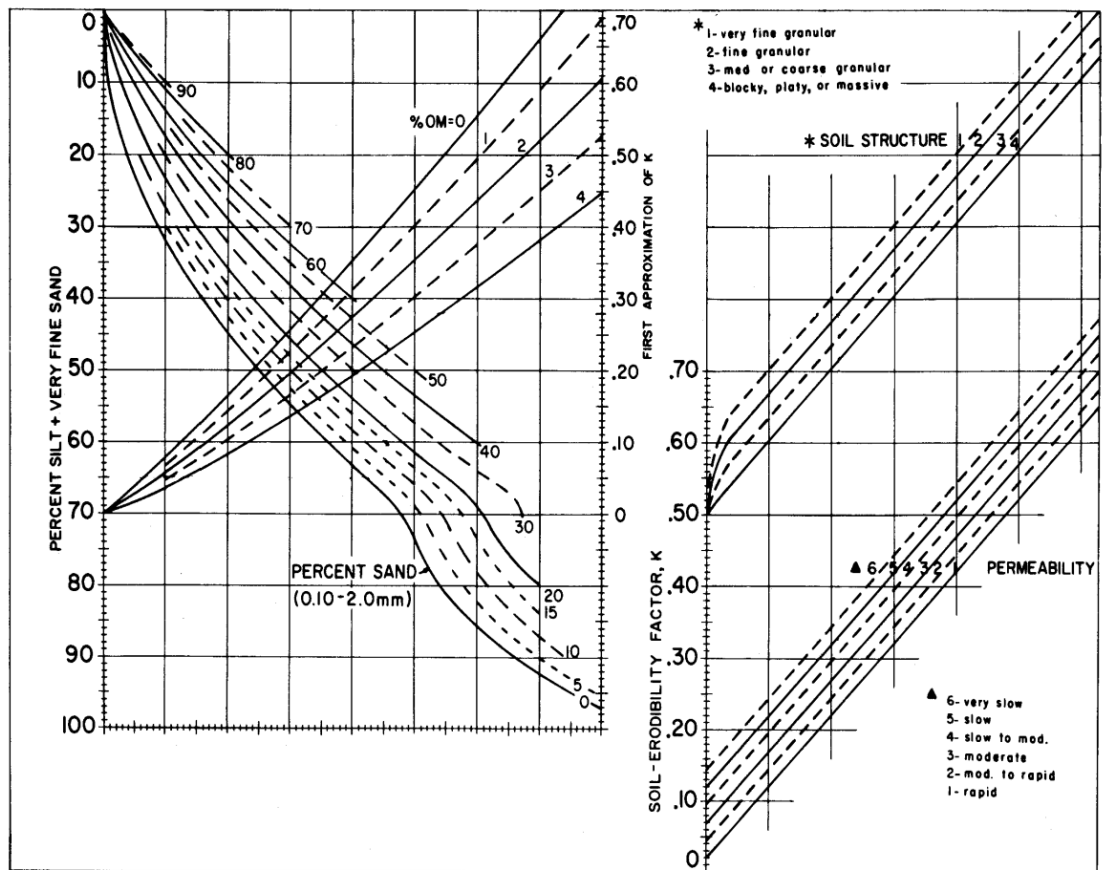
C : οργανική ουσία (%)

A : δομή επιφανειακής εδαφικής στρώσης [(100-Ac)\*(L+Armf)], όπου Ac ποσοστό αργίλου (<0,002mm), L ποσοστό ιλύος (0,002~0,05mm), Armf ποσοστό άμμου (0,05~0,1mm)

S : εδαφική δομή

: διαπερατότητα εδάφους

Η τομή της καμπύλης του επιλεγόμενου ποσοστού ιλύος και της καμπύλης του ποσοστού της άμμου υπολογίζει την τιμή της παραμέτρου M πάνω στην οριζόντια κλίμακα του νομογραφήματος (το ποσοστό της αργίλου υπολογίζεται ως 100 μείον το ποσοστό της άμμου και της ιλύος). Όταν το κλάσμα της ιλύος και πολύ λεπτής άμμου υπερβαίνει το 70%, τα δεδομένα υποδεικνύουν μια μεταβολή στη σχέση της παραμέτρου M με τη διαβρωσιμότητα. Αυτή η αλλαγή αποδόθηκε εμπειρικά στις κλίσεις των καμπυλών της άμμου στο σημείο της τομής αλλά δεν έχει περιγραφεί από αριθμητική εξίσωση.



The soil-erodibility nomograph. Where the silt fraction does not exceed 70 percent, the equation is  $100 K = 2.1 M^{1.14} (10^{-4}) (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3)$  where  $M = (\text{percent si} + \text{vfs}) (100 - \text{percent c})$ ,  $a = \text{percent organic matter}$ ,  $b = \text{structure code}$ , and  $c = \text{profile permeability class}$ .

**Εικόνα 3.1:** Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας K.

Η πιο δόκιμη διαδικασία για τον καθορισμό του K 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.

Βέβαια, 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 από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Η πρακτική αυτή μπορεί αν μην είναι η πλέον ορθή, ακολουθείται όμως ήδη από τις πρώτες δεκαετίες εφαρμογής της USLE, καθώς στο εγχειρίδιο της μεθόδου (Wischmeier and Smith, 1978) επισυνάπτονται τιμές K για μια σειρά εδαφών (Βαχαβιώλος, 2014).

Εξέλιξη πάνω στον προσδιορισμό του K αποτελεί η δημοσιευμένη εργασία των Panagos et al. (2014), που εκτός της μεγαλύτερης συγκέντρωσης αποτελεσμάτων K ανά την Ευρώπη, έχει δημιουργηθεί χάρτης που απεικονίζει τις διάφορες τιμές του K για όλες τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. στην αξιοσημείωτη ανάλυση της 500x500m διάστασης κελιού κανάβου και, για πρώτη φορά εισάγεται στην ανάλυση για το προσδιορισμό του K και η επίδραση των βραχωδών εξαπλώσεων – συμπαγών ή μη. Οι βραχώδεις εξαπλώσεις που στις

περισσότερες, αν όχι σε όλες των περιπτώσεων δε λαμβάνονταν υπ' όψη στους υπολογισμούς του K, με συνέπεια τη συστηματική υπερεκτίμησή του. Ιδιαίτερα δε στις περιοχές της λεκάνης της Μεσογείου, και κατά συνέπεια και στην Ελλάδα καταλαμβάνουν σημαντικές εκτάσεις, με αποτέλεσμα η παρουσία αυτής της σημαντικής εξάπλωσης να δρα ανασταλτικά στην παραγωγή εδαφικής διάβρωσης και ακολούθως να απομειώνονται οι συντελεστές εδαφικής διαβρωσιμότητας έως και 40% σε ορισμένες περιπτώσεις περιοχών του ελληνικού χώρου.

### *3.2.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS*

Ο συντελεστής μήκους και βαθμού (υπερβολικότητας) κλίσης LS (Slope Length & Steepness factor) προσδιορίζει την επίδραση της γεωμορφολογίας και του αναγλύφου στην παραγωγή εδαφικής απώλειας, γι' αυτό και συχνά χρησιμοποιούνται και οι όροι συντελεστής αναγλύφου αλλά και τοπογραφικός συντελεστής για την περιγραφή του.

Μια αύξηση της τιμής των δύο συντελεστών L και S, επιφέρει σημαντική αύξηση της εδαφικής διάβρωσης, διότι οι πιο απότομες κλίσεις (S) παράγουν τις υψηλότερες ταχύτητες ροής και οι μακρύτερες κλίσεις (L) συσσωρεύουν επιφανειακή απορροή από μεγαλύτερες περιοχές με αποτέλεσμα την αύξηση πάλι της ταχύτητας ροής. Κατά συνέπεια η αύξηση και των δύο συντελεστών οδηγούν στην αυξανόμενη δυνατότητα εδαφικής διάβρωσης. Είναι σαφές λοιπόν ότι οι απότομες πλαγιές και κλίσεις μεγαλύτερου μήκους θα προκαλέσουν υψηλότερα επίπεδα διάβρωσης του εδάφους και ως εκ τούτου την απώλεια του. Επιπλέον, η μεγάλη απώλεια εδάφους σχετίζεται περισσότερο με τις αλλαγές του βαθμού κλίσης συγκριτικά με το μήκος αυτής.

### *3.2.4 Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης C*

Ο συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management factor) υποδηλώνει την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών στο ρυθμό παραγωγής εδαφικής διάβρωσης.

Η κάλυψη του εδάφους από τη βλάστηση συνεισφέρει στη μείωση της διάβρωσης λόγω της μείωσης της κινητικής ενέργειας των σταγόνων της βροχής, της κάλυψης ενός μεγάλου ποσοστού του εδάφους σε περιόδους του έτους στις οποίες σημειώνονται οι εντονότερες βροχοπτώσεις, της επιβράδυνσης της απορροής και της διατήρησης του πορώδους της επιφάνειας του εδάφους. Έτσι, μεγαλύτερη φυτοκάλυψη έχει ως συνέπεια μικρότερη απώλεια εδάφους.

Οι Wischmeier και Smith (1978) αναφέρουν ότι η απώλεια που θα προκύψει σε μία περιοχή αν ήταν συνεχώς σε αγρανάπαυση υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό των παραγόντων R, K και LS. Η πραγματική απώλεια συνήθως είναι πολύ μικρότερη όταν το έδαφος καλύπτεται από βλάστηση. Το ποσοστό μείωσης εξαρτάται από τον συνδυασμό της κάλυψης του εδάφους και των πρακτικών διαχείρισης, όπως επίσης και από το στάδιο ανάπτυξης της βλάστησης κατά τις περιόδους που σημειώνονται βροχοπτώσεις.

Η αντιστοιχία των περιόδων στις οποίες αναμένεται υψηλή διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης με τις περιόδους φτωχής ή καλής φυτοκάλυψης διαφέρει μεταξύ των περιοχών αλλά και από θέση σε θέση. Ως εκ τούτου, η τιμή του συντελεστή C για ένα είδος καλλιέργειας δεν είναι η ίδια σε όλες τις περιοχές μιας χώρας. Η εξαγωγή κατάλληλων τιμών του C για μία συγκεκριμένη περιοχή απαιτεί τη γνώση της κατανομής της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης για όλο το έτος σε αυτή την περιοχή και κατά πόσο προστατεύεται από τη διάβρωση - την ανάπτυξη των φυτών, τα υπολείμματα καλλιεργειών, τις επιλεγμένες πρακτικές διαχείρισης - κατά την περίοδο που είναι πιθανό να συμβούν βροχοπτώσεις ικανές ώστε να διαβρώσουν σημαντικά το έδαφος (Wischmeier and Smith, 1978).

### 3.2.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης P

Ο συντελεστής P αφορά μόνο καλλιεργήσιμες εκτάσεις και είναι το μέτρο απομείωσης της εδαφικής απώλειας που οφείλεται σε πρακτικές ενίσχυσης των αγρών έναντι της διάβρωσης, εφόσον ακολουθούνται. Τέτοιες πρακτικές είναι το όργωμα και η φύτευση σε γραμμές παράλληλες με τις ισοϋψείς ( $P = 0,6-0,9$ ), ο διαχωρισμός της γης σε λωρίδες παράλληλες με τις ισοϋψείς ( $P = 0,3-0,45$ ) και η κατασκευή σειράς μικρών αναχωμάτων κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους ( $P = 0,12-0,18$ ). Στην περίπτωση όπου δεν ακολουθείται καμία πρακτική ο συντελεστής P ισούται με τη μονάδα ( $P = 1$ ) (καθόλου διευθετημένη λεκάνη), ενώ στην περίπτωση όπου έχουν παρθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα για την απομείωση της διάβρωσης ο συντελεστής P ισούται με 0,1 (πλήρως διευθετημένη λεκάνη).

Όταν ένα κεκλιμένο έδαφος πρόκειται να καλλιεργηθεί και να εκτεθεί σε βροχοπτώσεις ικανές για διάβρωση, η προστασία που του προσφέρεται μέσω του γρασιδιού ή των γειτονικών συστημάτων καλλιεργειών πρέπει να υποστηριχθεί από πρακτικές που θα επιβραδύνουν την απορροή του νερού με αποτέλεσμα να μειωθεί η ποσότητα του εδάφους που μπορεί να μεταφερθεί. Εξ ορισμού, είναι ο λόγος της απώλειας του εδάφους, το οποίο προφυλάσσεται από συγκεκριμένο μέτρο αντιδιαβρωτικής προστασίας, προς την αντίστοιχη εδαφική απώλεια με εφαρμογή οργώματος κατά μήκος της κλίσης.

### 3.3 Συσχέτιση διάβρωσης-στερεοαπορροής – Συντελεστής στερεοαπορροής

Το θέμα της μετάβασης από την παραγόμενη διάβρωση/εδαφική απώλεια στη στερεοαπορροή, αποτελεί ένα πεδίο αλληπάλληλων ερευνητικών προσπαθειών από τη δεκαετία του 1960 μέχρι και σήμερα.

Η διάβρωση σχετίζεται με τη στερεοαπορροή με μια σχέση της παρακάτω μορφής:

$$SDR = S_v / A_s \quad (3.3)$$

Όπου:

SDR: (Sediment Delivery Ratio) συντελεστής στερεοαπορροής (0~1)



$S_v$ : στερεοαπορροή (t/ha)

$A_s$ : διάβρωση – εδαφική απώλεια (t/ha)

Ο συντελεστής στερεοαπορροής αποτελεί το κλάσμα της διάβρωσης που καταλήγει σε στερεοαπορροή μέσω του υδρογραφικού δικτύου. Από φυσική σκοπιά, η στερεοαπορροή σε επίπεδο λεκάνης απορροής αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της παραγόμενης εδαφικής απώλειας και των ποσοτήτων που απολήγουν σε περιοχές εναπόθεσης.

Η γνώση της παραγόμενης στερεοαπορροής, συμβάλλει τα μέγιστα στην αποτελεσματικότερη διαστασιολόγηση φραγμάτων και αντιπλημμυρικών έργων, στη βελτιστοποίηση του κύκλου ζωής των ταμιευτήρων και στον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό. Η διαδικασία της μετάβασης από τη διάβρωση στη στερεοαπορροή επικαθορίζεται από μια σειρά παράγοντες, όπως η έκταση, τα μορφολογικά, εδαφολογικά, κλιματολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις γης, το υδρογραφικό δίκτυο, το καθεστώς απορροής και στερεοαπορροής.

Για την εκτίμηση του SDR χρησιμοποιούνται εμπειρικές εξισώσεις που συσχετίζουν το συντελεστή είτε με την έκταση, είτε με χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου. Από τους δύο τύπους σχέσεων, πιο διαδεδομένες είναι οι πρώτες, καθώς η μεταβολή του συντελεστή στερεοαπορροής σε σχέση με την έκταση της λεκάνης απορροής παρουσιάζει σημαντική στατιστική συσχέτιση, εν αντιθέσει με τις δεύτερες, που εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά και ανομοιογένεια. Επίσης, οι σχέσεις συσχέτισης SDR-έκτασης χαρακτηρίζονται από απόλυτη ευκολία στην εφαρμογή, καθώς η έκταση είναι το πιο κοινό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής (Βαχαβιώλος, 2014).

Οι τρεις πιο διαδεδομένες σχέσεις εκτίμησης του SDR μέσω της έκτασης της λεκάνης απορροής είναι:

Η σχέση του Renfro που προέρχεται από δεδομένα στερεοαπορροής στην περιοχή των Blackland Prairies (Τέξας, Η.Π.Α.). Τα δεδομένα προέρχονταν από 14 λεκάνες απορροής με έκταση που κυμαίνεται από 1,1~252,3 km<sup>2</sup>, και η σχέση που προέκυψε είναι - r<sup>2</sup>~0.92:

$$\log SDR = 1,7935 - 0,14191 \cdot \log A \quad (3.4)$$

Όπου A η έκταση σε km<sup>2</sup>.

Το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α. με δεδομένα από την ίδια περιοχή με τη σχέση του Renfro, κατέληξε στην παρακάτω σχέση:

$$SDR = 0,51 \cdot A^{-0,11} \quad (3.5)$$

Όπου A η έκταση σε mi<sup>2</sup>.

Πιο γενικευμένη από τις μέχρι τώρα σχέσεις θεωρείται η σχέση του Vanoni (1975), καθώς προέκυψε από δεδομένα στερεοαπορροής 300 λεκανών σε παγκόσμια κλίμακα:

$$\text{SDR}=0,42 \cdot A^{-0,125} \quad (3.6)$$

Όπου A η έκταση σε  $\text{m}^2$ .

## 4. Μεθοδολογία κατά Πανάγο 2015

Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων του Εδάφους (ESDAC) είναι το θεματικό κέντρο για τα δεδομένα που σχετίζονται με το έδαφος στην Ευρώπη. Σε μια περίοδο ραγδαίων αλλαγών, τόσο του κλίματος όσο και των χρήσεων γης, λόγω της παγκόσμιας αλλαγής, είναι ζωτικής σημασίας η αξιολόγηση της κατάστασης της διάβρωσης του εδάφους σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Το κυριότερο όμως εμπόδιο για την μοντελοποίηση της εδαφικής διάβρωσης είναι η έλλειψη στοιχείων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Οι απαιτούμενοι συντελεστές της ευρέως διαδεδομένης Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (USLE) και της αναθεωρημένης έκδοσής της (RUSLE), έχουν εκτιμηθεί από μια ομάδα ερευνητών με επιστημονικό υπεύθυνο τον Παναγιώτη Πανάγο, και διατίθενται υπό μορφή χαρτών αρχικά για τα 25 κράτη μέλη και αργότερα για τα 28 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (εκτίμηση για Βουλγαρία, Ρουμανία, Κροατία). Λόγω ενός αριθμού αιτήσεων από μη-ΕΕ χρήστες, δημιουργούνται οι χάρτες που καλύπτουν επίσης τη Νορβηγία, την Ελβετία, τα Βαλκανικά κράτη, τη Μολδαβία και την Ουκρανία. Στα παρακάτω υποκεφάλαια αναλύεται ο καθένας συντελεστής ξεχωριστά.

### 4.1 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K)

Ένας από τους σημαντικότερους συντελεστές αποτελεί η διαβρωσιμότητα του εδάφους K (Soil Erodibility factor), που εκφράζει την ευαισθησία του εδάφους στην διάβρωση και σχετίζεται με τις ιδιότητες του εδάφους, όπως την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, την υφή, τη δομή και την διαπερατότητα του. Ο συντελεστής K είναι μια συγκεντρωτική παράμετρος που αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη ετήσια τιμή του εδαφικού προφίλ σε συσχέτιση με τη διαδικασία αποκόλλησης του εδάφους και μεταφοράς του από τις σταγόνες της βροχής και της επιφανειακής απορροής (Renard et al., 1997).

Το ευρωπαϊκό έργο LUCAS (Land Use/Cover Area Frame Survey), έχει κύριο σκοπό να εφοδιάσει τη διοίκηση της ευρωπαϊκής κοινότητας με ομοιογενή στατιστικά δεδομένα μέσω της καταγραφής των χρήσεων και κάλυψης γης. Η εκτίμηση είναι in-situ, δηλαδή τα δεδομένα που συλλέγονται είναι μέσω της άμεσης παρατήρησης πεδίου. Το 2009 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρέτεινε τη διάρκεια του LUCAS ώστε να συλλεχθούν και αναλυθούν οι κύριες ιδιότητες του επιφανειακού εδάφους στα 25 κράτη μέλη της ΕΕ, σε ένα πιστοποιημένο κεντρικό εργαστήριο. Η έρευνα αυτή αντιπροσωπεύει την πρώτη προσπάθεια δημιουργίας μιας σε συμφωνία χωρικής βάσης δεδομένων της εδαφικής κάλυψης στην Ευρώπη. Περίπου 20.000 σημεία επιλέγονται από το κύριο δίκτυο LUCAS για τη συλλογή των δειγμάτων εδάφους. Ο αριθμός των σημείων ανά χώρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.1 (Tóth et al., 2013). Μια τυποποιημένη διαδικασία δειγματοληψίας χρησιμοποιείται για τη συλλογή τους, με δείγματα βάρους περίπου 0,5 kg το καθένα (πάχους 0-30 cm). Όλα τα δείγματα αναλύονται για το ποσοστό των χονδρόκοκκων τεμαχίων, την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (% αργίλου, ιλύος, άμμου), pH, ποσοστό οργανικού άνθρακα και διάφορες άλλες χημικές παραμέτρους (Εικόνα 4.1). Η

πυκνότητα στο σύστημα δειγματοληψίας των σημείων είναι περίπου 1 ανά 199 km<sup>2</sup>, που αντιστοιχεί σε μέγεθος κελιού κανάβου περίπου 14 km × 14 km (Panagos et al., 2014c).

**Πίνακας 4.1:** Η κατανομή των 19.967 σημείων στις 25 χώρες της ΕΕ (Τόθ et al., 2013).

Χώρα	Αριθμός σημείων	Χώρα	Αριθμός σημείων
AT	420	IE	233
BE	71	IT	1333
CY	90	LT	356
CZ	431	LU	3
DE	1947	LV	349
DK	232	NL	211
EE	220	PL	1648
ES	2696	PT	476
FI	1716	SE	2696
FR	2952	SI	112
GR	491	SK	268
HU	497	UK	942

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή K, δεδομένου ότι οι μετρήσεις πεδίου είναι ακριβές και συχνά δεν καθίσταται δυνατό να ληφθούν δείγματα και να μεταφερθούν με τον σωστό τρόπο, οι ερευνητές μελέτησαν τη σχέση μεταξύ των «κλασικών» ιδιοτήτων του εδάφους και της διάβρωσης. Η χρήση του νομογραφήματος των Wischmeier και Smith (1978) προτείνεται για αυτό τον σκοπό. Η εξίσωση (4.1) που προτείνεται από τους ανωτέρω και Renard et al. (1997) αποτελεί μια αλγεβρική προσέγγιση του νομογραφήματος που περιλαμβάνει τις πέντε παραμέτρους του εδάφους (την περιεκτικότητα σε ιλύ και λεπτή άμμο, σε μέση και χονδρή άμμο, σε οργανική ύλη, τον τύπο της εδαφικής δομής, την κοκκομετρία και τον βαθμό διαπερατότητας).

$$K=[(2,1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12-OM)+3,25(s-2)+2,5(p-3))/100]*0,1317 \quad (4.1)$$

όπου,

M: ο παράγοντας που σχετίζεται με την υφή, με  $M = (m_{\text{silt}} + m_{\text{vfs}}) * (100 - m_c)$

$m_c$  [%]: η περιεκτικότητα σε κλάσμα αργίλου (<0,002 mm)

$m_{\text{silt}}$  [%]: η περιεκτικότητα σε κλάσμα ιλύος (0,002 - 0,05 mm)

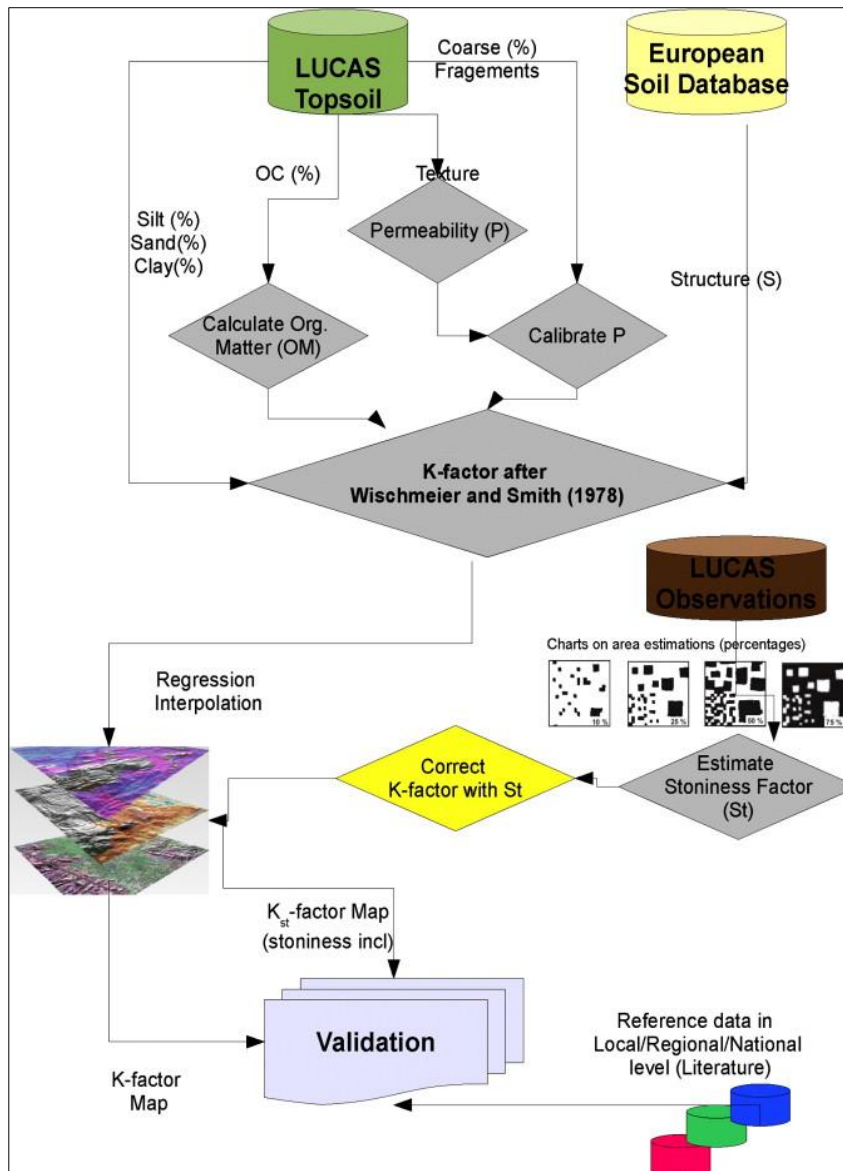
$m_{\text{vfs}}$  [%]: η περιεκτικότητα σε κλάσμα λεπτόκοκκης άμμου (0,05 - 0,1 mm)

OM [%]: η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη

s: η ταξινόμηση με βάση την κοκκομετρία του εδάφους (s = 1: πολύ λεπτόκοκκο, s = 2: λεπτόκοκκο, s = 3: μεσόκοκκο ή χονδρόκοκκο, s = 4: μεγάλα τεμάχια κόκκων)

p: η κατηγορία της διαπερατότητας (p = 1: πολύ διαπερατό, ..., p = 6: ελάχιστα διαπερατό).

Η εξίσωση αυτή ενδείκνυται εκεί όπου το ποσοστό της οργανικής ύλης είναι μικρότερο του 4%. Το όριο αυτό τίθεται για να αποφευχθεί υποεκτίμηση της διαβρωσιμότητας στα εδάφη που είναι πλούσια σε οργανική ύλη. Επίσης υπάρχει περιορισμός και στο περιεχόμενο ποσοστό της ιλύος με ανώτερο όριο το 70% (Panagos et al., 2014c).



**Εικόνα 4.1:** Εφαρμοζόμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση του συντελεστή K (Panagos et al., 2014c).

Στη τιμή του συντελεστή K που αφορά κάθε σημείο του LUCAS, εφαρμόζεται ένα μοντέλο παρεμβολής (**curbist model**), χρησιμοποιώντας τις συμμεταβλητές - γεωγραφικό πλάτος και μήκος, δεδομένα τηλεπισκόπησης και χαρακτηριστικά του εδάφους - προκειμένου να δημιουργηθεί ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης στην Ευρώπη (Εικόνα 4.2). Η μέση τιμή του συντελεστή K για την Ευρώπη εκτιμάται σε  $0,032 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση  $0,009 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι από 0,004 έως 0,076  $\text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (Panagos et al., 2014c).

Παράλληλα με την διεξαγωγή της έρευνας στο πλαίσιο του LUCAS, οι καταμετρητές εκτιμούν το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από πετρώματα χρησιμοποιώντας βοηθητικά διαγράμματα. Η διαβρωσιμότητα του εδάφους λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα της

επιφανειακής κάλυψης από πετρώματα αποτελεί τον συντελεστή  $K_{st}$ , ο οποίος υπολογίζεται από τη εξίσωση 4.2:

$$K_{st} = K + S_t \quad (4.2)$$

όπου,

$S_t$ : είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη σχετική μείωση στη ποσότητα των φερτών και υπολογίζεται ως εξής  $e^{-0.04(R_c-10)}$

$R_c$ : είναι το ποσοστό κάλυψης με πετρώματα από  $10\% < R_c < 100\%$ .

**Πίνακας 4.2:** Κατηγορίες του ποσοστού επιφανειακής κάλυψης με πετρώματα σύμφωνα με την βάση δεδομένων του LUCAS (Panagos et al., 2014c).

Κατηγορίες	Ποσοστό πετρωμάτων	Η τιμή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του $S_t$	Ο αριθμός των δειγμάτων με το ποσοστό τους	$S_t$ (διορθωτικός συντελεστής)
0	0%	0%	95 (0,48%)	1
1	Πετρώματα $\leq 10\%$	5%	14.585 (73,37%)	1
2	$10\% < \text{Πετρώματα} < 25\%$	17,5%	3.114 (15,66%)	0,740
3	$25\% \leq \text{Πετρώματα} < 50\%$	37,5%	1.442 (7,25%)	0,332
4	Πετρώματα $> 50\%$	75%	643 (3,23%)	0,074

Η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει λιγότερο ή ίσο με 10% ποσοστό πετρωμάτων και συνεπώς ένας διορθωτικός συντελεστής δεν μπορεί να εφαρμοστεί σύμφωνα με τη σχέση  $S_t = e^{-0.04(R_c-10)}$ . Για τις κατηγορίες 2, 3 και 4, η μέση τιμή της ποσοστιαίας κατηγορίας (Πίνακας 4.2, στήλη 3) εφαρμόζεται στην Εξ. (4.2) με αποτέλεσμα να προκύπτουν τρεις διορθωτικοί συντελεστές ( $S_t$ ) (Panagos et al., 2014c).

Ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης του συντελεστή αυτού προκύπτει με την ίδια διαδικασία που ακολουθείται για τον συντελεστή  $K$  (Εικόνα 4.4). Ο εξαγόμενος χάρτης του συντελεστή  $K_{st}$  είναι ελαφρώς διαφορετικός σε σύγκριση με αυτόν του συντελεστή  $K$ . Η τιμή του συντελεστή  $K_{st}$  εκτιμάται σε  $0,0271 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση  $0,0087 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι από 0,001 έως  $0,0737 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Η ενσωμάτωση της προστατευτικής επίδρασης της επιφανειακής κάλυψης πετρωμάτων που συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη για τους υπολογισμούς της διαβρωσιμότητας του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα μια μέση μείωση του συντελεστή  $K$  κατά 15%. Ο αποκλεισμός της επίδρασης αυτής στους υπολογισμούς του συντελεστή  $K$  είναι πιθανό να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους, ιδιαίτερα για τις χώρες της Μεσογείου, όπου παρατηρούνται υψηλότερα ποσοστά επιφανειακής κάλυψης από πετρώματα (Panagos et al., 2014c).

Η επίδραση της υψηλής πετρώδους κάλυψης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την προστασία της βλάστησης στον περιορισμό της απώλειας του εδάφους. Η προστατευτική δράση του πετρώδους είναι ισχυρότερη στη Πορτογαλία, στην Ισπανία, στην Ελλάδα και στη Γαλλία, όπου μειώνει τον συντελεστή K κατά 20-42%. Σε αντίθεση, με το πετρώδες που μειώνει τη διαβρωσιμότητα του εδάφους σε ποσοστό λιγότερο του 5% στις χώρες της Βαλτικής, την Πολωνία, την Ουγγαρία και την Ολλανδία (Πίνακας 4.3).

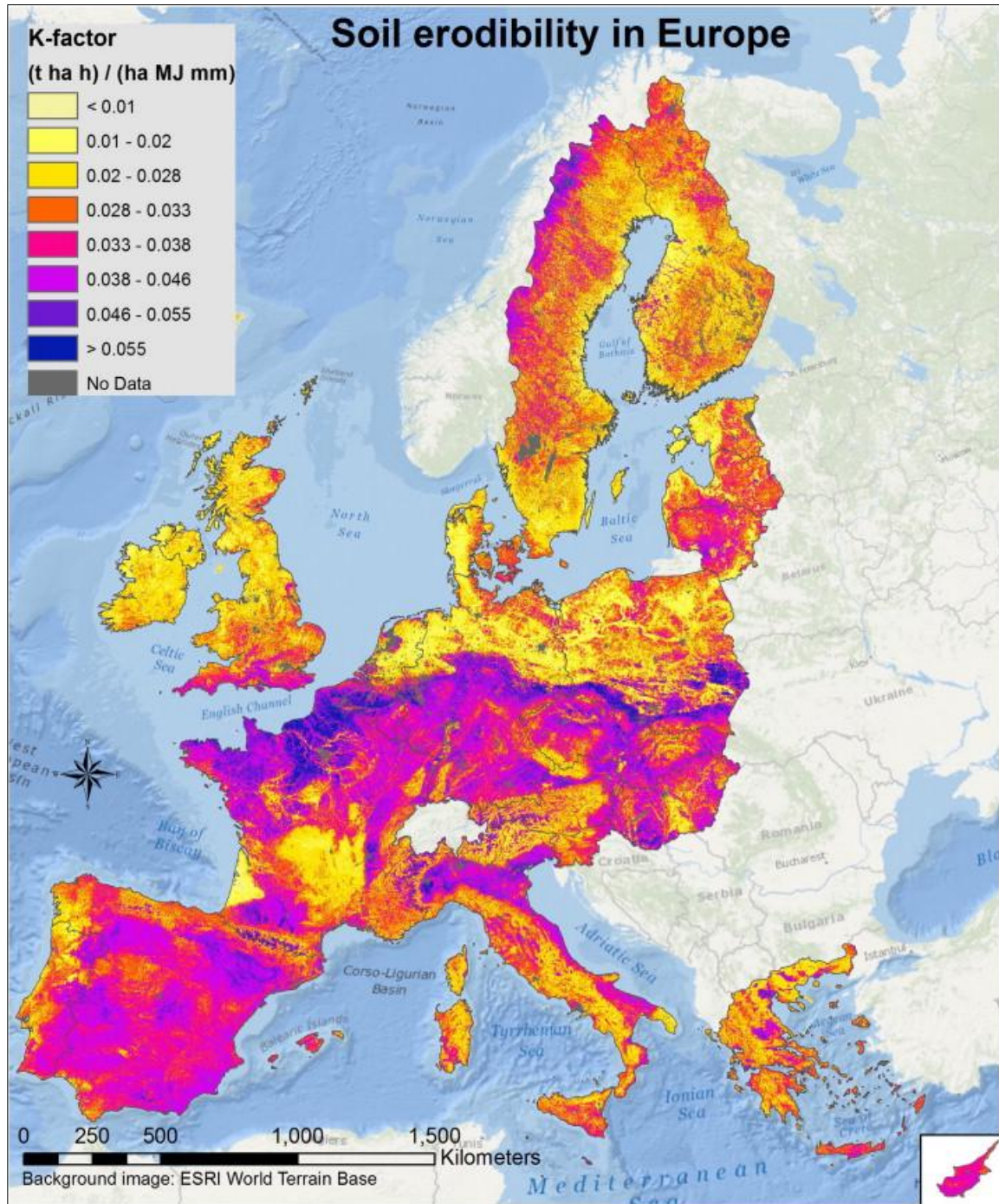
Η οργανική ύλη έχει σημαντικό αντίκτυπο στη διάρθρωση της διαβρωσιμότητας του εδάφους καθώς χώρες με υψηλές συγκεντρώσεις οργανικής ύλης έχουν τη χαμηλότερη διαβρωσιμότητα του εδάφους. Η Ιρλανδία, η Εσθονία, η Δανία, η Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Φινλανδία, η Σουηδία και η Λετονία με υψηλές μέσες τιμές της οργανικής ύλης έχουν μέσες τιμές διαβρωσιμότητας του εδάφους μικρότερες από  $0,030 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Από την άλλη πλευρά, οι υψηλότερες μέσες τιμές (υψηλότερες από  $0,035 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) παρατηρούνται στο Βέλγιο, το Λουξεμβούργο, τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης (Σλοβακία, Τσέχικη Δημοκρατία, Ουγγαρία), την Ισπανία και τη Γαλλία. Αυτές οι σχετικά υψηλές τιμές μπορεί να αποδοθούν εν μέρει στη ζώνη των θινών (Loess belt) και εν μέρει στη σχετικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη σε σύγκριση με τις βόρειες χώρες. Οι μικρότερες διακυμάνσεις παρατηρήθηκαν σε μικρές χώρες (Κύπρος, Μάλτα και Λουξεμβούργο) με περισσότερο ομοιογενείς περιοχές, ενώ υψηλότερες παρατηρούνται στις περιοχές της ζώνης των θινών (Πολωνία, Γερμανία και Ολλανδία) (Panagos et al., 2014c).

**Πίνακας 4.3:** Σύγκριση της διαβρωσιμότητας του εδάφους με πετρώδες και χωρίς, ανά χώρα (Panagos et al., 2014c).

Χώρα	Συντελεστής K βάση της εξίσωσης 4.1		Συντελεστής K <sub>st</sub>	Μείωση λόγω πετρώδους %
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	
	t ha h ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>			
Αυστρία	0,0321	0,0080	0,0291	9,5%
Βέλγιο	0,0422	0,0092	0,0387	8,2%
Κύπρος	0,0362	0,0028	0,0265	26,8%
Τσέχικη Δημοκρατία	0,0373	0,0076	0,0342	8,3%
Γερμανία	0,0334	0,0102	0,0311	7%
Δανία	0,0246	0,0065	0,0225	8,7%
Εσθονία	0,0254	0,0074	0,0242	4,5%
Ελλάδα	0,0298	0,0057	0,0229	23,3%
Ισπανία	0,0368	0,0058	0,0265	27,9%
Φινλανδία	0,0273	0,0058	0,0242	11,2%
Γαλλία	0,0356	0,0101	0,0284	20,1%
Ουγγαρία	0,0349	0,0078	0,0337	3,3%



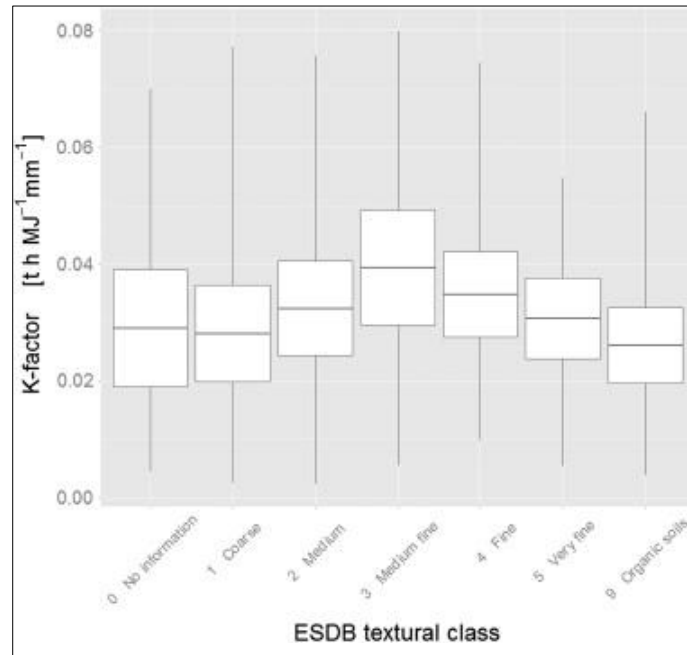
Ιρλανδία	0,0234	0,0047	0,0216	7,4%
Ιταλία	0,0322	0,0077	0,0276	14,5%
Λιθουανία	0,0321	0,0067	0,0309	3,8%
Λουξεμβούργο	0,0392	0,0036	0,0345	11,9%
Λετονία	0,0290	0,0067	0,0281	3,2%
Μάλτα	0,0381	0,0022	0,0284	25,5%
Ολλανδία	0,0246	0,0084	0,0236	3,9%
Πολωνία	0,0299	0,0106	0,0285	4,8%
Πορτογαλία	0,0333	0,0069	0,0194	41,8%
Σουηδία	0,0293	0,0068	0,0252	13,9%
Σλοβενία	0,0313	0,0052	0,0282	9,6%
Σλοβακία	0,0362	0,0074	0,0321	11,3%
Ηνωμένο Βασίλειο	0,0271	0,0063	0,0241	11,1%



**Εικόνα 4.2:** Χάρτης υψηλής ανάλυσης (500 m μέγεθος κελιού κανάβου) της εδαφικής διάβρωσης που εκτιμάται μέσω του συντελεστή K στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Panagos et al., 2014c).

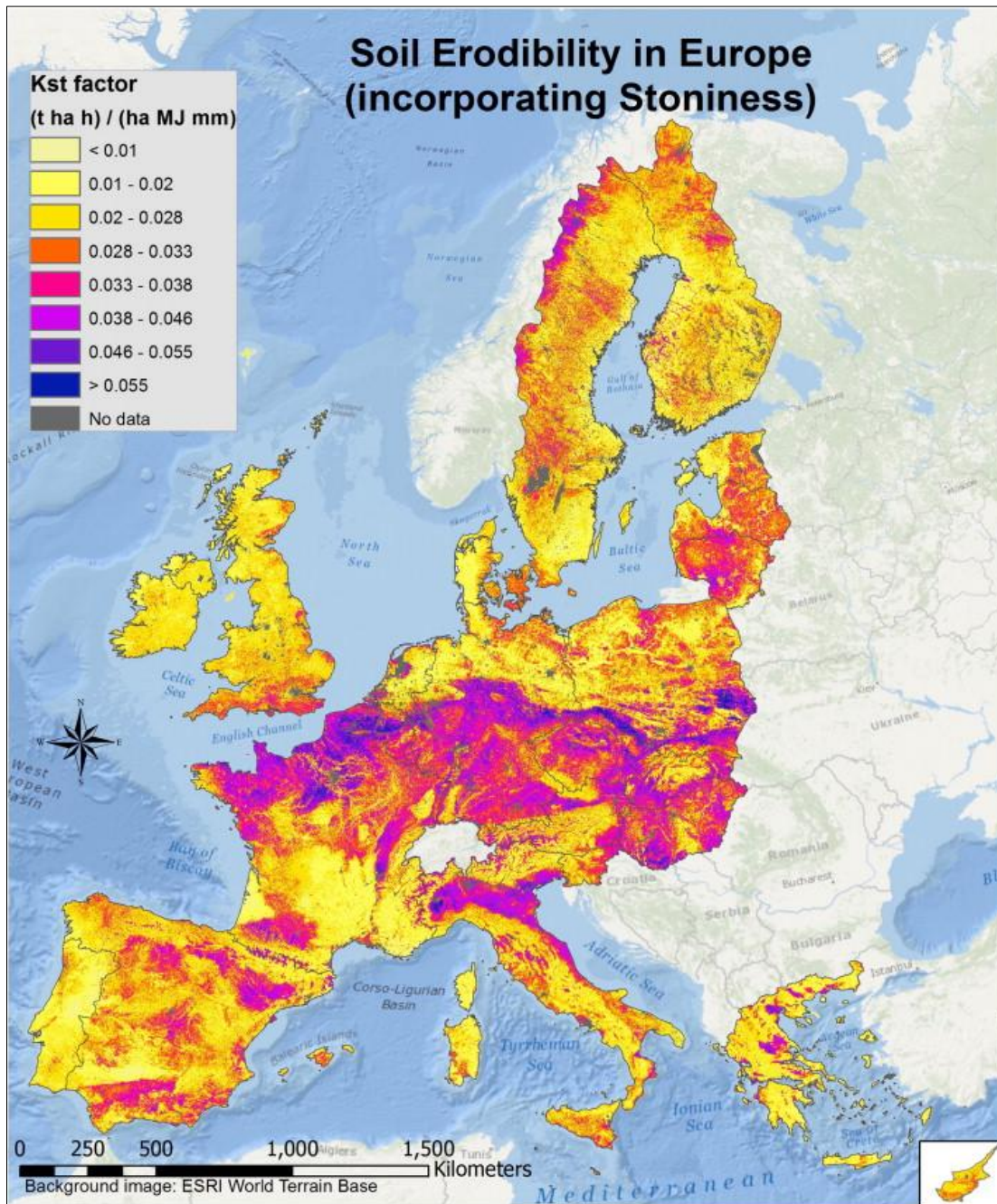
Μια σύγκριση μεταξύ των προκυπτουσών τιμών του συντελεστή K και των κατηγοριών της υφής του εδάφους από την Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Εδάφους (ESDB), δείχνει ότι οι υψηλότερες μέσες τιμές του συντελεστή K είναι στην κατηγορία μεσόκοκκου-λεπτόκοκκου εδάφους (3), ακολουθεί η κατηγορία λεπτόκοκκου (4) και μεσόκοκκου (2), ενώ οι χαμηλότερες μέσες τιμές καταγράφονται για χονδρόκοκκα (1) και πολύ λεπτόκοκκα (5)

(Εικόνα 4.3). Αυτό ακολουθεί τους κύριους κανόνες της εδαφικής επιστήμης ότι τα χονδρόκοκκα σωματίδια είναι σχετικά βαρύτερα και τα λεπτόκοκκα σωματίδια έχουν, λόγω των σχετικά μεγάλων επιφανειών τους, υψηλή αντοχή συνοχής και ως εκ τούτου είναι λιγότερο επιρρεπή στην αποκόλληση του εδάφους. Έτσι, η κατηγορία των μεσόκοκκων είναι περισσότερο επιρρεπή στη διάβρωση του εδάφους. Τα οργανικά εδάφη (όχι αυτά που εμπεριέχουν μέταλλα) έχουν τη χαμηλότερη μέση τιμή συντελεστή Κ.



**Εικόνα 4.3:** Ο συντελεστής Κ σε σύγκριση με τις κατηγορίες υφής του εδάφους (Panagos et al., 2014c).

Στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω έλλειψης δεδομένων στα χρησιμοποιούμενα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης δεν λαμβάνονται υπόψη τόσο η διαπερατότητα όσο και η δομή του εδάφους με αποτέλεσμα η μέση μείωση του συντελεστή Κ να αντιστοιχεί σε περίπου 16,3% (Panagos et al., 2014c).



**Εικόνα 4.4:** : Χάρτης υψηλής ανάλυσης (500 m μέγεθος κελιού κανάβου) της εδαφικής διάβρωσης που εκτιμάται μέσω του συντελεστή K στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενσωματώνοντας την κάλυψη από πετρώδεις σχηματισμούς (Panagos et al., 2014c).

Το σύνολο των παρεχόμενων δεδομένων ξεπερνά τα προβλήματα της περιορισμένης διαθεσιμότητας στοιχείων για την εκτίμηση του συντελεστή K, παρουσιάζοντας μια υψηλής ποιότητας πηγή για ερευνητές που αποσκοπούν στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε τοπικό/περιφερειακό, εθνικό ή ευρωπαϊκό επίπεδο. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα των συντελεστών K και  $K_{st}$  επαληθεύονται με πολύ καλά αποτελέσματα στις τοπικές/περιφερειακές/εθνικές μελέτες.

#### 4.2 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R)

Η διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης είναι η κινητική ενέργεια από την επίδραση των σταγόνων της βροχής και το ποσοστό της συνδεδεμένης απορροής. Ο συντελεστής R (Rainfall Erosivity factor) είναι ένας πολυετής μέσος όρος του δείκτη που μετρά την κινητική ενέργεια και την ένταση των βροχοπτώσεων, για να περιγράψει την επίδραση της βροχής στην επιφανειακή και αυλακωτή διάβρωση. Ωστόσο, οι διαβρωτικές δυνάμεις της απορροής λόγω τήξεως των χιονιών, της βροχής στο παγωμένο έδαφος, ή της άρδευσης δεν περιλαμβάνονται σε αυτόν τον συντελεστή. Μεταξύ των συντελεστών που χρησιμοποιούνται στην RUSLE και στη παλαιότερη έκδοση της, την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE), η διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης είναι υψίστης σημασίας καθώς οι βροχοπτώσεις είναι η κινητήρια δύναμη της διάβρωσης και έχουν άμεσο αντίκτυπο για την απόσπαση των σωματιδίων του εδάφους, την ανάλυση των συγκεντρωτικών μεγεθών και τη μεταφορά των διαβρωμένων σωματιδίων μέσω της απορροής. Η ακριβής εκτίμηση της διαβρωτικότητας λόγω βροχόπτωσης απαιτεί καταγραφές των βροχοπτώσεων κατά μικρά χρονικά διαστήματα (1-60 min) για μια περίοδο τουλάχιστον αρκετών χρόνων. Η διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την κινητική ενέργεια από τη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 30 min για κάθε καταιγίδα. Ο συντελεστής R συσσωρεύει την διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης από μεμονωμένα επεισόδια βροχής και υπολογίζει κατά μέσο όρο τη τιμή σε πολλαπλά χρόνια (Panagos et al., 2015).

Η συλλογή των δεδομένων κατακρήμνισης υψηλής χρονικής ανάλυσης ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2013 και ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 2014. Η βάση δεδομένων διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης σε ευρωπαϊκή κλίμακα (REDES-Rainfall Erosivity Database on the European Scale) περιλαμβάνει δεδομένα βροχόπτωσης υψηλής χρονικής ανάλυσης και τιμές του συντελεστή R από 1.541 βροχομετρικούς σταθμούς, εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελβετίας. Το REDES είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμένου συντελεστή R για ένα σύνολο 26,394 χρόνων με μια μέση τιμή τα 17,1 έτη για κάθε σταθμό. Τα δεδομένα κατακρήμνισης που συλλέγονται από τις 28 χώρες της Ευρώπης έχουν διαφορετικές χρονικές αναλύσεις: 60, 30, 15, 10 και 5 min. Ο συντελεστής R που υπολογίζεται στο χρονικό βήμα του κάθε σταθμού, μέσω συντελεστών μετατροπής και γραμμικών συναρτήσεων παλινδρόμησης (Πίνακας 4.4) μετατρέπεται στη χρονική ανάλυση των 30 min ώστε να επιτευχθεί ομοιογένεια των δεδομένων (Panagos et al., 2015). Σύμφωνα με τους συντελεστές μετατροπής υπάρχει μια ισχυρή υποεκτίμηση του συντελεστή R (περίπου 56 %) όταν δεδομένα 60 min χρησιμοποιούνται. Τα αποτελέσματα συνάδουν με προηγούμενα βιβλιογραφικά ευρήματα. Ωστόσο οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού,  $R^2$ , για την παλινδρόμηση των συντελεστών R που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα βροχοπτώσεων σε διαφορετικές χρονικές αναλύσεις, δείχνουν ότι τα δεδομένα των 60 min σε συνδυασμό με έναν συντελεστή μετατροπής μπορούν επιτυχώς να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του συντελεστή R όπου δεν υφίστανται υψηλής ανάλυσης δεδομένα.

**Πίνακας 4.4:** Συντελεστές μετατροπής για τη βαθμονόμηση των χρονικών αναλύσεων (Panagos et al., 2015).

Χρονική ανάλυση	Αριθμός σταθμών	Χώρες που καλύπτουν	Συνάρτηση παλινδρόμησης	R <sup>2</sup>
60-min	82	BE, CZ, CH, CY, DE, EE, FR, IT, LU, RO	R30 min = 1,5597 * R60 min	994
15-min	31	BE, ES	R30 min = 0,8716 * R15 min	998
10-min	31	CZ, CY, CH, DE, EE, HR, HU, LU, RO	R30 min = 0,8205 * R10 min	998
5-min	12	CZ, CY, FR, HR, LU	R30 min = 0,7984 * R5 min	998

Οι χρονοσειρές των κατακρημνίσεων κυμαίνονται κατ'ελάχιστο στα 5 έτη και κατά μέγιστο στα 40 έτη. Η μέση τιμή χρονοσειράς ανά βροχομετρικό σταθμό είναι περίπου τα 17,1 έτη, με τις περισσότερες σειρές δεδομένων να συμπεριλαμβάνονται στη πρώτη δεκαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα (75% τη χρονική περίοδο 2000-2010). Σε όλες σχεδόν τις χώρες, η διάρκεια της χρονοσειράς ανά σταθμό είναι περισσότερο από 10 χρόνια, εκτός από την Εσθονία, τη Φινλανδία, τη Λετονία και τη Ρουμανία, όπου η μέση καταγεγραμμένη περίοδος είναι 7 έτη. Η διαδικασία παλινδρόμησης κατά Gauss (GPR) χρησιμοποιείται για να παρεμβάλει τις τιμές κάθε σταθμού του συντελεστή R σε ένα ευρωπαϊκό χάρτη διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης με ανάλυση 1 km, ο οποίος απεικονίζεται στην εικόνα 4.5. Οι συμμεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την παρεμβολή του συντελεστή R είναι διάφορα κλιματολογικά στοιχεία (συνολική κατακρήμνιση, εποχιακές βροχοπτώσεις, η κατακρήμνιση του ξηρότερου/υγρού μήνα, η μέση θερμοκρασία), το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος/γεωγραφικό μήκος. Συγκεκριμένα οι εποχιακές βροχοπτώσεις, το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος βρέθηκαν να έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή R (Panagos et al., 2015).

Ο συντελεστής R είναι το προϊόν της κινητικής ενέργειας ενός συμβάντος βροχόπτωσης (E) και το μέγιστο της εντάσεως των 30 λεπτών του ( $I_{30}$ ):

–

**(4.3)**

όπου  $R = \eta$  μέση ετήσια διαβρωτικότητα βροχόπτωσης ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ),

$n = \text{o αριθμός των ετών που καλύπτονται από τα αρχεία δεδομένων,}$

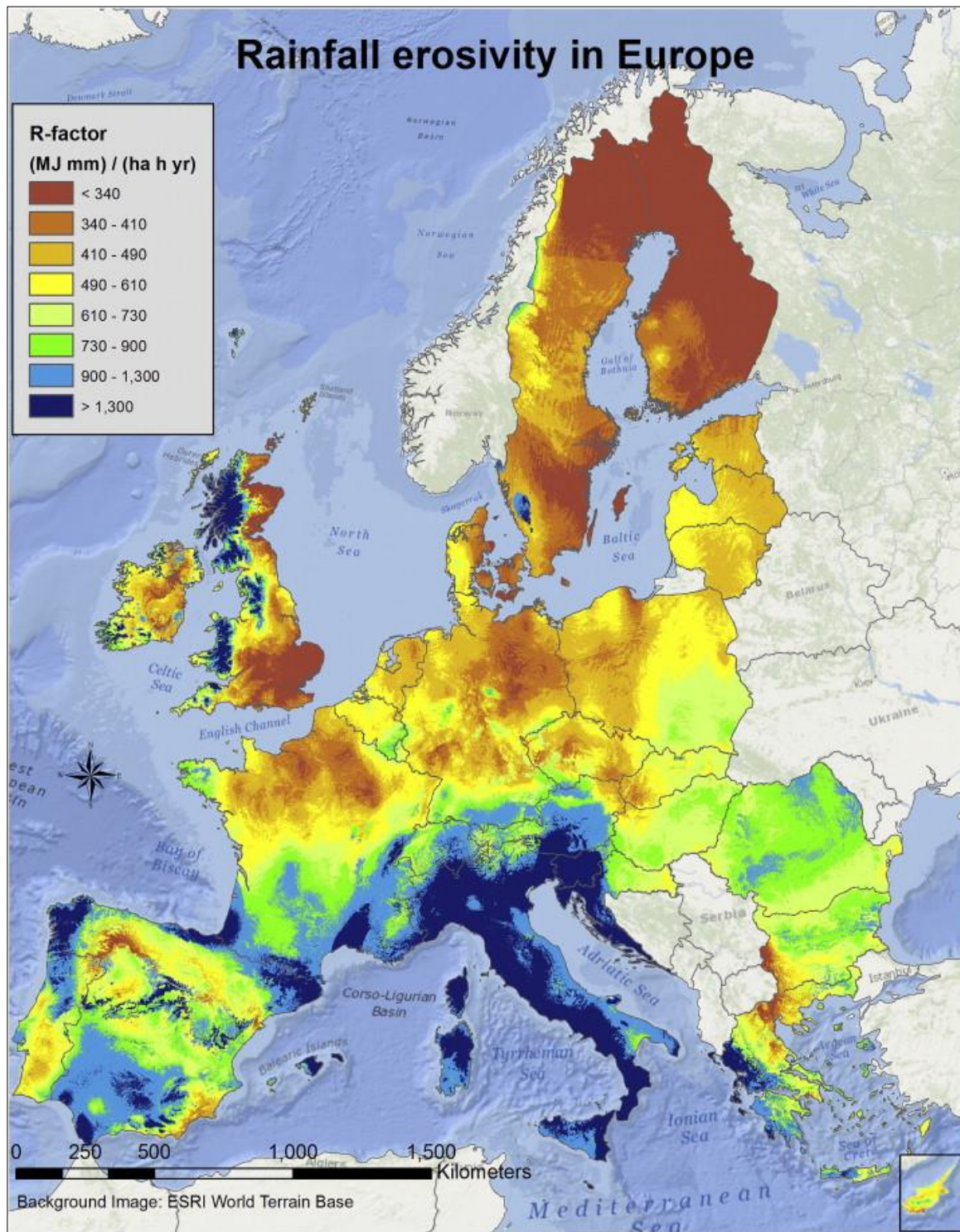
$m_j = \text{o αριθμός των γεγονότων διάβρωσης του συγκεκριμένου έτους } j, \text{ και}$

$E_{I_{30}} = \text{η διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης για ένα μοναδικό γεγονός } k.$

Ο υπολογισμός του συντελεστή R απαιτεί τον εντοπισμό του διαβρωτικού επεισοδίου βροχόπτωσης ( $m_j$ ) για κάθε σταθμό. Τρία είναι τα κριτήρια για τον προσδιορισμό ενός διαβρωτικού επεισοδίου όπως περιγράφονται από τους Renard et al. (1997): (i) η αθροιστική βροχόπτωση ενός γεγονότος να είναι μεγαλύτερη από 12,7 mm, ή (ii) η

εκδήλωση του επεισοδίου να έχει τουλάχιστον μία κορυφή η οποία να είναι μεγαλύτερη από 6,35 mm κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 15 min (ή 12,7 mm κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 30 min). Μια συγκέντρωση βροχής λιγότερη από 1,27 mm κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 6 h χωρίζει μιας μεγαλύτερης περιόδου καταιγίδας σε δύο καταιγίδες. Το όριο των 12,7 mm καθορίζει επεισόδια κατακρημνίσεων, που έχουν διαβρωτική δύναμη. Είναι ενδιαφέρον ότι, η μείωση του ορίου από τα 12.7 mm στα 0 mm οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή R, ο οποίος δεν υπερβαίνει το 3,5%. Μέσω της χρήσης του λογισμικού προγράμματος RIST (Rainfall Intensity Summarisation Tool) γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή R (Panagos et al., 2015).

Η μέση τιμή του συντελεστή R στην ΕΕ συμπεριλαμβανομένου και της Ελβετίας υπολογίζεται σε  $722 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , με τυπική απόκλιση της τάξεως του  $478,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από 51,4 έως  $6.228,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , με τις υψηλότερες τιμές ( $> 1.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) να συναντώνται στη Μεσόγειο και στις Αλπικές περιοχές και τη χαμηλότερη τιμή (λιγότερο από  $500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) στις Σκανδιναβικές χώρες.



**Εικόνα 4.5:** Χάρτης (1 km μέγεθος κελιού κανάβου) της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης στην Ευρώπη (Panagos et al., 2015).

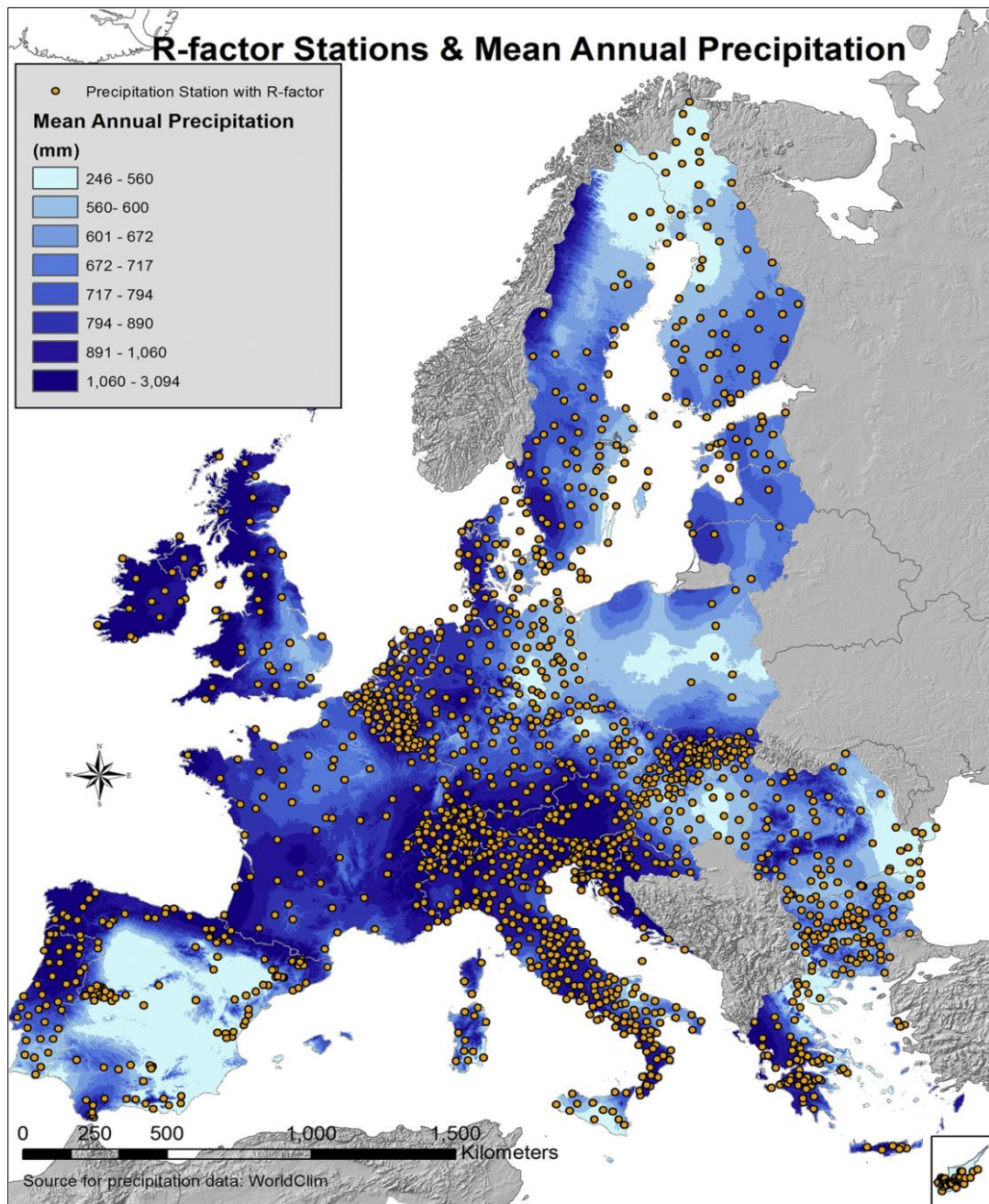
Στο πλαίσιο δημιουργίας του χάρτη διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, δημιουργείται και ο χάρτης πυκνότητα της διαβρωτικότητας (erosivity density), όπου χρησιμοποιείται για την εκ των υστέρων αξιολόγηση των μοτίβων της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης και του είδους των βροχοπτώσεων που εμπλέκονται στα διαβρωτικά γεγονότα στην Ευρώπη. Η ετήσια πυκνότητα της διαβρωτικότητας είναι η αναλογία της μέσης ετήσιας



διαβρωτικότητας προς τη μέση ετήσια βροχόπτωση. Ουσιαστικά η πυκνότητα της διαβρωτικότητας (ED) μετρά την διαβρωτικότητα ανά μονάδα βροχόπτωσης (mm) και εκφράζεται σε μονάδες  $\text{MJ ha}^{-1} \text{h}^{-1}$  (Panagos et al., 2015).

$$ED=R/P \quad (4.4)$$

όπου R είναι η μέση ετήσια διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ ) και P είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση ( $\text{mm yr}^{-1}$ ) σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του WorldClim (Εικόνα 4.6).

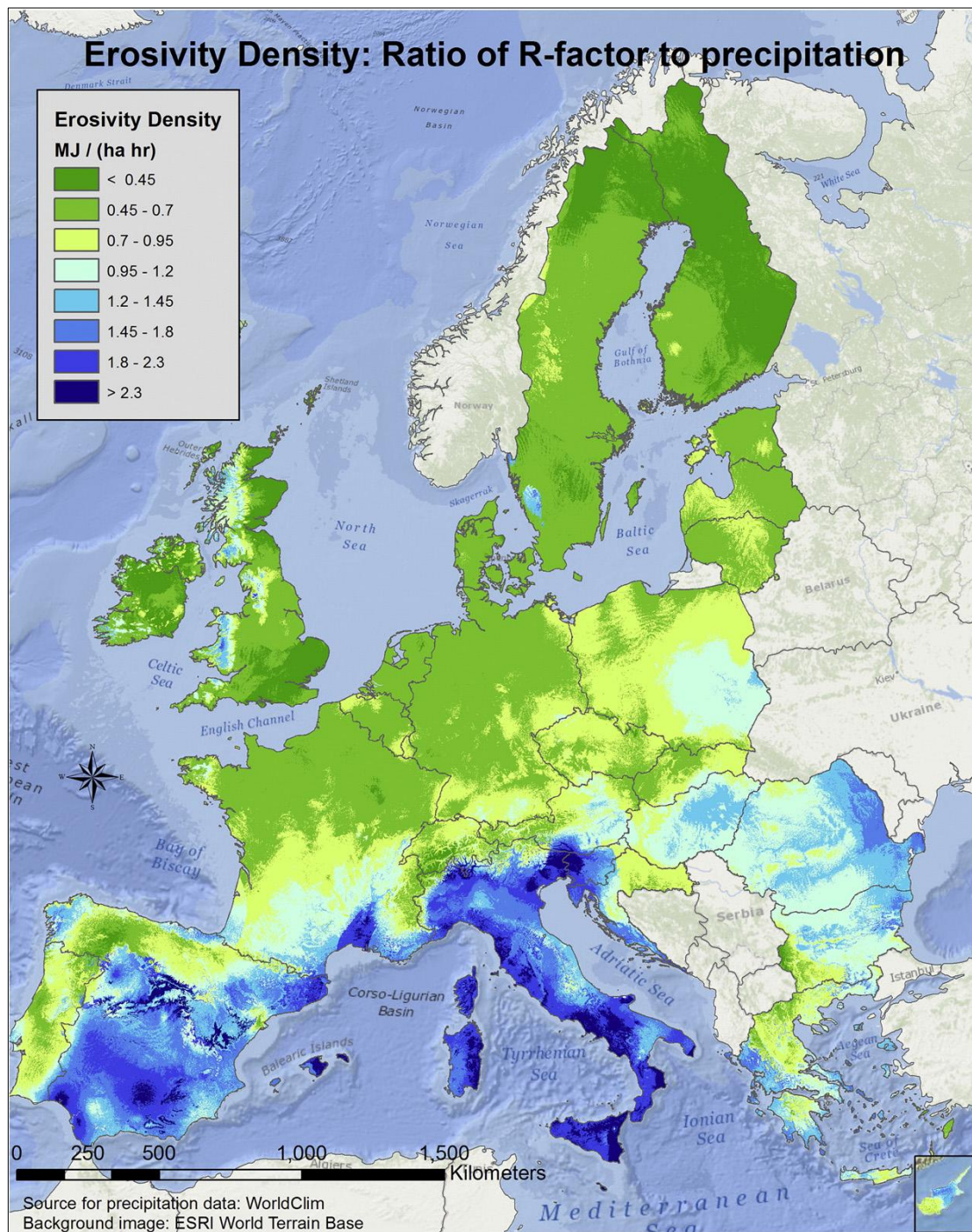


**Εικόνα 4.6:** Η χωρική κατανομή των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή R (Panagos et al., 2015).

Περιοχές με υψηλή πυκνότητα διαβρωτικότητας υποδεικνύουν ότι η βροχόπτωση χαρακτηρίζεται από υψηλής έντασης γεγονότα μικρής διάρκειας (καταιγίδες). Ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα διαβρωτικότητας παρατηρείται στην Ιταλία, τη Σλοβενία και την Ισπανία (Εικόνα 4.7), όπου ο συντελεστής R είναι 2-3 φορές υψηλότερος από το ποσό της βροχόπτωσης. Αντίθετα, η κατανομή της βροχής είναι πολύ ομαλότερη στις βόρειες περιοχές της Ευρώπης (βόρεια Γερμανία, Γαλλία και Ολλανδία), όπου σχετικά υψηλά ποσά βροχοπτώσεων έχουν μικρότερη διαβρωτική δράση (Panagos et al., 2015).

Η πυκνότητα διαβρωτικότητας έχει μέση τιμή  $0,92 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , με υψηλή μεταβλητότητα που κυμαίνεται από  $0,1$  έως  $4,47 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Αυτή η υψηλή μεταβλητότητα υπογραμμίζει το γεγονός ότι η διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το ποσό των βροχοπτώσεων. Κατά συνέπεια, είναι αδύνατον να προβλεφθεί ο συντελεστής R στην Ευρώπη ο οποίος βασίζεται αποκλειστικά στα επίπεδα των βροχοπτώσεων. Περιφερειακά μοτίβα μπορούν να αναγνωριστούν, και παρόλο που εξισώσεις παλινδρόμησης μπορεί να αναπτυχθούν, δεν μπορούν να επεκταθούν σε άλλες περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά (Panagos et al., 2015).

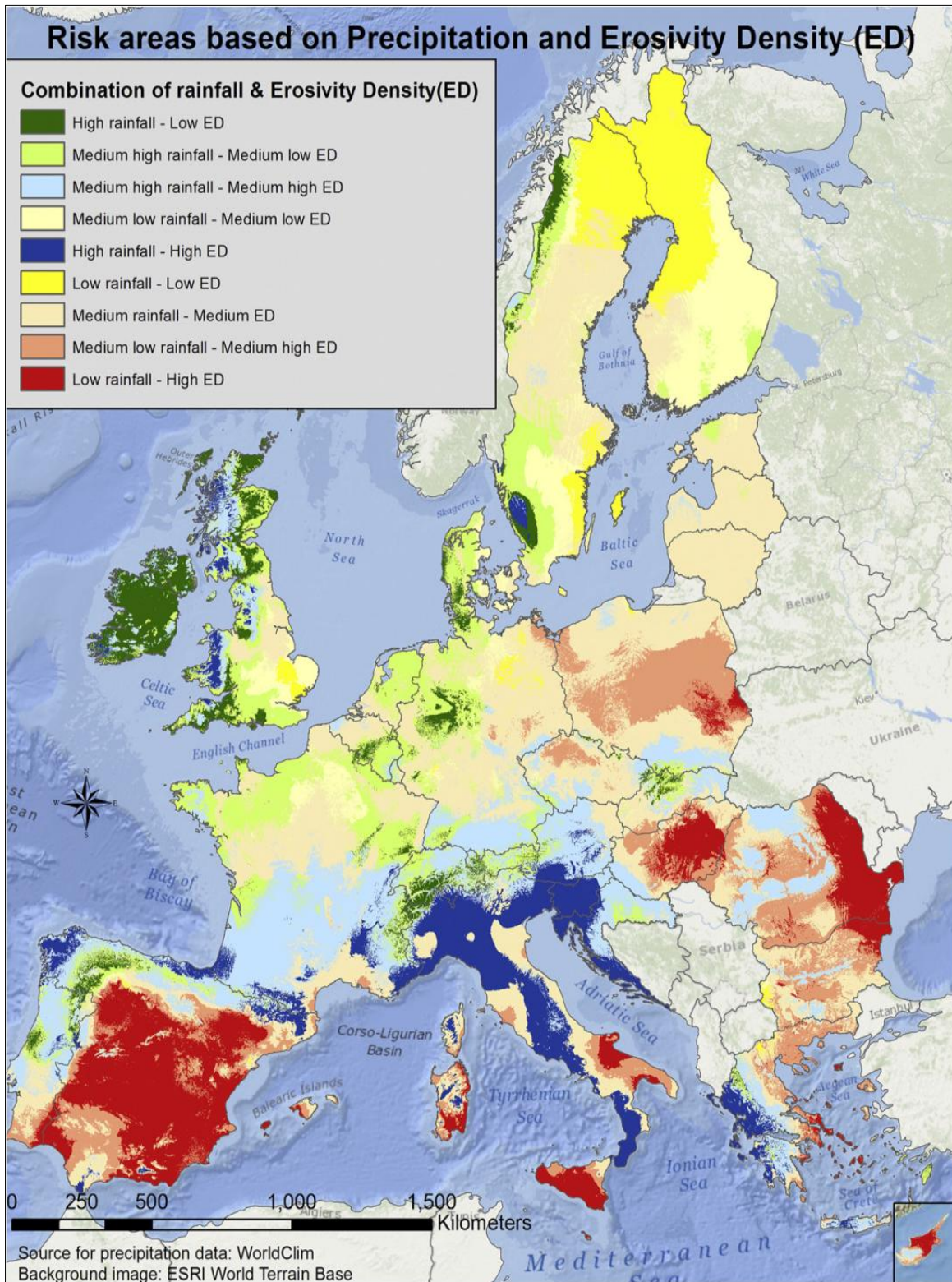
Ο δείκτης πυκνότητα διαβρωτικότητας απεικονίζει ότι ο συντελεστής R ανά μονάδα βροχόπτωσης είναι εξαιρετικά μεταβλητός. Ως εκ τούτου, η επιλογή των εξισώσεων παλινδρόμησης πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και πρέπει να βασίζεται σε τοπικές μελέτες του κλίματος και σε δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης. Οι χώρες της Μεσογείου και οι περιοχές των Άλπεων έχουν μια σχετικά υψηλή πυκνότητα διαβρωτικότητας και υψηλή συχνότητα καταιγίδων σε σχέση με τη Βόρεια Ευρώπη, όπου η πυκνότητα διαβρωτικότητας είναι πολύ χαμηλότερη (Εικόνα 4.7). Επιπλέον, η αξιολόγηση της πυκνότητας διαβρωτικότητας και των περιοχών πιθανού κινδύνου που συνδυάζουν χαμηλές ποσότητες βροχοπτώσεων με υψηλή πυκνότητα διαβρωτικότητας, καταδεικνύει ότι οι περιοχές της Μεσογείου έχουν τον υψηλότερο κίνδυνο όχι μόνο σε γεγονότα διάβρωσης αλλά και σε εμφάνιση πλημμυρών ή/και λειψυδρίας (Panagos et al., 2015).



**Εικόνα 4.7:** Χάρτης της πυκνότητας διαβρωτικότητας (διαβρωτικότητα ανά mm βροχόπτωσης) (Panagos et al., 2015).

Η πυκνότητα διαβρωτικότητας μπορεί να συνεισφέρει στην αναγνώριση των περιοχών πιθανού κινδύνου, λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της κατακρήμισης. Τα δεδομένα κατακρημνίσεων και πυκνότητας διαβρωτικότητας (Εικόνα 4.6 και 4.7 αντίστοιχα) ταξινομούνται σε εννέα συνδυασμένες κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν τα τέσσερα τεταρτημόρια κάθε παραμέτρου. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος εντοπίζεται σε περιοχές όπου η χαμηλή μέση ετήσια κατακρήμιση συνοδεύεται από υψηλή διαβρωτικότητα. Έτσι, η άκρως διαβρωτική βροχόπτωση επιδρά σε μακράς περιόδου ξηρά εδάφη που συνήθως προκαλεί

μεγάλη ζημιά και συνδέεται με ένα πολύ υψηλό κίνδυνο πλημμύρας. Η κατηγορία αυτή ορίζεται ως ο υψηλότερος συνολικός κίνδυνος (1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του ποσού των βροχοπτώσεων που είναι μικρότερο από 600 mm ετησίως) με τιμές πυκνότητας διαβρωτικότητας μεγαλύτερες από 1,2 MJ ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο). Ο χαμηλότερος κίνδυνος εντοπίζεται σε εκείνες τις περιοχές όπου, παρόλο που τα ετήσια επίπεδα βροχόπτωσης είναι υψηλά, η βροχόπτωση είναι σχετικά ομοιογενώς κατανεμημένη και ως εκ τούτου έχει χαμηλή διαβρωτικότητα (έκταση πράσινου χρώματος στο χάρτη 4.8). Ξηρά εδάφη τα οποία αντιπροσωπεύουν το 9,6% της περιοχής μελέτης, εντοπίζονται στην κεντρική και νότια Ισπανία, στη Σικελία, στη Σαρδηνία, στην Απουλία, στα Ελληνικά νησιά, στη Κύπρο, στη Δυτική Ρουμανία και στη Κεντρική Ουγγαρία (Εικόνα 4.8). Περιοχές της Ιρλανδίας, του Βόρειου Ηνωμένου Βασιλείου και μικρά τμήματα της Γερμανίας, παρουσιάζουν τον χαμηλότερο κίνδυνο (4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του ποσού των βροχοπτώσεων που είναι μεγαλύτερο από 890 mm ετησίως) με τιμές πυκνότητας διαβρωτικότητας μικρότερες από 0,55 (1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο). Ο συνδυασμός υψηλών τιμών βροχόπτωσης και υψηλών πυκνοτήτων διαβρωτικότητας (έκταση μπλε χρώματος στο χάρτη 4.8) μπορεί επίσης να σχετίζεται με κάποιο κίνδυνο: μεγάλες ποσότητες βροχόπτωσης που πέφτουν σε υγρά ή κορεσμένα εδάφη μπορεί να προκαλέσουν πχ κατολισθήσεις.



**Εικόνα 4.8:** Περιοχές πιθανού κινδύνου βασιζόμενες στην βροχόπτωση και στην πυκνότητα διαβρωτικότητας (Panagos et al., 2015).

### 4.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS)

Ο συντελεστής μήκους και βαθμού (υπερβολικότητας) κλίσης LS (Slope Length & Steepness factor) προσδιορίζει την επίδραση της γεωμορφολογίας και του ανάγλυφου στην παραγωγή εδαφικής απώλειας, γι' αυτό και συχνά χρησιμοποιούνται και οι όροι συντελεστής ανάγλυφου αλλά και τοπογραφικός συντελεστής για την περιγραφή του. Συγκεκριμένα ο συντελεστής S μετρά την επίδραση της γωνίας κλίσης του πρανού, και ο συντελεστής L ορίζει τις συνέπειες του μήκους του πρανού. Ο συνδυασμένος λοιπόν συντελεστής LS είναι αδιάστατος και περιγράφει την επίδραση της τοπογραφίας στη διάβρωση του εδάφους.

Η μεθοδολογία για την εκτίμηση του συντελεστή LS περιλαμβάνει την χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους υψηλής ανάλυσης στα 25 m για την Ευρωπαϊκή Ένωση (EU-DEM), τον αλγόριθμο των Desmet και Govers (1996) (εξίσωση 4.5) και τον περιορισμό της μέγιστης γωνίας κλίσεως του πρανού στο 50% (26,6 μοίρες) (Panagos et al., 2015).

Αρχικά, οι McCool et al. Διαπίστωσαν ότι η εδαφική απώλεια συμβαίνει ταχύτερα σε πλαγιές που είναι πιο απότομες από 9%. Οι Renard et al. (1997) υιοθέτησαν τον αλγόριθμο αυτό στη RUSLE για την εκτίμηση του συντελεστή S βάση της κλίσης:

$$S = 10.8 \times \sin \Theta + 0.03, \text{ όπου η κλίση } < 0.09 \quad (4.5\alpha)$$

$$S = 16.8 \times \sin \Theta - 0.5, \text{ όπου η κλίση } \geq 0.09 \quad (4.5\beta)$$

Η κλίση σε ένα πρανές είναι αδύνατο να είναι ομοιόμορφη σε μια ολόκληρη περιοχή, για αυτό και οι Foster and Wischmeier (1974) πρότειναν την διαίρεση του πρανού σε επιμέρους τεμάχια τα οποία θεωρούνται ότι είναι ομοιόμορφα ως προς την γωνία κλίσης και τις ιδιότητες του εδάφους. Οι Desmet και Govers (1996) επέκτειναν την προσέγγιση αυτή σε μια δύο διαστάσεων τοπογραφία με αντικατάσταση της μονάδας της περιοχής που συμβάλλει στο μήκος της κλιτύς καθώς κάθε κελί του κανάβου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τμήμα κλιτύς που έχει ομοιόμορφη κλίση. Αντικαθιστώντας το μήκος κλιτύς από τη συμβαλλόμενη περιοχή ο συντελεστής L για το κελί κανάβου με συντεταγμένες (i,j) μπορεί στη συνέχεια να γραφτεί ως:

---

$$(4.5)$$

Όπου,

$A_{i,j-in}$ : είναι η συμβαλλόμενη περιοχή στην είσοδο του κελιού μετρούμενη σε  $m^2$ ,

D: είναι το μέγεθος του κελιού σε m,

$\chi_{i,j} = \sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j}$  με  $\alpha_{i,j}$  να δηλώνει την κατεύθυνση του κελιού (i,j), και

Το m σχετίζεται με το λόγο  $\beta$  της αυλάκωσης προς την αυλακωτή διάβρωση με τη σχέση 4.6. Οι τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται μεταξύ 0-1 και πλησιάζει το 0 όταν η αναλογία είναι κοντά στο 0.

---

$$(4.6)$$

όπου

(4.7)

με  $\theta$  την γωνία κλίσης σε μοίρες.

Ο υπολογισμός του συντελεστή LS γίνεται με την χρήση μιας υδρολογικής εφαρμογής που είναι διαθέσιμη στο γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών ανοιχτού κώδικα, SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), η οποία ενσωματώνει έναν αλγόριθμο πολλαπλής ροής. Το λογισμικό αυτό υπολογίζει την συσσωρευμένη ροή απευθείας από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Ο κύριος περιορισμός της μεθόδου αυτής είναι η ύπαρξη χαρακτηριστικών του τοπίου όπως για παράδειγμα δρόμοι, μονοπάτια, πέτρινοι τοίχοι, φράχτες τα οποία μπορεί να διακόπτουν την απορροή και να μειώνουν το μήκος της κλιτύος, αλλά δεν μπορούν να προσδιοριστούν στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Ο περιορισμός της μέγιστης γωνίας κλίσης του πρηνούς στο 50% (26.6 μοίρες), επιλέγεται βάση βιβλιογραφίας και πειραματικών εκτιμήσεων στην Σουηδία, η οποία εμφανίζει έντονη ετερογένεια στην γεωμορφολογία έχοντας τις υψηλότερες κλίσεις στην Ευρώπη. Η τιμή αυτή ορίζεται ως «cutoff» γωνία κλίσης του πρηνούς (Panagos et al., 2015).

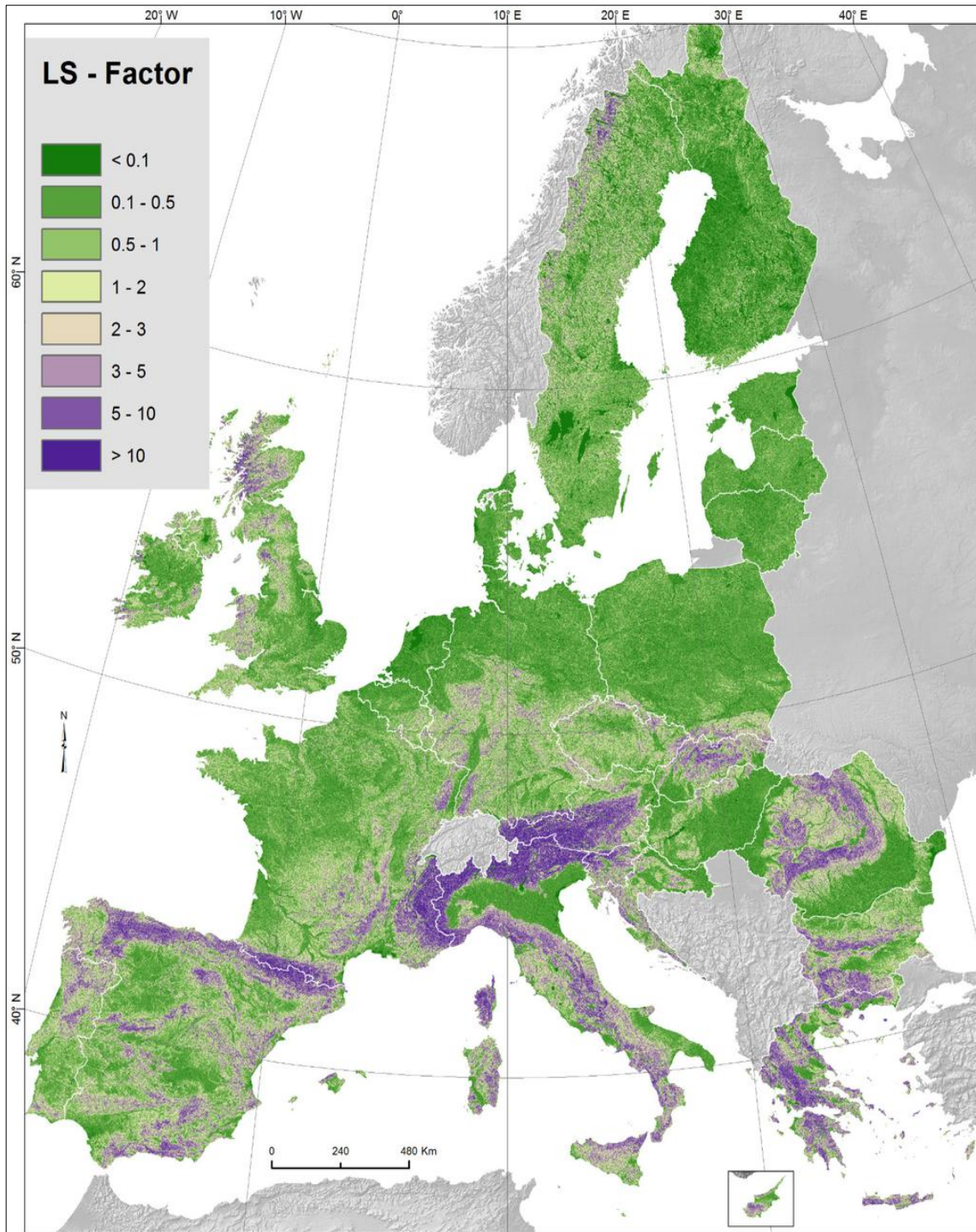
Από τον χάρτη της εικόνας 4.9, οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή LS παρατηρούνται στις ορεινές περιοχές όπως οι Άλπεις (Σλοβενία, Αυστρία, Ιταλία και Γαλλία), τα Πυρηναία (Ισπανία), τα Απέννινα (Ιταλία), τα Καρπάθια Όρη (Ρουμανία) και τη οροσειρά της Πίνδου (Ελλάδα). Η πιο επίπεδη χώρα είναι η Ολλανδία (LS-factor=0.2), ακολουθούμενη από τη Δανία, τα κράτη της Βαλτικής και τη Φινλανδία (LS<0,5) (Πίνακας 4.5). Η μέση τιμή του συντελεστή LS για ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 1.63, με μια διακύμανση από το 0 έως το 99. Τιμές του συντελεστή LS μεγαλύτερες από 25 βρέθηκαν μόλις σε ένα ποσοστό 0.1% του συνόλου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κυρίως στην Αυστρία, Ελλάδα, Ιταλία και Σλοβενία (Panagos et al., 2015).

**Πίνακας 4.5:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή LS ανά χώρα.

Χώρα	Κωδικός χώρας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
Αυστρία	AT	5,20	5,91	1,14
Βελγιο	BE	0,68	0,95	1,40
Βουλγαρία	BG	2,34	3,00	1,28
Κύπρος	CY	2,31	2,72	1,18
Τσέχικη Δημοκρατία	CZ	1,36	1,57	1,15
Γερμανία	DE	1,05	1,64	1,57
Δανία	DK	0,32	0,34	1,07
Εσθονία	EE	0,32	0,31	0,96

Ισπανία	ES	2,24	2,97	1,33
Φιλανδία	FI	0,41	0,64	1,56
Γαλλία	FR	1,72	3,12	1,81
Ελλάδα	GR	3,79	4,05	1,07
Κροατία	HR	1,89	2,56	1,36
Ουγγαρία	HU	0,59	0,99	1,69
Ιρλανδία	IE	1,01	1,54	1,52
Ιταλία	IT	3,63	4,86	1,34
Λιθουανία	LT	0,35	0,38	1,09
Λουξεμβούργο	LU	1,62	1,68	1,04
Λετονία	LV	0,39	0,36	0,93
Μάλτα	MT	1,34	1,97	1,46
Ολλανδία	NL	0,19	0,20	1,05
Πολωνία	PL	0,52	0,86	1,67
Πορτογαλία	PT	1,80	2,25	1,25
Ρουμανία	RO	2,09	2,82	1,35
Σουηδία	SE	0,99	1,51	1,52
Σλοβενία	SI	3,87	4,21	1,09
Σλοβακία	SK	2,57	2,84	1,11
Ηνωμένο Βασίλειο	UK	1,40	2,02	1,45





**Εικόνα 4.9:** Χάρτης υψηλής ανάλυσης (25 m μέγεθος κελιού κανάβου) του συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS στην Ευρώπη (Panagos et al., 2015).

#### 4.4 Ο συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (C)

Οι γεωργικές πρακτικές διαχείρισης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της διάβρωσης του εδάφους. Για παράδειγμα το ποσοστό της εδαφικής απώλειας μειώνεται εκθετικά όσο η κάλυψη σε βλάστηση αυξάνει. Εκτός της κάλυψης σε βλάστηση, οι ποικίλες χρήσεις γης και οι παράγοντες διαχείρισης επηρεάζουν την εδαφική απώλεια. Η επίδραση της χρήσης γης και διαχείρισης συχνά παραμετροποιείται στο συντελεστή διαχείρισης- κάλυψης γης (C-factor). Ο συντελεστής αυτός είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας όσον αφορά τη λήψη πολιτικών αποφάσεων και χρήσεων γης, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύει συνθήκες που μπορούν εύκολα να διαχειριστούν ώστε να μειωθεί η διάβρωση. Στην RUSLE ο συντελεστής C υπολογίζει πως η κάλυψη του εδάφους, οι καλλιέργειες και η διαχείριση των καλλιεργειών συμβάλλουν στην απώλεια εδάφους και πως αυτό διαφέρει όταν αφορά γυμνές χερσαίες περιοχές.

Η μεθοδολογία για την εκτίμηση του συντελεστή C στην Ευρωπαϊκή Ένωση περιλαμβάνει την χρήση πανευρωπαϊκών δεδομένων, όπως αυτά του προγράμματος κάλυψης/χρήσης γης CORINE, τις βιοφυσικές ιδιότητες που προκύπτουν μέσω Τηλεπισκόπησης (ENVISAT/MERIS), και τα στατιστικά στοιχεία για τις γεωργικές καλλιέργειες (Eurostat).

Ο υπολογισμός του συντελεστή C πραγματοποιείται με το μοντέλο LANDUM που έχει αναπτυχθεί σε Ευρωπαϊκή κλίμακα και διαφοροποιείται μεταξύ των αρόσιμων γαιών και των άλλων χρήσεων γης (μη αρόσιμες). Το LANDUM βασίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση, σε δεδομένα τηλεπισκόπησης υψηλής χωρικής ανάλυσης και σε στατιστικά στοιχεία για τις γεωργικές καλλιέργειες και τις πρακτικές διαχείρισης. Τεχνητές εκτάσεις, υγρότοποι, υδάτινα σώματα, απογυμνωμένες βραχώδεις εκτάσεις, παραλίες και παγετώνες δεν λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση του συντελεστή C (Panagos et al., 2015b).

Το NUTS (Nomenclature of Territorial Units for Statistics) είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιείται από τις διοικητικές αρχές και τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για την ταξινόμηση της ευρωπαϊκής επικράτειας σε ιεραρχικά επίπεδα ανάλογα με το μέγεθος του πληθυσμού. Το επίπεδο NUTS2 αντιπροσωπεύει περιοχές των 0,8 – 3 εκατομμύρια ανθρώπων για τους οποίους περιφερειακές πολιτικές εφαρμόζονται και υπάρχουν διαθέσιμα γεωργικά δεδομένα. Μεταξύ των στατιστικών στοιχείων που η στατιστική υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Eurostat) παρέχει στο κοινό, τρεις βάσεις δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη σε επίπεδο NUTS2: (α) περιφερειακές γεωργικές στατιστικές και χρήσεις γης, (β) μέθοδοι άρωσης, και (γ) προστασία του εδάφους. Η πρώτη βάση δεδομένων περιλαμβάνει ετήσιες στατιστικές των καλλιεργειών στην περιοχή (σε εκτάρια) για τις συγκεκριμένες καλλιέργειες κατά τη διάρκεια του έτους συγκομιδής σε περιφερειακό επίπεδο (NUTS2). Οι μέσες τιμές για κάθε κατηγορία καλλιέργειας της περιόδου 2008-2012 έχουν ληφθεί προκειμένου να ενσωματωθεί η διακύμανση των καλλιεργειών κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (Panagos et al., 2015b).

Στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις που καταλαμβάνουν περίπου το 25,2% της ΕΕ, ο συντελεστής C υπολογίζεται με βάση τη σύνθεση των καλλιεργειών σε περιφερειακό επίπεδο (Εικόνα 4.10). Χρησιμοποιώντας τα στατιστικά στοιχεία για τις 17 καλλιέργειες (συμπεριλαμβάνεται και η αγρανάπαυση) όπως έχουν προκύψει από την Eurostat και τις κυρίαρχες τιμές του συντελεστή C για τις καλλιέργειες βάση προηγούμενων μελετών, υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή C βάση των εξισώσεων 4.4 και 4.5, ανά περιφέρεια NUTS2.

$$C_{arable} = C_{crop} \times C_{management} \quad (4.8)$$

$$C_{crop} = \sum_{n=1}^{17} C_{cropn} \times \%NUTS2_{cropn} \quad (4.9)$$

όπου  $C_{crop}$  είναι ο συντελεστής C που βασίζεται στην σύνθεση των καλλιεργειών μιας αγροτικής περιοχής.

Έπειτα ποσοτικοποιούνται οι πρακτικές διαχείρισης ( $C_{management}$ ) με τη χρήση της εξίσωσης 4.10, που οδηγούν στη μείωση της απώλειας εδάφους από τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

$$C_{management} = C_{tillage} \times C_{residues} \times C_{cover} \quad (4.10)$$

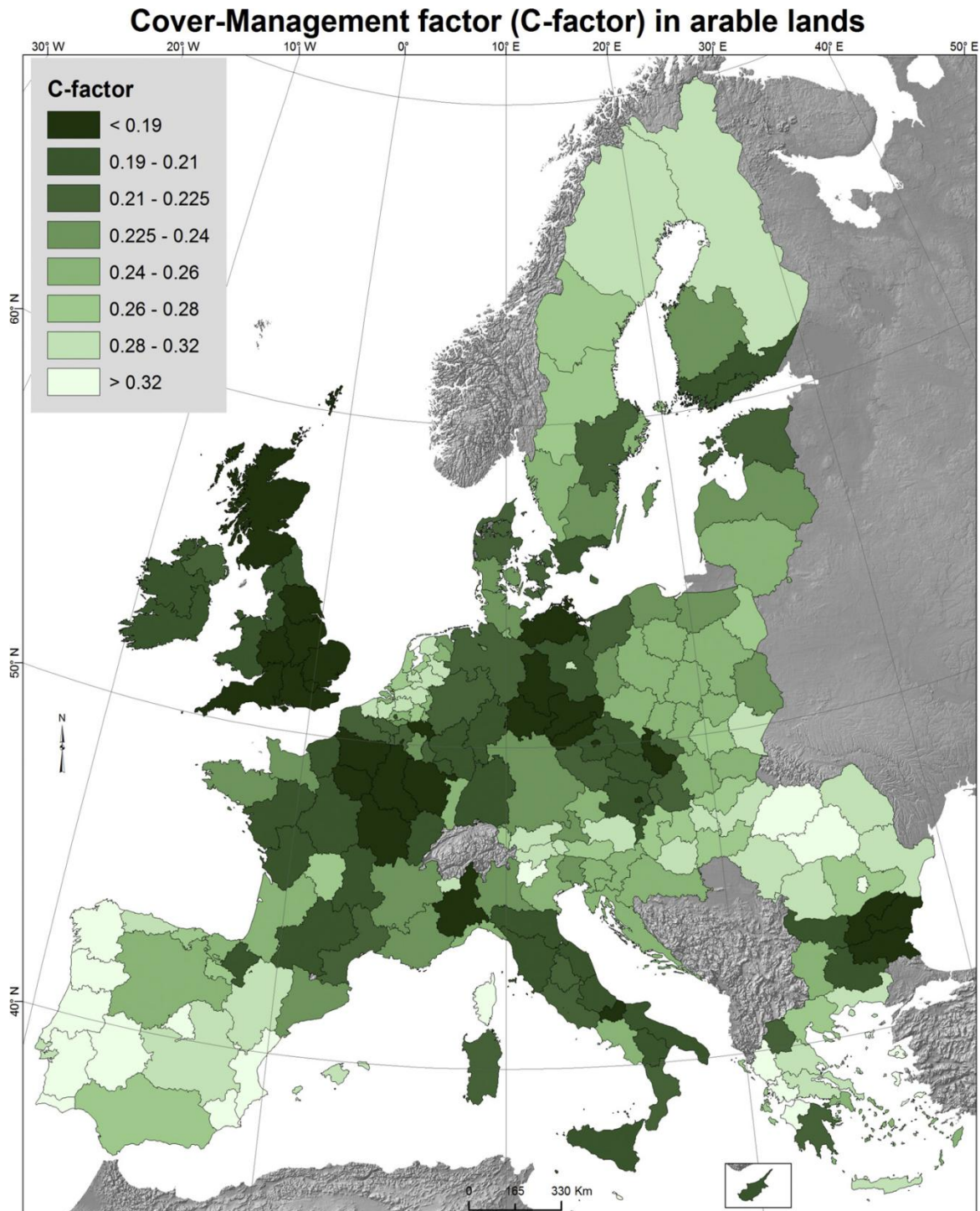
$C_{tillage}$ : αφορά τις πρακτικές οργώματος

$C_{residues}$ : αφορά την κάλυψη του καλλιεργούμενου εδάφους με φυτικά υπολείμματα

$C_{cover}$ : αφορά το είδος της καλλιέργειας που φυτεύεται προσωρινά

Σύμφωνα με την εξίσωση 4.8 κάθε περιφέρεια έχει διαφορετικό  $C_{crop}$  και αυτό συμβαίνει λόγω της σύνθεσης των καλλιεργειών σε κάθε περιφέρεια. Αυτές που έχουν καλλιέργειες επιρρεπείς στην διάβρωση εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή C.

Η διάβρωση του εδάφους από το νερό επηρεάζεται από το όργωμα, ανάλογα με το βάθος που γίνεται, την κατεύθυνση και το χρονοδιάγραμμα του οργώματος, τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και τον αριθμό των διελεύσεων που πραγματοποιούνται. Σε γενικές γραμμές, όσο μικρότερη είναι η διαταραχή της βλάστησης στην ή κοντά στην επιφάνεια, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η πρακτική οργώματος στην μείωση της εδαφικής διάβρωσης. Στο 74,4% των καλλιεργήσιμων εκτάσεων εφαρμόζεται το συμβατικό όργωμα, στο 21,6% εφαρμόζεται το συντηρητικό όργωμα και στο 4% εφαρμόζεται η σπορά χωρίς όργωμα. Οι αγρότες συχνά οργώνουν την γη μετά από τη συγκομιδή κάτι που αυξάνει τον κίνδυνο της διάβρωσης. Η διατήρηση υπολειμμάτων καλλιέργειας στην επιφάνεια του εδάφους όχι μόνο προστατεύει το έδαφος από την διάβρωση δι'επικρούσεως σταγόνων βροχής, αλλά παράλληλα αυξάνει τα ποσοστά της διείδωσης και μειώνει την επιφανειακή απορροή με αποτέλεσμα λιγότερη απώλεια εδάφους. Μετά την καλοκαιρινή συγκομιδή για την προστασία του γυμνού εδάφους φυτεύονται ορισμένες καλλιέργειες ώστε να προστατεύουν το έδαφος το χειμώνα (και νωρίς την άνοιξη). Είναι μια τεχνική χαμηλού κόστους με κύριο στόχο την προστασία του εδάφους και των θρεπτικών συστατικών του (Panagos et al., 2015b).



**Εικόνα 4.10:** Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Panagos et al., 2015b).

Στις μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις ο συντελεστής C υπολογίζεται σταθμίζοντας το εύρος των βιβλιογραφικών τιμών βάση της κλασματικής κάλυψης βλάστησης, η οποία εκτιμάται μέσω των δορυφορικών δεδομένων. Συγκεκριμένα η επιρροή της πυκνότητας βλάστησης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη χρήση των βιοφυσικών παραμέτρων που προέρχονται από τις δορυφορικές εικόνες MERIS (Panagos et al., 2015b).

$$C_{\text{NonArable}} = \text{Min}(C_{\text{landuse}}) + \text{Range}(C_{\text{landuse}}) \times (1 - F_{\text{cover}}) \quad (4.11)$$

$C_{\text{landuse}}$ : οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής C βάση βιβλιογραφίας

$F_{\text{cover}}$ : είναι ένα επίπεδο βλάστησης διαθέσιμο στο πρόγραμμα Copernicus και ομαλοποιείται στο διάστημα [0-1], το οποίο περιγράφει την ποσοστιαία κάλυψη του εδάφους από κάθε είδους βλάστηση.

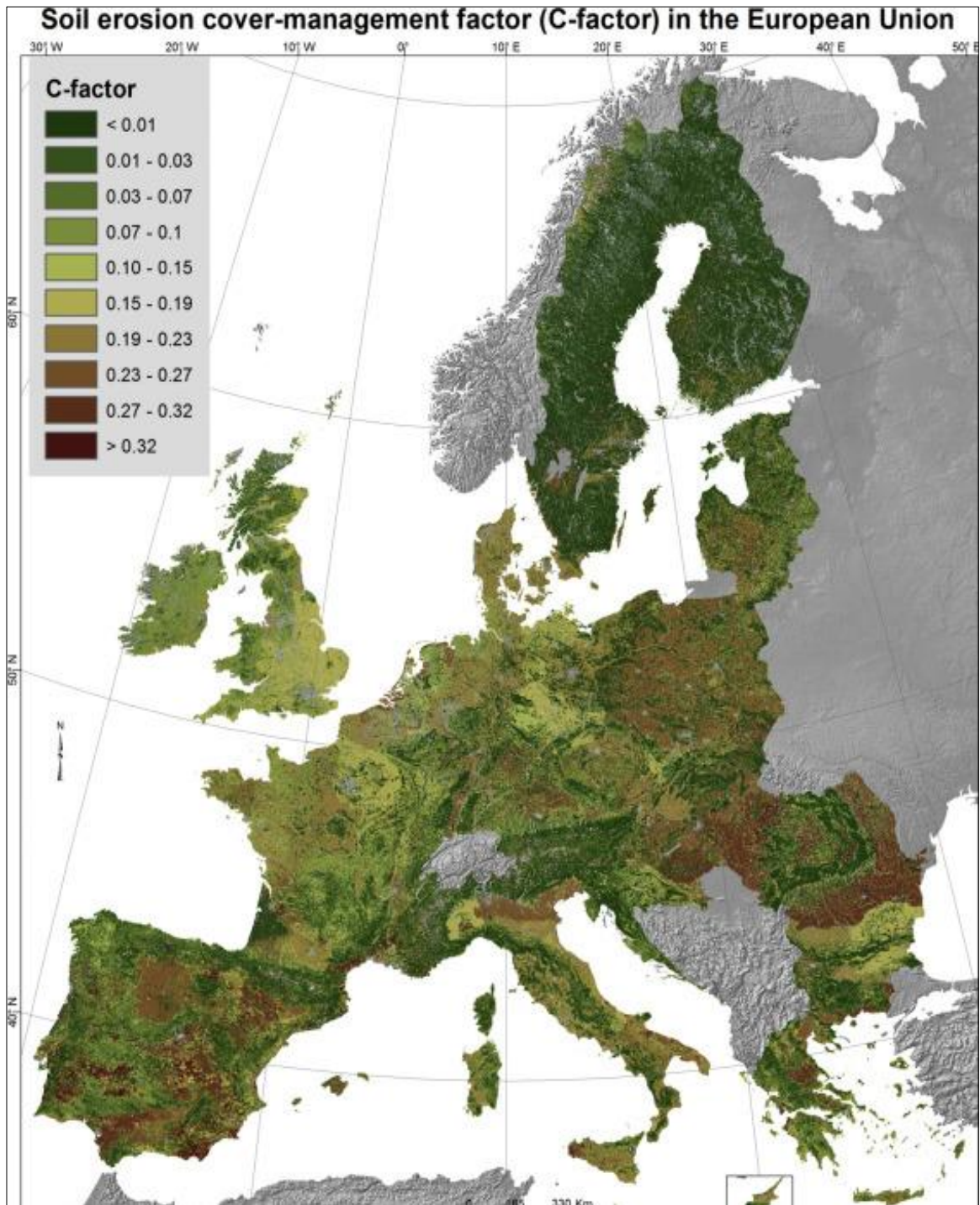
Ο συντελεστής C εκτιμάται σε γεωργικές εκτάσεις (αροτραίες και μόνιμες καλλιέργειες), βοσκοτόπους, λιβάδια, δάση και ημι-φυσικές περιοχές (Εικόνα 4.11). Αυτή η περιοχή, η οποία είναι δυνητικά διαβρώσιμη, αντιπροσωπεύει το 90,3% του συνόλου της επιφάνειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 28 χωρών. Η μέση τιμή του συντελεστή C στην ΕΕ εκτιμάται ότι είναι 0,1043, με εξαιρετικά υψηλή μεταβλητότητα, λαμβάνοντας τιμές που κυμαίνονται από 0,0001 έως 0,526. Τα δάση έχουν τη χαμηλότερη μέση τιμή του συντελεστή (0,00116) και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις μαζί με τις περιοχές αραιής βλάστησης έχουν την υψηλότερη μέση τιμή (0,233 και 0,2651 αντίστοιχα).

Σε επίπεδο χώρας, η υψηλότερη μέση τιμή του συντελεστή C (> 0,15) βρίσκεται στην Ουγγαρία, στη Δανία, στη Μάλτα και στη Ρουμανία. Η Δανία και η Ουγγαρία έχουν τα υψηλότερα ποσοστά (%) των καλλιεργήσιμων εκτάσεων, και η Ρουμανία έχει το δεύτερο υψηλότερο συντελεστή C λόγω της σύνθεσης των καλλιεργειών και της ελάχιστης εφαρμογής πρακτικών οργώματος. Στη Μάλτα, ο συντελεστής C που αφορά τις μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις είναι υψηλός λόγω της επικράτησης γης που χρησιμοποιείται κυρίως για τη γεωργία, με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης (κατηγορία 243 από το CORINE). Οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή C (<0,075) εντοπίζονται στη Φινλανδία και τη Σουηδία, ακολουθεί η Σλοβενία, η Εσθονία, η Λετονία και η Αυστρία, όπου το δάσος είναι η κυρίαρχη χρήση γης.

**Πίνακας 4.6:** Συντελεστής C ανά χώρα

Χώρα	Συντελεστής C	Καλλιεργήσιμες εκτάσεις		Μη αρόσιμες εκτάσεις	
		Συντελεστής C	% Κάλυψη	Συντελεστής C	% Κάλυψη
Αυστρία	0,071	0,218	15,3%	0,045	84,7%
Βελγιο	0,121	0,245	27,9%	0,073	72,1%
Βουλγαρία	0,105	0,188	37,5%	0,055	62,5%
Κύπρος	0,129	0,193	30,8%	0,100	69,2%
Τσέχικη Δημοκρατία	0,107	0,199	41,1%	0,042	58,9%
Γερμανία	0,112	0,200	42,1%	0,048	57,9%
Δανία	0,178	0,222	72,4%	0,061	27,6%
Εσθονία	0,059	0,217	16,7%	0,027	83,3%

Ισπανία	0,140	0,289	24,9%	0,090	75,1%
Φιλανδία	0,023	0,231	6,2%	0,010	93,8%
Γαλλία	0,108	0,202	30,3%	0,068	69,7%
Ελλάδα	0,111	0,280	17,5%	0,075	82,5%
Κροατία	0,075	0,255	7,5%	0,061	92,5%
Ουγγαρία	0,188	0,275	58,3%	0,066	41,7%
Ιρλανδία	0,082	0,202	9,6%	0,069	90,4%
Ιταλία	0,119	0,211	30,4%	0,078	69,6%
Λιθουανία	0,121	0,242	36,5%	0,051	63,5%
Λουξεμβούργο	0,082	0,215	13,4%	0,061	86,6%
Λετονία	0,070	0,237	16,4%	0,037	83,6%
Μάλτα	0,151	0,434	1,7%	0,148	98,3%
Ολλανδία	0,133	0,260	26,4%	0,088	73,6%
Πολωνία	0,140	0,247	47,3%	0,043	52,7%
Πορτογαλία	0,123	0,352	14,8%	0,083	85,2%
Ρουμανία	0,150	0,296	38,5%	0,058	61,5%
Σουηδία	0,032	0,237	8,1%	0,014	91,9%
Σλοβενία	0,057	0,248	5,8%	0,046	94,2%
Σλοβακία	0,106	0,235	36,5%	0,032	63,5%
Ηνωμένο Βασίλειο	0,099	0,177	32,2%	0,062	67,8%



**Εικόνα 4.11:** Χάρτης υψηλής ανάλυσης (100 m μέγεθος κελιού κανάβου) του συντελεστή διαχείρισης - κάλυψης γης στην Ευρώπη (Panagos et al., 2015b).

#### 4.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P)

Από τους έξι συντελεστές της μεθόδου RUSLE/USLE, ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης ή και συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών κατά της διάβρωσης (Support Practice factor) που αντικατοπτρίζει την επίδραση των διάφορων καλλιεργητικών τεχνικών στην μείωση της εδαφικής διάβρωσης, σπάνια λαμβάνεται υπόψη στην μοντελοποίηση του κινδύνου της εδαφικής διάβρωσης σε υπο-ηπειρωτική κλίμακα, δεδομένου ότι είναι δύσκολο να εκτιμηθεί για μεγάλες περιοχές.

Βάση βιβλιογραφίας οι τιμές που μπορεί να λαμβάνει ο συντελεστής P κυμαίνονται μεταξύ 0~1, με τιμές από περίπου 0.2 για τη χρήση αναβαθμίδων και σειράς μικρών αναχωμάτων κάθετων στην κλίση του εδάφους, σε 1.0 όπου δεν υπάρχουν πρακτικές ελέγχου της διάβρωσης (Δ.Παναγούλια-Γ.Δήμου, Σημειώσεις Μηχανικής των Φερτών Υλικών).

Όσον αφορά στην προστασία των εδαφών από την εδαφική διάβρωση, η Γεωβάση Δεδομένων Χαρακτηριστικών Στοιχείων Εδαφοκάλυψης GAEC (Good Agricultural and Environmental Condition ) έχει εισάγει, μεταξύ άλλων, την πρόληψη της διάβρωσης μέσω των γεωργικών πρακτικών (όργωμα και φύτευση της πλαγιάς) σε λοφώδεις περιοχές και τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του τοπίου, όπως πέτρινους τοίχους (και αναβαθμίδες) και ζώνες ανάσχεσης. Ορισμένα κράτη μέλη έχουν θέσει την απαίτηση για καλλιέργειες παράλληλα με τις ισοϋψείς για τις περιοχές που υπερβαίνουν μια ορισμένη κλίση.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εκτίμηση του συντελεστή P, χρησιμοποιεί δεδομένα από το πρόγραμμα LUCAS (LUCAS, 2012), που περιλαμβάνει γεωαναφερμένες επίγειες παρατηρήσεις τόσο στην χρήση/κάλυψη γης όσο και στα χαρακτηριστικά του τοπίου για πάνω από 270.000 σημεία παρατήρησης που επισκέφθηκαν οι αρμόδιοι καταμετρητές το 2012. Η έρευνα αφορά τα 27 κράτη μέλη (EE-27) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καλύπτοντας μια έκταση περίπου 4,3 km<sup>2</sup> με μια μέση πυκνότητα ενός σημείου παρατήρησης ανά 16 km<sup>2</sup>. Εκτός των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών καταγράφονται επιπλέον πληροφορίες, όπως η κλίση πρανούς, η παρουσία βόσκησης, το ύψος δέντρων και η διαχείριση άρδευσης. Ο τοπογράφος περπατά κατά μήκος μιας τομής και καταγράφει κάθε μετάβαση στη κάλυψη γης που παρατηρεί χρησιμοποιώντας τα πρότυπα σύμφωνα με την κατάταξη LUCAS, και την εμφάνιση των γραμμικών χαρακτηριστικών του τοπίου. Η τομή είναι μια νοητή ευθεία γραμμή 250 m προς την ανατολή από το σημείο παρατήρησης. Στη μελέτη για τον προσδιορισμό του συντελεστή P, ως γραμμικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται υπόψη μόνο οι πέτρινοι τοίχοι και το γρασίδι στα περιθώρια του χωραφιού. Οι τοπογράφοι καταγράφουν την πυκνότητά τους στο εσωτερικό της τομής των 250 m. Η συντριπτική πλειοψηφία των παρατηρούμενων τομών όπου αυτές οι πρακτικές εμφανίζονται, έχει 1 χαρακτηριστικό ανά τομή. Μεταξύ του συνολικού αριθμού των παρατηρήσεων, οι 226.653 εγγραφές (83,9%) θεωρούνται έγκυρες για αυτή τη μελέτη επειδή οι υπόλοιπες δεν έχουν ολοκληρωθεί από κάποιον τοπογράφο (Panagos et al.,2015).



Για τον υπολογισμό του συντελεστή ελέγχου της διάβρωσης P, λαμβάνονται υπόψη τρεις υπό-συντελεστές (εξίσωση 4.12): α) η καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών, P<sub>c</sub> β) η διατήρηση των πέτρινων τοίχων (ή ξερολιθιών), P<sub>sw</sub> και γ) οι ακαλλιέργητες λωρίδες γρασιδιού στα περιθώρια του χωραφιού, P<sub>gm</sub>.

$$P = P_c \times P_{sw} \times P_{gm} \quad (4.12)$$

Η καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών είναι μια συγκεκριμένη υποστηρικτική πρακτική που εφαρμόζεται μόνο στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 25,2% της συνολικής έκτασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα περιλαμβάνουν την εκτέλεση δραστηριοτήτων στους αγρούς, όπως άροση, αυλάκωμα και φύτευση κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών. Με αυτή την πρακτική επιδιώκεται η κατακράτηση νερού μέσα στον επιφανειακό εδαφικό ορίζοντα και η επιβράδυνση της ταχύτητας απορροής, παρέχοντας χρόνο για την απορρόφηση του νερού από το έδαφος. Ο συντελεστής P<sub>c</sub> εκτιμάται χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) σε 25 m ανάλυση. Η μέση τιμή υπολογίζεται σε 0,9985 (0,9942 σε καλλιεργήσιμα εδάφη), καθώς μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ μόνο 8 έχουν λειτουργήσει την πρακτική αυτή, όπως ορίζει η GAEC τους, η οποία κυρίως εφαρμόζεται σε κλίσεις πρανών πάνω από 10%. Η μεγαλύτερη επίδραση εκτιμάται στην Κύπρο (0,990) ακολουθούμενη από την Ισπανία και την Ελλάδα, ενώ η χαμηλότερη μέση τιμή βρίσκεται στη Σλοβενία λόγω της πολύ περιορισμένης εφαρμογής της πρακτικής αυτής (μονάχα σε πρανή με κλίση >20%) (Πίνακας 4.7).

**Πίνακας 4.7:** Πυκνότητα των πέτρινων τοίχων και των λωρίδων γρασιδιού κατά μήκος μιας τομής και οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής P (P<sub>sw</sub> και P<sub>gm</sub>) για την Ευρώπη (Panagos et al., 2015).

Αριθμός εμφάνισης των καλλιεργητικών πρακτικών	% του συνόλου των παρατηρήσεων με πέτρινους τοίχους	P <sub>sw</sub>	% του συνόλου των παρατηρήσεων με λωρίδες γρασιδιού	P <sub>gm</sub>
0	95,08%	1	72,99%	1
1	2,51%	0,707	11,36%	0,853
2	1,10%	0,577	9,73%	0,789
3	0,53%	0,500	3,06%	0,750
4	0,32%	0,448	1,70%	0,724
5	0,15%	0,408	0,60%	0,704
6	0,10%	0,378	0,30%	0,689
7	0,06%	0,354	0,12%	0,677
8	0,05%	0,334	0,07%	0,667
>8	0,09%	0,317	0,07%	0,660
Σύνολο	100,00%		100,00%	

Οι πέτρινοι τοίχοι είναι κτισμένοι κυρίως στις λοφώδεις περιοχές, ως επί το πλείστον των χωρών της Μεσογείου, μειώνοντας το μήκος του πρηνούς και τη ταχύτητα της επιφανειακής ροής. Για να καταγραφούν από τους τοπογράφους του LUCAS πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 m σε μήκος (LUCAS, 2013). Η επίδραση των πέτρινων τοίχων λαμβάνεται υπόψη για όλες τις κατηγορίες χρήσεων γης όπως αυτές καταγράφονται στο CORINE, εκτός των υδάτινων σωμάτων και των τεχνητών επιφανειών. Από τον πίνακα 4.7 είναι κατανοητό ότι μονάχα στο 5% του συνολικού αριθμού των παρατηρήσεων καταγράφονται πέτρινοι τοίχοι. Ανάλογα με την πυκνότητα τους διαμορφώνονται οι τιμές του συντελεστή  $P_{sw}$ , οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0,32 και 0,71. Στη συνέχεια με τη Kriging ως μέθοδο παρεμβολής και τη χρήση της εξίσωσης 4.12 εκτιμάται ο συντελεστής  $P_{sw}$  σε ανάλυση 1 km. Η μέση τιμή για τα 28 κράτη μέλη υπολογίζεται σε 0,9884 και η μεγαλύτερη επίδραση της πρακτικής αυτής παρατηρείται στη Μάλτα ( $P_{sw} = 0,529$ ) (Panagos et al.,2015).

Οι ακαλλιέργητες λωρίδες γρασιδιού στα περιθώρια του χωραφιού για να καταγραφούν στη βάση δεδομένων του LUCAS πρέπει να έχουν πλάτος που να κυμαίνεται από 1-3 m και μήκος που να υπερβαίνει τα 20 m (LUCAS, 2013). Η πρακτική αυτή εμποδίζει τη απορροή, επηρεάζει τη διείσδυση, παγιδεύει τα ιζήματα και μειώνει τη μεταφορά των φερτών υλών. Η επίδραση των λωρίδων γρασιδιού εκτιμάται στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, στους βοσκοτόπους και στις ετερογενείς γεωργικές περιοχές οι οποίες αντιπροσωπεύουν το 80% του συνόλου των παρατηρήσεων. Ο συντελεστής  $P_{gm}$  εκτιμάται βάση των παρεμβαλλόμενων δεδομένων των ακαλλιέργητων λωρίδων γρασιδιού σε ανάλυση 1 km. Η μέση τιμή για τα 28 κράτη μέλη υπολογίζεται σε 0,9829 και η μεγαλύτερη επίδραση της πρακτικής αυτής παρατηρείται στο Βέλγιο, στη Ολλανδία, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στη Γαλλία (Πίνακας 4.8) Αυτός ο συντελεστής είναι ο πιο σημαντικός (σε σύγκριση με τους συντελεστές  $P_c$  και  $P_{sw}$ ) στην εκτίμηση των πρακτικών υποστήριξης για την Ευρώπη λόγω της αφθονίας των λωρίδων γρασιδιού (παρατηρείται στο 27% των τομών του LUCAS) (Panagos et al.,2015).

**Πίνακας 4.8:** Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης P και οι υπο-συντελεστές των πρακτικών  $P_c$ ,  $P_{sw}$ ,  $P_{gm}$  για κάθε χώρα (Panagos et al.,2015).

Χώρα	$P_c$	$P_{sw}$	$P_{gm}$	P
AT	1	0,9996	0,9887	0,9883
BE	1	0,9998	0,9467	0,9465
BG	1	0,9999	0,9912	0,9911
CY	0,9909	0,9828	0,9991	0,9730
CZ	1	0,9999	0,9983	0,9982

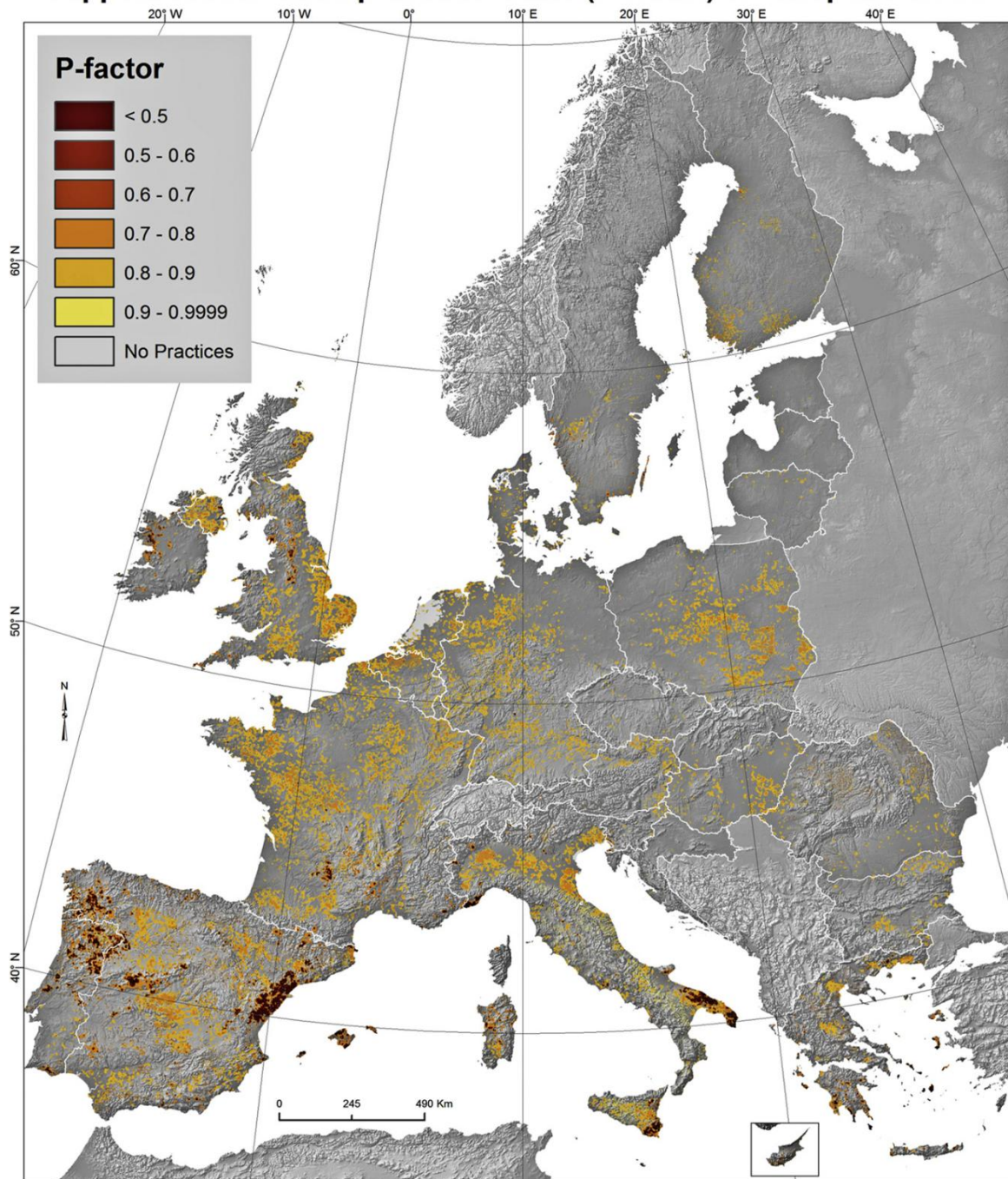
DE	1	0,9998	0,9784	0,9782
DK	1	0,9999	0,9844	0,9843
EE	0,9995	0,9998	0,9996	0,9989
ES	0,9926	0,9580	0,9778	0,9293
FI	1	0,9998	0,9943	0,9942
FR	1	0,9935	0,9691	0,9627
GR	0,9939	0,9676	0,9883	0,9502
HR	1	0,9999	0,9995	0,9994
HU	1	1	0,9840	0,9840
IE	1	0,9738	0,9952	0,9690
IT	0,9992	0,9786	0,9725	0,9519
LT	1	0,9999	0,9980	0,9980
LU	1	0,9991	0,9725	0,9716
LV	1	0,9999	0,9995	0,9995
MT	0,9993	0,5299	0,9915	0,5251
NL	1	0,9999	0,9561	0,9561
PL	1	0,9999	0,9781	0,9781
PT	1	0,9245	0,9921	0,9178
RO	0,9948	0,9999	0,9950	0,9898
SE	1	0,9976	0,9984	0,9961
SI	0,9999	0,9919	0,9940	0,9860
SK	1	0,9999	0,9986	0,9985
UK	1	0,9878	0,9647	0,9528

Οι υποστηρικτικές πρακτικές έχουν τοπική επίδραση στη μείωση του κινδύνου της εδαφικής διάβρωσης. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη εφαρμογή των μέτρων στήριξης, ειδικά στην καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών. Επίσης οι πέτρινοι τοίχοι περιορίζονται

σε Ευρωπαϊκή κλίμακα και μπορούν να συμβάλλουν περισσότερο αποτελεσματικά εάν είναι χτισμένοι σε απόκρημνες πλαγιές. Η εφαρμογή των κατευθυντηρίων γραμμών της GAEC έχει αντίκτυπο στη μείωση της εδαφικής απώλειας ιδιαίτερα στις ημιορεινές περιοχές. Στο μέλλον πολιτικά όργανα όπως η GAEC θα μπορούν να εφαρμόζουν σε όλα τα κράτη μέλη την κατά ισοΰψείς καλλιέργεια σε πρανή με κλίση λιγότερο από 10% (π.χ. 5%), διατηρώντας τους πέτρινους τοίχους και αυξάνοντας των αριθμό της φύτευσης γρασιδιού στα περιθώρια των χωραφιών ειδικά σε περιοχές που είναι ευαίσθητες στη διάβρωση.

Ο χάρτης του συντελεστή ελέγχου της διάβρωσης P με ανάλυση 1 km (Εικόνα 4.12), αναδεικνύει τις περιοχές όπου εφαρμόζονται κυρίως οι υποστηρικτικές πρακτικές. Η μέση τιμή του συντελεστή P για τα 28 κράτη μέλη εκτιμάται σε 0,9702 και επομένως οι τρεις πρακτικές επιφέρουν μείωση στο συνολικό κίνδυνο της εδαφικής διάβρωσης κατά 3%. Παρόλο που αποτελεί ένα μικρό ποσοστό το αποτέλεσμα είναι σημαντικά μεγαλύτερο ειδικά σε περιοχές όπως η Μεσόγειος ή η Ζώνη των θινών που είναι ευαίσθητες στην διάβρωση. Οι πρακτικές εφαρμόζονται κυρίως σε περιοχές επιρρεπείς στην εδαφική διάβρωση λόγω των μεγάλων τιμών του συντελεστή LS. Ο αντίκτυπος των πρακτικών υποστήριξης κατά κύριο λόγο παρατηρείται σε γεωργικές περιοχές όπου ο κίνδυνος διάβρωσης του εδάφους μειώνεται κατά 5%.

### Support conservation practices factor (P-factor) in European Union



**Εικόνα 4.12:** Χάρτης του συντελεστή ελέγχου της διάβρωσης P στην Ευρώπη (Panagos et al., 2015).

Ο χάρτης αυτός μπορεί να συνδυαστεί με τον αντίστοιχο χάρτη του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R (Εικόνα 4.4). Οι περιοχές που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση (75%,  $R > 900 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) βρίσκονται κυρίως στη λεκάνη της Μεσογείου και έχουν τιμή του συντελεστή P ίση με 0,9574. Ενώ αντίθετα οι λιγότερο διαβρώσιμες περιοχές (25%,  $R > 410 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) έχουν τιμή του συντελεστή P ίση με 0,9845.

#### 4.6 Η εκτίμηση της εδαφικής απώλειας από τη υδατική διάβρωση στην Ευρώπη

Το Κέντρο Ερευνών (JRC) μελέτησε μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου RUSLE (RUSLE2015, με βάση τους Renard et al., 1997), η οποία υπολογίζει τον μέσο ετήσιο ρυθμό εδαφικής απώλειας από την επιφανειακή και την αυλακωτή διάβρωση, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = R \times K \times C \times P \times LS \quad (4.13)$$

όπου,

E= μέση ετήσια εδαφική απώλεια ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),

R= συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),

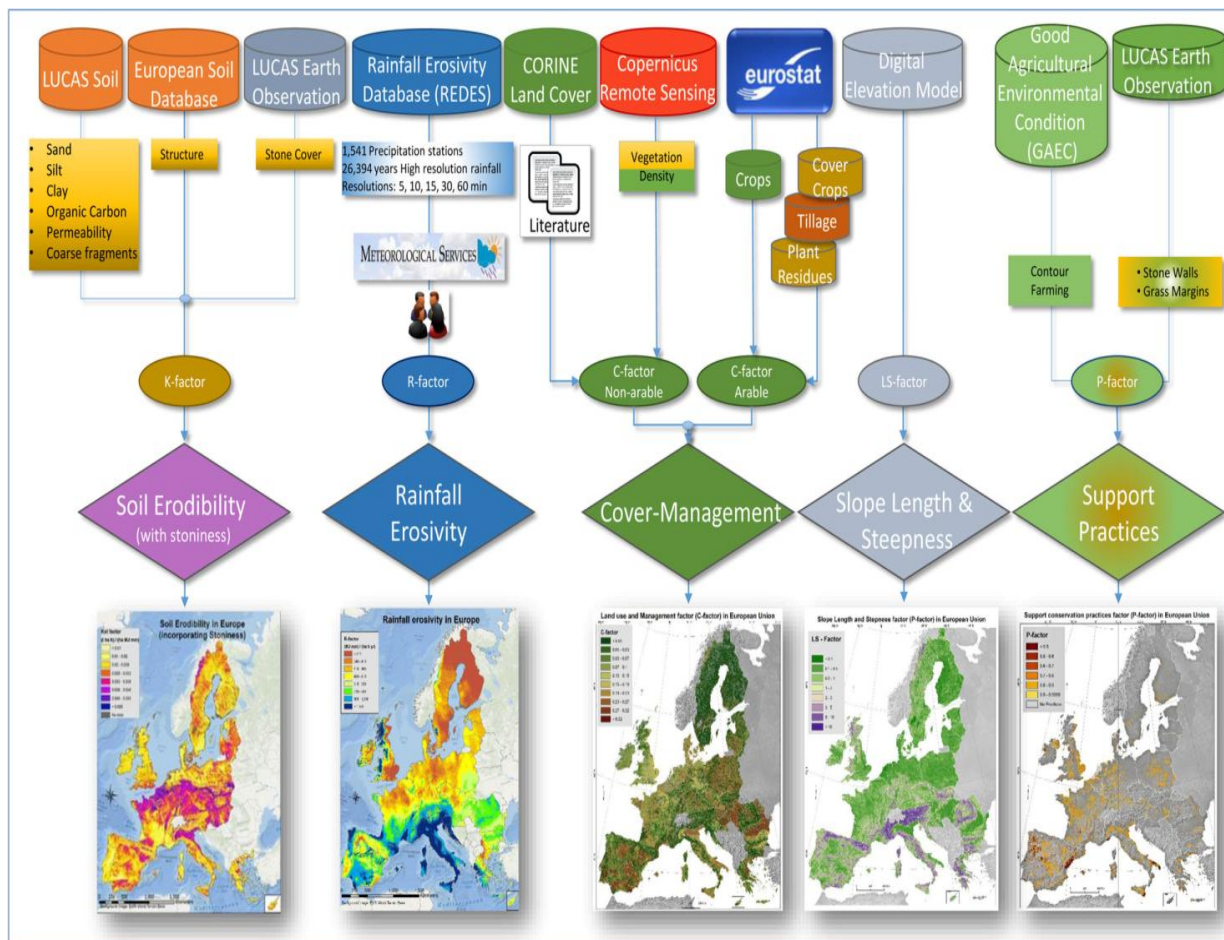
K= συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ( $t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ),

C= συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης (αδιάστατος)

LS= συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (αδιάστατος)

P= συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών (αδιάστατος)

Οι αναφερόμενοι συντελεστές περιγράφονται αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η ακολουθούμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση των συντελεστών αυτών. Για την εφαρμογή της RUSLE σε περιβάλλον Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, επιλέγεται η κλίμακα των 100 m για μέγεθος κελιού κανάβου ως η πλέον κατάλληλη, επειδή ο συντελεστής διαχείρισης και κάλυψης γης C (στα 100 m ανάλυση) μπορεί να μεταβληθεί ως αποτέλεσμα των πολιτικών παρεμβάσεων που επηρεάζουν τη χρήση της γης. Η ανάλυση των 100 m εμπίπτει επίσης μεταξύ των τιμών της χαμηλής ανάλυσης του συντελεστή K (500 m), του συντελεστή R (500 m), του συντελεστή P (1 km) και της πολύ υψηλής ανάλυσης του συντελεστή LS (25 m) (Panagos et al., 2015a).

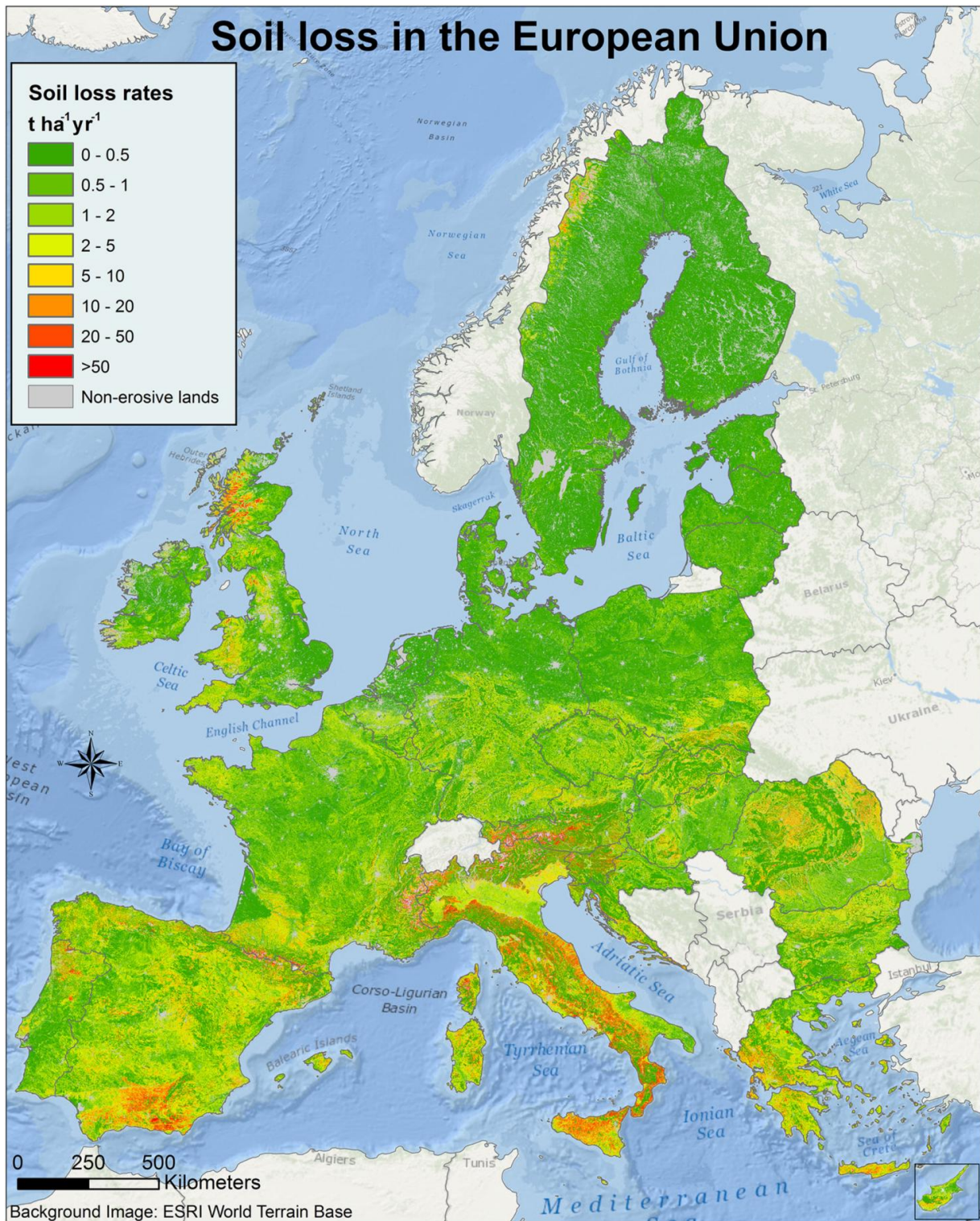


**Εικόνα 4.13:** Τα σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των συντελεστών εδαφικής απώλειας για την Ευρώπη στο μοντέλο της RUSLE2015 (Panagos et al., 2015a).

Η πιθανή απώλεια εδάφους εκτιμάται για το 90,3% της επιφάνειας της ΕΕ ( $3.941 \times 10^3 \text{ km}^2$  από τα συνολικά  $4.366 \times 10^3 \text{ km}^2$ ), καθώς το υπόλοιπο 9,7% αποτελείται από επιφάνειες οι οποίες δεν είναι επιρρεπείς στην εδαφική διάβρωση, όπως οι αστικές περιοχές, τα απογυμνωμένα πετρώματα, οι παγετώνες, οι υγρότοποι, οι λίμνες, τα ποτάμια, τα εσωτερικά ύδατα και τα θαλάσσια ύδατα.

Το 2010 επιλέγεται ως έτος αναφοράς του χάρτη εδαφικής απώλειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς αυτό είναι το πιο πρόσφατο έτος για το οποίο εκτιμούνται οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές. Συγκεκριμένα ο συντελεστής R βασίζεται στα δεδομένα του REDES τα οποία περιλαμβάνουν την πρώτη δεκαετία του 21ου αιώνα, το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων που αφορούν τον συντελεστή K προέρχονται από το LUCAS 2009, ο συντελεστής C βασίζεται στα δεδομένα εδαφικής κάλυψης CORINE (2006), στα δεδομένα τηλεπισκόπησης από το πρόγραμμα Copernicus (2011-2012) και στις βάσεις δεδομένων της Eurostat (στατιστικές φυτικών προϊόντων, πρακτικές οργάνωσης, καλλιέργειες που καλύπτουν τα χωράφια, φυτικά υπολείμματα) τα οποία χρησιμοποιούν το 2010 ως έτος αναφοράς τους, ο συντελεστής LS που εκτιμάται με το πρόσφατο δημοσιευμένο (2014)

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, και ο συντελεστής P που βασίζεται στην GAEC βάση δεδομένων (2010) και στις παρατηρήσεις πεδίου LUCAS (2012).



**Εικόνα 4.14:** Χάρτης της εδαφικής απώλειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (έτος αναφοράς: 2010) με βάση την RUSLE2015 (Panagos et al., 2015a).



Ο μέσος ετήσιος ρυθμός εδαφικής απώλειας λόγω υδατικής διάβρωσης για το έτος αναφοράς 2010 είναι  $2,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Η τιμή αυτή είναι σημαντικά υψηλότερη από τον ετήσιο μέσο ρυθμό σχηματισμού του εδάφους στην Ευρώπη που είναι  $1,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Η συνολική ετήσια απώλεια εδάφους στην ΕΕ είναι 970 Mt. Η διακύμανση του ρυθμού εδαφικής απώλειας (E) στην ΕΕ είναι πολύ υψηλή λόγω των διαφορετικών τοπογραφικών και κλιματολογικών συνθηκών, των χρήσεων γης, της διαχείρισης και των συνθηκών εδάφους.

Τα υψηλότερα ετήσια ποσοστά εδαφικής απώλειας παρατηρούνται στις περιοχές της Μεσογείου (μέσος/υψηλός συντελεστής C, υψηλός συντελεστής R και LS), ενώ οι χαμηλότερες τιμές συναντώνται στη Σκανδιναβία και στα κράτη της Βαλτικής (Εικόνα 4.14). Ο συνδυασμός της υψηλής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-factor) με τις σχετικά απότομες κλίσεις (LS-factor) οδηγεί επίσης σε αυξημένες τιμές ετήσιας απώλειας στις περιοχές των Άλπεων, στα Απέννινα, στα Πυρηναία, στη Σιέρα Νεβάδα, στη Δυτική Ελλάδα, στη δυτική Ουαλία και στη Σκωτία. Η επίδραση των χαμηλών επιπέδων της φυτοκάλυψης (C-factor) είναι περισσότερο ορατή στη νότια Ισπανία και στην ανατολική Ρουμανία. Ο αντίκτυπος της διαβρωσιμότητας του εδάφους (K-factor) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στην Loess Belt (Βέλγιο, τη νότια Γερμανία και τη νότια Πολωνία). Οι υποστηρικτικές πρακτικές (P-factor) έχουν αποτέλεσμα μόνο σε τοπικό επίπεδο και δεν είναι ορατές στον Ευρωπαϊκό χάρτη εδαφικής απώλειας (Panagos et al., 2015a).

Ο υψηλότερος μέσος ρυθμός εδαφικής απώλειας (σε επίπεδο χώρας) βρίσκεται στην Ιταλία ( $8,46 \text{ t/ha}$ ), ακολουθεί η Σλοβενία ( $7,43 \text{ t/ha}$ ) και η Αυστρία ( $7,19 \text{ t/ha}$ ), λόγω του συνδυασμού της υψηλής διαβρωτικότητας των βροχοπτώσεων και της απότομης τοπογραφίας (απότομες και μεγάλες κλίσεις). Οι μέσες τιμές του ρυθμού εδαφικής απώλειας των χωρών της Μεσογείου (Ισπανία, Ελλάδα, Μάλτα και Κύπρος) είναι επίσης υψηλότερες από ό,τι ο πανευρωπαϊκός μέσος όρος. Ο χαμηλότερος μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας εδάφους βρίσκεται στη Φινλανδία ( $0,06 \text{ t/ha}$ ), στην Εσθονία ( $0,21 \text{ t/ha}$ ) και στην Ολλανδία ( $0,27 \text{ t/ha}$ ). Όλες οι σκανδιναβικές και βαλτικές χώρες έχουν μέσο ετήσιο ρυθμό απώλειας εδάφους μικρότερο του  $0,52 \text{ t/ha}$ .

Μια χωρική ανάλυση βασιζόμενη στον τύπο κάλυψης της γης αποδεικνύει ότι οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις έχουν μέση ετήσια απώλεια εδάφους παρόμοια με εκείνη των θαμνωδών εκτάσεων, ενώ οι βοσκότοποι παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά, και οι δασώδεις περιοχές είναι σχεδόν μη-διαβρώσιμες. Η υψηλότερη απώλεια εδάφους συναντάται στις περιοχές με αραιή βλάστηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, όπου οι πρακτικές διαχείρισης και τα υποστηρικτικά μέτρα που εφαρμόζονται στο πλαίσιο της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής μειώνουν το ρυθμό της εδαφικής απώλειας κατά 20%. Τα εν λόγω μέτρα έχουν βοηθήσει στη μείωση της συνολικής εδαφικής απώλειας της ΕΕ κατά 9,5% συνολικά την τελευταία δεκαετία. Η διαχείριση της γης και οι γεωργικές πρακτικές που εφαρμόζονται στη ΕΕ κατά την τελευταία δεκαετία είναι πολύ βελτιωμένα σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, όπως μια 20ετία πρωτότερα. Ο

χάρτης της εδαφικής απώλειας σκιαγραφεί σημεία ενδιαφέροντος που απαιτούν ειδικά μέτρα προστασίας. Στο 12,7% των καλλιεργήσιμων εκτάσεων που λαμβάνουν χώρα μη βιώσιμοι ρυθμοί εδαφικής απώλειας ( $>5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ), οι υπεύθυνοι για τη χάραξη πολιτικής μπορούν να προωθήσουν μέτρα κατά της διάβρωσης χρηματοδοτώντας τις πρακτικές διαχείρισης της γης, όπως το μειωμένο όργωμα, τη φύτευση καλλιεργειών που καλύπτουν την γη, τη διατήρηση των φυτικών υπολειμμάτων στη επιφάνεια του εδάφους, τη διατήρηση των πέτρινων τοίχων, την αυξημένη χρήση γρασιδιού στα περιθώρια των χωραφιών και τη καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς καμπύλες (Panagos et al., 2015a).

## 5. Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στον Ελλαδικό χώρο

Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται τα επίπεδα πληροφορίας των συντελεστών της εξίσωσης RUSLE από την ιστοσελίδα της ESDAC, (<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion>), ενσωματώνοντας τα στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών για να εξαχθούν οι τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές στον Ελλαδικό χώρο, στα Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας και σε ορισμένες λεκάνες απορροής. Τα όρια των Υδατικών Διαμερισμάτων που χρησιμοποιούνται προέρχονται από την ιστοσελίδα [geodata.gov](http://geodata.gov). Συγκεκριμένα το αρχείο περιλαμβάνει τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα (Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών) της χώρας, σύμφωνα με την, από 16 Ιουλίου 2010, Απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων (ΦΕΚ 1383/8/2-9-10 και ΦΕΚ 1572/Β/28-9-10 που διορθώνει το Παράρτημα II του προηγούμενου ΦΕΚ). Τα δεδομένα προέρχονται από το θεματικό επίπεδο των υδατικών διαμερισμάτων της βάσης δεδομένων του Υδροσκοπίου και δημιουργήθηκαν με βάση την κοινοτική οδηγία περί υδάτων (2000/60/EC).

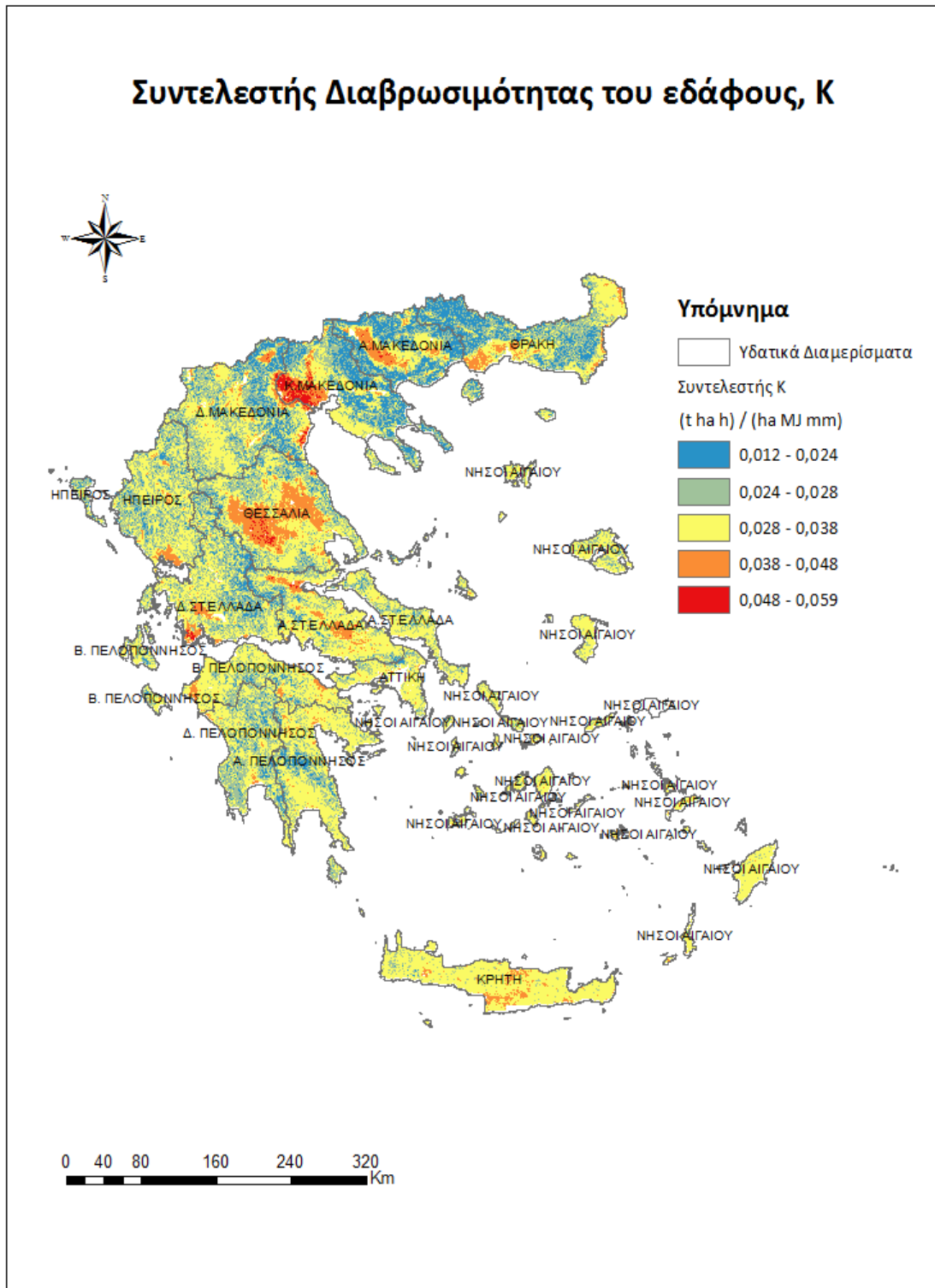
### 5.1 Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K)

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, ο αριθμός των σημείων παρατήρησης για τον προσδιορισμό του συντελεστή K βάση του προγράμματος LUCAS, για την Ελλάδα είναι 491 σημεία. Η μέση τιμή του συντελεστή K για την Ελλάδα υπολογίζεται σε  $0,0298 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση  $0,0057 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Το εύρος των τιμών είναι από  $0,0122$  έως  $0,0587 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Η μικρότερη τιμή του συντελεστή K εντοπίζεται στη Δυτική Μακεδονία ( $0,0122 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ), ενώ η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή εντοπίζεται στη Κεντρική Μακεδονία ( $0,0587 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ). Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διασποράς κυμαίνονται από 0.10 έως 0.28. Ειδικότερα η Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου παρουσιάζουν μια πολύ ομαλή κατανομή του συντελεστή K (συντελεστής διασποράς: 10%), ενώ την μεγαλύτερη διασπορά (22%-28%) τη παρουσιάζουν η Κ. Μακεδονία, η Α. Μακεδονία και η Θεσσαλία.

**Πίνακας 5.1:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
		t ha h ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>					
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,0167	0,0495	0.0327	0.0282	0.0034	0.12
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,0169	0,0473	0.0304	0.0305	0.0042	0.14
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,0140	0,0489	0.0349	0.0298	0.0039	0.13
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0,0155	0,0550	0.0395	0.0288	0.0049	0.17
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0,0139	0,0480	0.0341	0.0288	0.0041	0.14
6	ΑΤΤΙΚΗ	0,0199	0,0458	0.0259	0.0304	0.0035	0.12
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0,0158	0,0527	0.0370	0.0308	0.0050	0.16
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0,0159	0,0567	0.0408	0.0327	0.0072	0.22
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,0122	0,0549	0.0427	0.0287	0.0053	0.19
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,0154	0,0587	0.0433	0.0295	0.0083	0.28
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,0129	0,0525	0,0395	0.0280	0.0072	0.26
12	ΘΡΑΚΗ	0,0124	0,0488	0,0364	0.0276	0.0053	0.19
13	ΚΡΗΤΗ	0,0195	0,0478	0,0283	0.0330	0.0034	0.10
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0,0198	0,0479	0,0281	0.0312	0.0031	0.10

Όπως φαίνεται και από τον χάρτη που ακολουθεί, η μεγαλύτερη διαβρωσιμότητα του εδάφους εμφανίζεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και της Κεντρικής Μακεδονίας και μετέπειτα ακολουθεί η Ανατολική Μακεδονία. Σύμφωνα και με τις μέσες τιμές η Κρήτη και τα νησιά Αιγαίου παρουσιάζουν επίσης μεγάλη διαβρωσιμότητα.

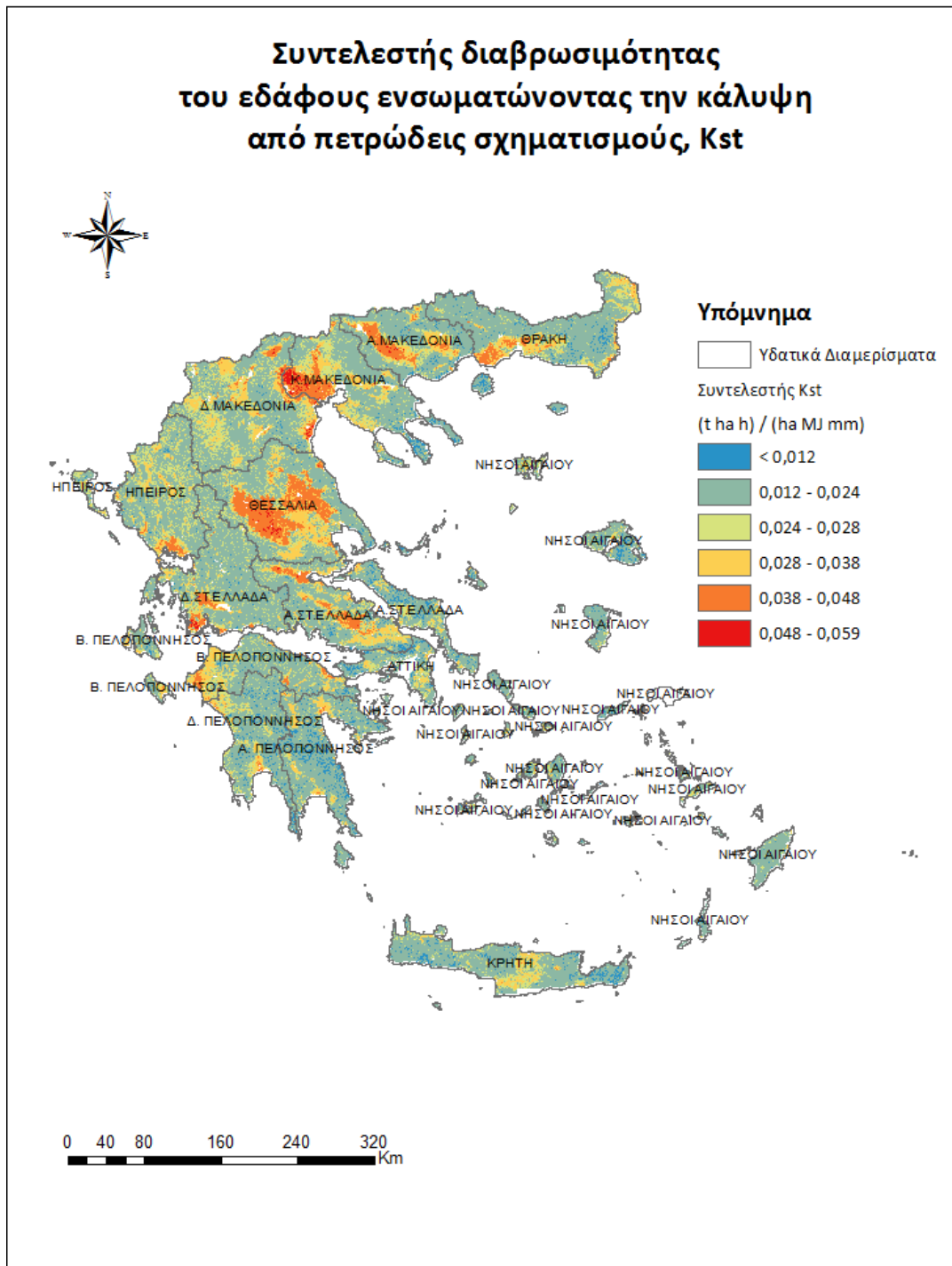


**Εικόνα 5.1:** Χάρτης του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

Η διαβρωσιμότητα του εδάφους λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα της επιφανειακής κάλυψης με πετρώματα αποτελεί τον συντελεστή  $K_{st}$ . Ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης του συντελεστή αυτού για την Ελλάδα απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2. Η μέση τιμή του συντελεστή  $K_{st}$  για την Ελλάδα είναι  $0,0228 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση  $0,0079 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι από  $0,0021$  έως  $0,0587 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (Πίνακας 5.2). Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διασποράς κυμαίνονται από  $0.25$  έως  $0.38$ . Ειδικότερα η Κ. Μακεδονία και η Α. Μακεδονία παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο συντελεστή διασποράς (38%) και η Ήπειρος με τα νησιά του Αιγαίου τον μικρότερο συντελεστή διασποράς (25%). Εν συγκρίσει με τους συντελεστές διασποράς των αντίστοιχων Υδατικών Διαμερισμάτων του συντελεστή  $K$ , παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση που δεν ενσωματώνεται το πετρώδες παρουσιάζεται μεγαλύτερη ομοιογένεια των δεδομένων.

**Πίνακας 5.2:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες  $K_{st}$  ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
		$\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$					
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0031	0.0439	0.0408	0.0199	0.0056	0.28
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0063	0.0469	0.0406	0.0228	0.0068	0.30
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0046	0.0446	0.0400	0.0185	0.0059	0.32
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0053	0.0545	0.0492	0.0219	0.0065	0.30
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0.0051	0.0480	0.0429	0.0232	0.0058	0.25
6	ΑΤΤΙΚΗ	0.0046	0.0385	0.0339	0.0196	0.0059	0.30
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0044	0.0527	0.0484	0.0228	0.0080	0.35
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0.0042	0.0567	0.0525	0.0284	0.0098	0.35
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0049	0.0537	0.0489	0.0243	0.0066	0.27
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0060	0.0587	0.0527	0.0254	0.0098	0.38
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0058	0.0525	0.0467	0.0240	0.0091	0.38
12	ΘΡΑΚΗ	0.0021	0.0481	0.0460	0.0217	0.0071	0.33
13	ΚΡΗΤΗ	0.0038	0.0432	0.0393	0.0197	0.0055	0.28
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0.0043	0.0381	0.0337	0.0188	0.0048	0.25



**Εικόνα 5.2:** Χάρτης του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες  $K_{st}$  ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3 η ενσωμάτωση της προστατευτικής επίδρασης της επιφανειακής κάλυψης πετρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα μια μέση μείωση του συντελεστή  $K$  κατά 25% στην Ελλάδα. Η προστατευτική δράση του πετρώδους είναι ισχυρότερη στη Κρήτη, στα νησιά Αιγαίου, στην Α. Πελοπόννησο, στην Αττική, στην Δ. Πελοπόννησο όπου μειώνει τον συντελεστή  $K$  κατά 30-40%. Εν αντιθέσει με την Θεσσαλία, τη Κ. Μακεδονία, την

Α. Μακεδονία και την Δ. Μακεδονία όπου η παρουσία πετρώδους μειώνει τη διαβρωσιμότητα του εδάφους σε ποσοστό περίπου 14%.

**Πίνακας 5.3:** Σύγκριση της διαβρωσιμότητας του εδάφους με επιφανειακή κάλυψη πετρωμάτων και χωρίς, ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Μέση τιμή συντελεστή K	Μέση τιμή συντελεστή K <sub>st</sub>	Μείωση λόγω της επιφανειακής κάλυψης πετρωμάτων %
		t ha h ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>		
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0282	0.0199	29.24%
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0305	0.0228	25.18%
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0298	0.0185	38.06%
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0288	0.0219	24.05%
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0.0288	0.0232	19.60%
6	ΑΤΤΙΚΗ	0.0304	0.0196	35.64%
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0308	0.0228	26.05%
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0.0327	0.0284	13.17%
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0287	0.0243	15.45%
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0295	0.0254	13.72%
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0280	0.0240	14.14%
12	ΘΡΑΚΗ	0.0276	0.0217	21.36%
13	ΚΡΗΤΗ	0.0330	0.0197	40.25%
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0.0312	0.0188	39.65%

Οι χάρτες διαβρωσιμότητας του εδάφους (Εικόνες 5.1 και 5.2) οριοθετηθούν περιοχές όπου η αντίδραση του εδάφους σε διαβρωτικά επεισόδια βροχοπτώσεων είναι αρκετά υψηλή. Περιοχές όπου η επίδραση του πετρώδους είναι σχετικά χαμηλή (<10%) και η διαβρωσιμότητα του εδάφους εξακολουθεί να είναι υψηλή θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις γεωργικές πρακτικές και την φυτοκάλυψη. Για παράδειγμα, ανάλογα με τη δύναμη και το χρόνο των διαβρωτικών επεισοδίων βροχής, τοπικές/περιφερειακές πολιτικές μπορεί να χαρακτηρίσουν αυτές τις περιοχές ως οικολογικά ευάλωτες και να προτείνουν την εφαρμογή μόνιμων καλλιεργειών ή μόνιμων χορτολιβαδικών εκτάσεων.



## 5.2 Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R)

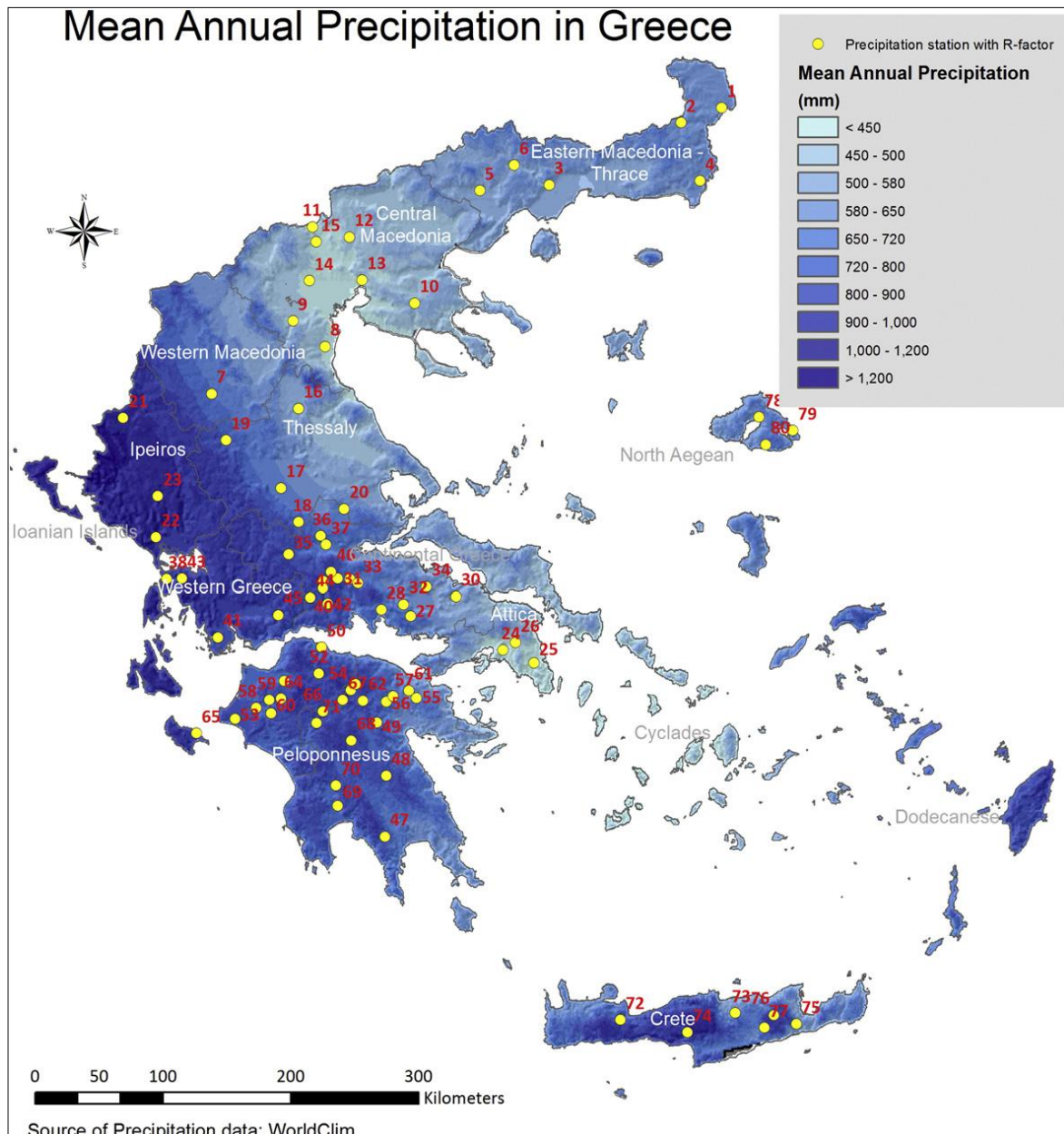
Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R, συλλέγονται από 1.541 βροχομετρικούς σταθμούς σε όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με χρονική ανάλυση από 5 έως 60 min. Προτεραιότητα δίνεται σε σύνολα δεδομένων υψηλής χρονικής ανάλυσης, ανεξάρτητα από την περίοδο που καλύπτεται, επειδή στόχος της συλλογής των δεδομένων αυτών είναι να συλλάβουν τις χωρικές τάσεις της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης. Στην πλειονότητα των χωρών (75%), οι χρονοσειρές περιλαμβάνουν την πρώτη δεκαετία του 21ου αιώνα, εκτός από την Βουλγαρία, την Ελλάδα, την Τσεχική Δημοκρατία, την Πολωνία και τη Σλοβακία. Ωστόσο, οι χρονοσειρές για αυτές τις πέντε χώρες είναι αρκετά μεγάλες ώστε να συλλάβουν τη μέση διαβρωτικότητα της βροχής.

Συγκεκριμένα για την Ελλάδα τα δεδομένα λαμβάνονται από 80 βροχομετρικούς σταθμούς του ερευνητικού προγράμματος Υδροσκόπιο (<http://hydroscope.gr/>) την χρονική περίοδο 1974-1997, έχοντας μια μέση τιμή τα 30 έτη ανά σταθμό. Όσον αφορά την χωρική κατανομή των βροχομετρικών σταθμών με τα δεδομένα ανάλυσης 30 min, η μέση πυκνότητα είναι περίπου 1 σταθμός ανά 40 km x 40 km μέγεθος κελιού κανάβου (Εικόνα 5.4). Όπως φαίνεται στον χάρτη της εικόνας 5.3 υπάρχει ένα αρκετά πυκνό δίκτυο σταθμών στην Πελοπόννησο και στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ υπάρχει έλλειψη σταθμών στη Δυτική Μακεδονία και στα νησιά του Αιγαίου. Οι σταθμοί βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν την τεράστια τοπογραφική ποικιλομορφία της Ελλάδας (Panagos et. al, 2016).

Η μέση ετήσια και μηνιαία διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης του κάθε σταθμού υπολογίζεται βάση μακροχρόνιων χρονοσειρών, κατά προτίμηση περισσότερο από 15 χρόνια. Έτσι, οι 64 βροχομετρικοί σταθμοί (80% του συνόλου) καταγράφουν δεδομένα που καλύπτουν τουλάχιστον 20 χρόνια, αρχίζοντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 μέχρι το έτος 1996. Μεταξύ του υπόλοιπου 20% (μικρότερης διάρκειας χρονοσειρές), προτιμάται να συμπεριληφθούν οι 3 βροχομετρικοί σταθμοί από το νησί της Λέσβου και οι 4 από το νησί της Κρήτης, προκειμένου να μειωθεί η χωρική αβεβαιότητα λόγω της πλήρους έλλειψης στοιχείων στα νησιά του Αιγαίου (Panagos et. al, 2016).

Η χωρική μεταβλητότητα της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης είναι υψηλή στην Ελλάδα, με τιμές που κυμαίνονται από 152 έως 2.728,5 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Η μέση τιμή του συντελεστή R υπολογίζεται σε 825,4 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, με μια υψηλή τυπική απόκλιση 389,2 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Τα Υδατικά Διαμερίσματα με τα υψηλότερα επίπεδα τιμών διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (> 1.000 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) είναι της Ηπείρου, της Δ. Στ. Ελλάδας, της Β. Πελοποννήσου και της Δ. Πελοποννήσου. Ενώ οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στα Υδατικά Διαμερίσματα της Μακεδονίας (<600 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διασποράς, από 0.20 έως 0.33, υποδηλώνουν ότι υπάρχει μια σχετικά ομαλή μεταβλητότητα στις τιμές του συντελεστή R ανά Υδατικό Διαμέρισμα (Πίνακας 5.4).

Τα στατιστικά από το WorldClim αναφέρουν 698 mm την μέση ετήσια βροχόπτωση, 189 mm την τυπική απόκλιση, και 380-1.406 mm το εύρος των ετήσιων τιμών βροχόπτωσης στην Ελλάδα (Εικόνα 5.3). Ο καιρός διαφοροποιείται από το ξηρό κλίμα της Αττικής (Αθήνα ως ευρύτερη περιοχή) και της Ανατολικής Ελλάδας στο υγρό κλίμα της Βόρειας και Δυτικής Ελλάδας.

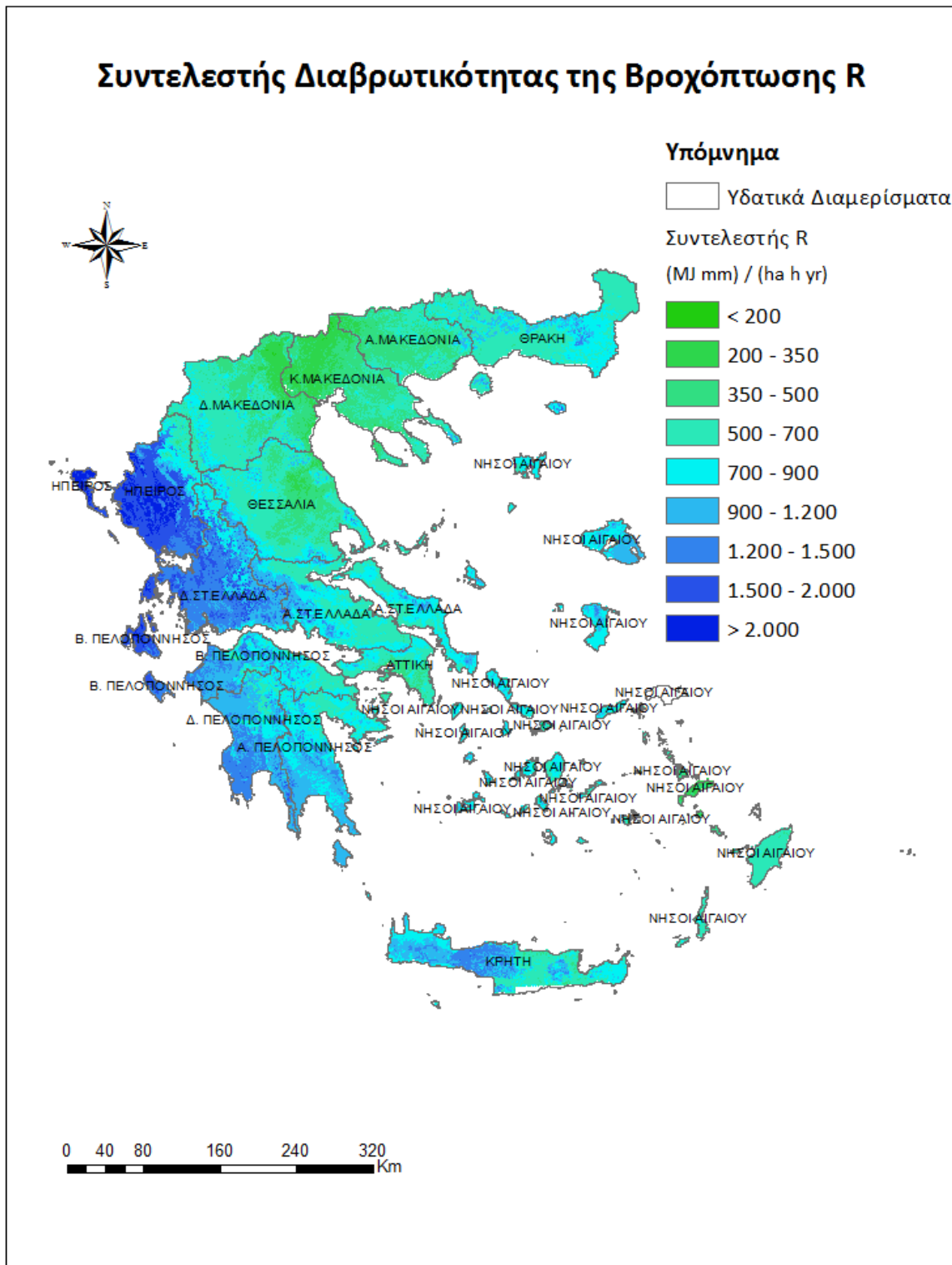


**Εικόνα 5.3:** Η χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και των σταθμών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή R στην Ελλάδα (Panagos et. al, 2016).

Η έντονη διαφοροποίηση στα χιλιοστά βροχής ανά την Ελλάδα οφείλεται στην γεωμορφολογία της, με κύριο χαρακτηριστικό να αποτελεί η οροσειρά της Πίνδου στην ανατολική πλευρά, που περιλαμβάνει ορισμένους από τους μεγαλύτερους και υψηλότερους ορεινούς όγκους της χώρας. Τα υψόμετρα των κορυφών φθάνουν πάνω από τα 2.600-2.700 m. Η παρουσία των ορεινών όγκων δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες ορογραφικής βροχόπτωσης, οι οποίες σε συνδυασμό με την επικρατούσα κύρια διεύθυνση των ανέμων κατά το χειμώνα (από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά) έχουν ως αποτέλεσμα την παρουσία των υψηλότερων ποσών κατακρήμνισης στην χώρα κατά μέσο όρο.

**Πίνακας 5.4:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

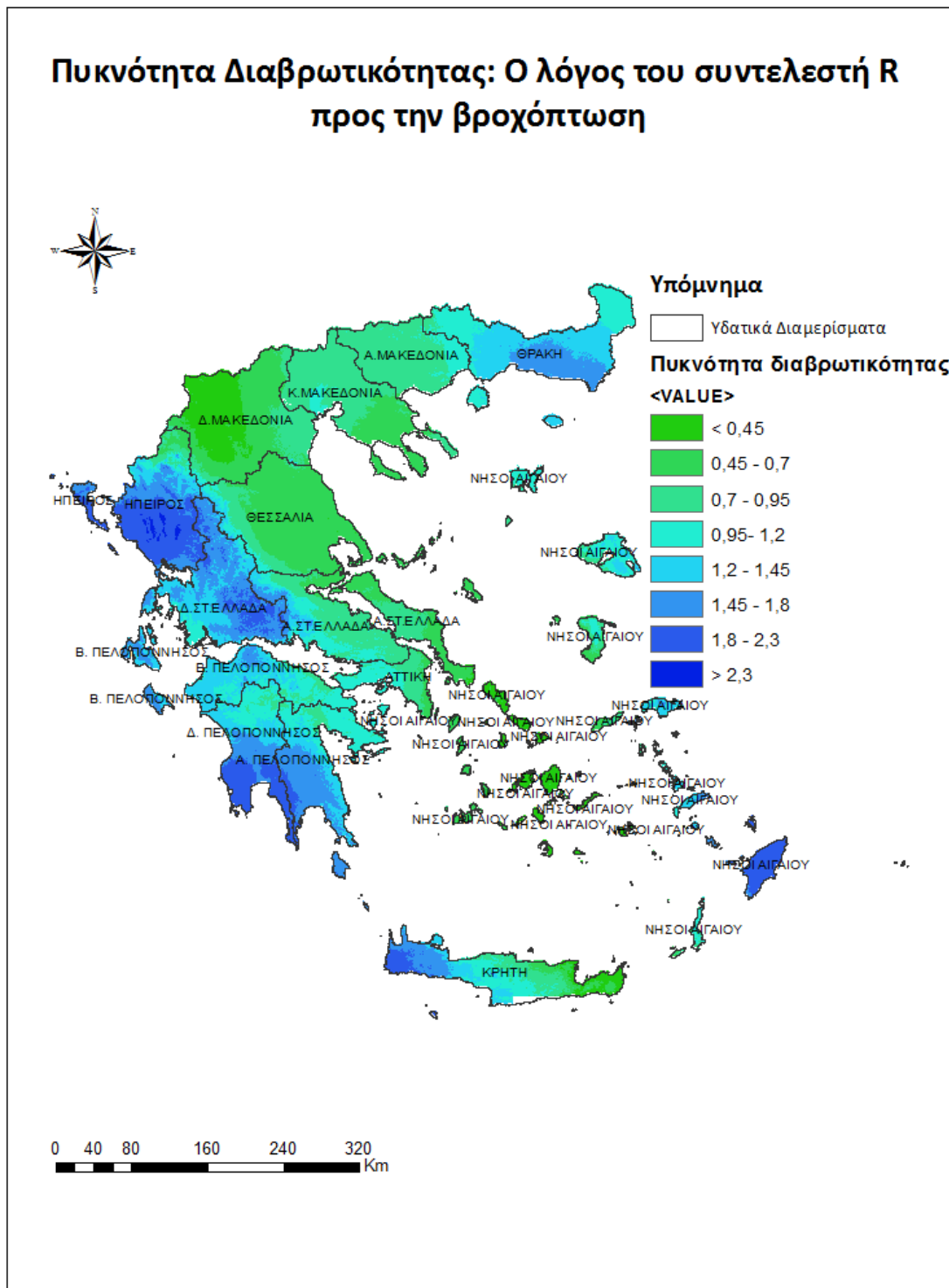
α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	445.4	1638.0	1192.7	1071.4	229.7	0.21
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	427.1	2208.8	1781.6	1045.4	342.4	0.33
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	488.6	1669.3	1180.6	891.0	179.2	0.20
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	541.8	2384.0	1842.2	1260.9	285.2	0.23
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	364.6	2728.5	2363.9	1542.0	508.8	0.33
6	ΑΤΤΙΚΗ	342.7	1297.5	954.8	619.1	126.7	0.20
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	456.1	1737.3	1281.2	774.3	184.5	0.24
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	253.1	1518.6	1265.5	616.0	173.2	0.28
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	152.0	1315.9	1163.9	553.3	150.9	0.27
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	167.0	1277.4	1110.4	435.0	111.9	0.26
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	176.1	1113.1	937.1	512.5	116.0	0.23
12	ΘΡΑΚΗ	417.0	1542.9	1125.9	706.1	154.7	0.22
13	ΚΡΗΤΗ	419.9	1603.4	1183.5	895.1	255.3	0.29
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	228.9	1474.9	1246.1	745.3	165.5	0.22



**Εικόνα 5.4:** Χάρτης διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

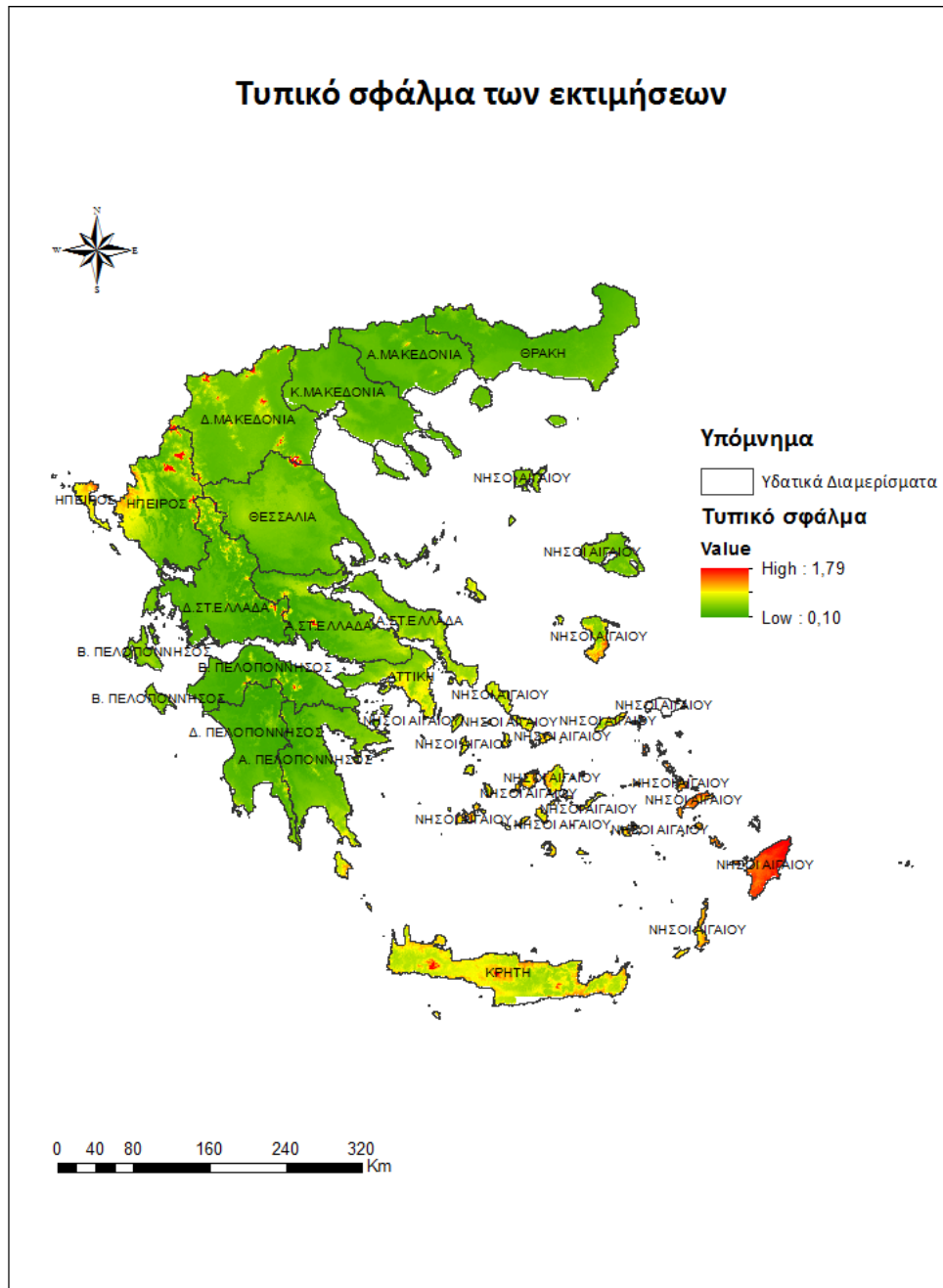
Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από ένα υψηλό ποσοστό (26,5%) γυμνού εδάφους. Σε περιφερειακό επίπεδο, η Ήπειρος έχει ακόμη ένα ποσοστό του 57% του γυμνού εδάφους στις γεωργικές εκτάσεις (Eurostat, 2014a). Ο συνδυασμός της υψηλής πυκνότητας διαβρωτικότητας στην Ήπειρο και στη Δυτική Ελλάδα (εικόνα 5.5) με το γυμνό έδαφος

μπορεί να προκαλέσει σοβαρή εδαφική απώλεια και να έχει αρνητικές επιπτώσεις στους εδαφικούς πόρους.



**Εικόνα 5.5:** Χάρτης της πυκνότητας διαβρωτικότητας ED ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

Για την δημιουργία του χάρτη διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R, χρησιμοποιείται το μοντέλο χωρικής παρεμβολής του Gauss το οποίο δείχνει μια πολύ καλή απόδοση με  $R^2=0,62$  για τη διαγώνια επαλήθευση και  $R^2=0,73$  για την ταύτιση του συνόλου των δεδομένων. Σύμφωνα με τον χάρτη 5.6 το χρώμα που κυριαρχεί στην έκταση της Ελλάδας είναι το πράσινο και αντιστοιχεί σε τιμές τυπικού σφάλματος μεσαίες προς χαμηλές. Υψηλές τιμές τυπικού σφάλματος που αντιστοιχούν στο φάσμα του κόκκινου χρώματος εντοπίζονται για παράδειγμα στο νησί της Ρόδου και σε διάσπαρτα τμήματα της Ηπείρου, της Δ. Μακεδονίας, της Δ. Στ. Ελλάδας και της Κρήτης.



**Εικόνα 5.6:** Η αβεβαιότητα της εκτίμησης του συντελεστή R που υπολογίζεται με το μοντέλο χωρικής παρεμβολής GPR (Gaussian Process Regression model).

### 5.3 Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS)

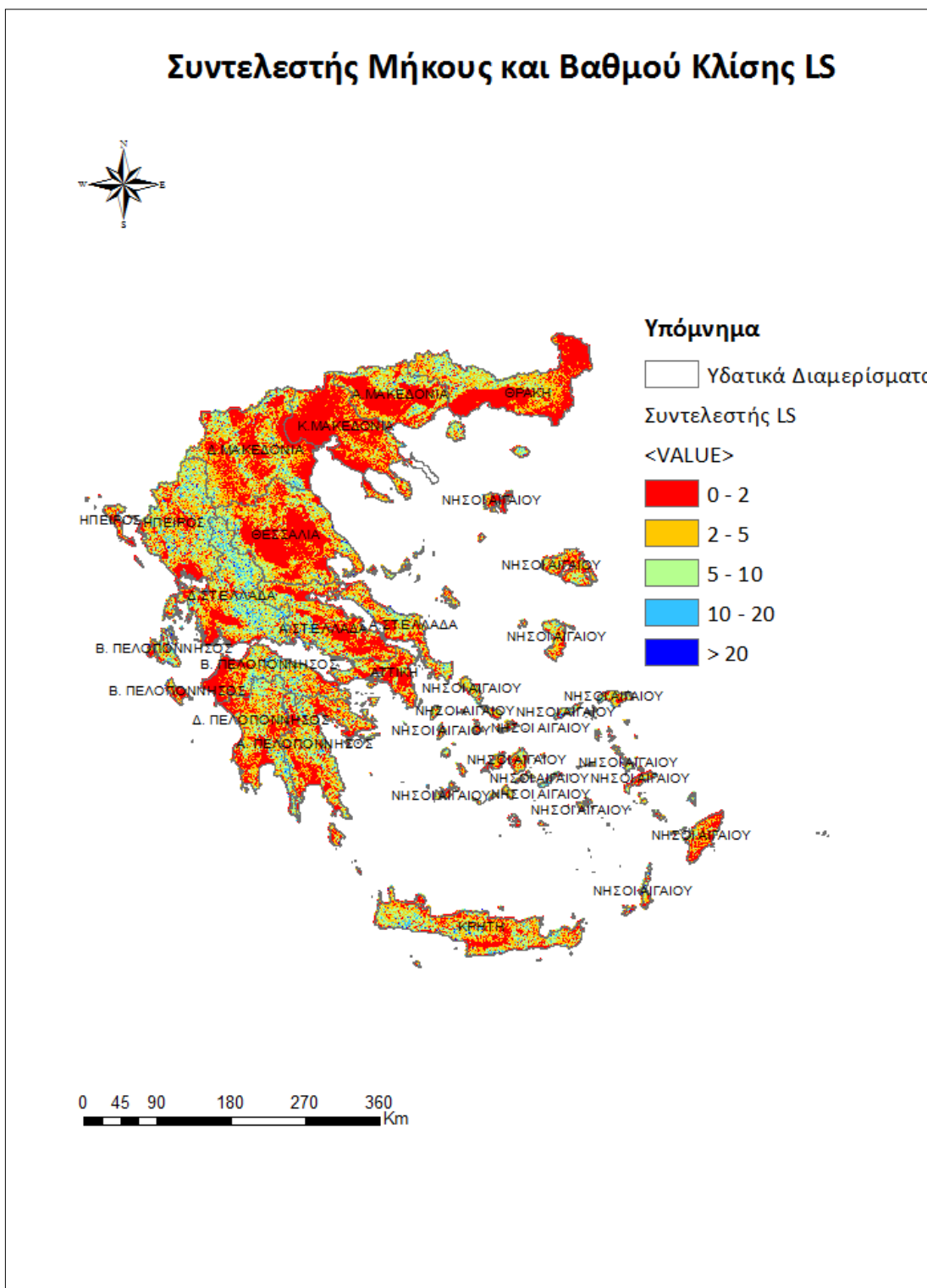
Η μέση τιμή του συντελεστή LS για την Ελλάδα είναι 3,62 με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του 4,06. Η διακύμανση των τιμών είναι πολύ μεγάλη, από 0,03 έως 96,27. Από τον πίνακα 5.5, την χαμηλότερη τιμή του συντελεστή LS (1,74) εμφανίζει η Κ. Μακεδονία κάτι που επαληθεύεται και από τον αντίστοιχο χάρτη. Οι μεγαλύτερες μέσες τιμές πάνω από 4,5 περίπου παρατηρούνται στη Δ. Στ. Ελλάδα, στην Ήπειρο, στη Κρήτη και ακολουθούν τα Υδατικά Διαμερίσματα της Πελοποννήσου με τιμές κοντά στο 4.

**Πίνακας 5.5:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,03	91,31	91,28	4,16	3,88	0,93
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,03	94,32	94,29	4,07	4,30	1,06
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0,03	91,59	91,56	4,05	3,75	0,93
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0,03	91,64	91,61	5,94	5,21	0,88
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0,03	91,43	91,40	4,98	4,54	0,91
6	ΑΤΤΙΚΗ	0,03	89,74	89,71	2,93	3,06	1,05
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0,03	96,27	96,24	4,03	4,06	1,01
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0,03	91,26	91,23	3,01	3,71	1,23
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,03	91,55	91,52	3,54	3,93	1,11
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,03	89,98	89,95	1,74	2,22	1,27
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0,03	91,11	91,08	3,19	3,94	1,24
12	ΘΡΑΚΗ	0,03	95,59	95,56	3,07	3,50	1,14
13	ΚΡΗΤΗ	0,03	91,76	91,73	4,43	4,14	0,94
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0,03	91,49	91,46	3,91	3,42	0,87

Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διασποράς είναι υψηλές και κυμαίνονται από 0,87 έως 1,27, υποδηλώνοντας έντονη ετερογένεια του συντελεστή LS στα Υδατικά Διαμερίσματα. Η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται στη Κ. Μακεδονία, στη Α. Μακεδονία, στη Θεσσαλία με τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Ενώ μικρότερη διακύμανση εμφανίζεται στα νησιά του Αιγαίου, στη Δ. Στ. Ελλάδα, στη Κρήτη, στη Δ. και Α. Πελοπόννησο (Πίνακας 5.5).

Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, στο μεγαλύτερο τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Δ. Στ. Ελλάδας παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή LS (> 5) και ακολουθεί η Ήπειρος. Ενώ η μεγαλύτερη έκταση της Κεντρικής Μακεδονίας και Θεσσαλίας παρουσιάζει χρώμα κόκκινο, το οποίο ανήκει στην μικρότερη κλάση τιμών του συντελεστή LS από 0 έως 2, αναμενόμενο καθώς μεγάλο τμήμα τους χαρακτηρίζεται από ομαλή γεωμορφολογία.



**Εικόνα 5.7:** Χάρτης υψηλής ανάλυσης του συντελεστή μήκους και βαθμού κλίσης LS στην Ελλάδα.



#### 5.4 Ο συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (C)

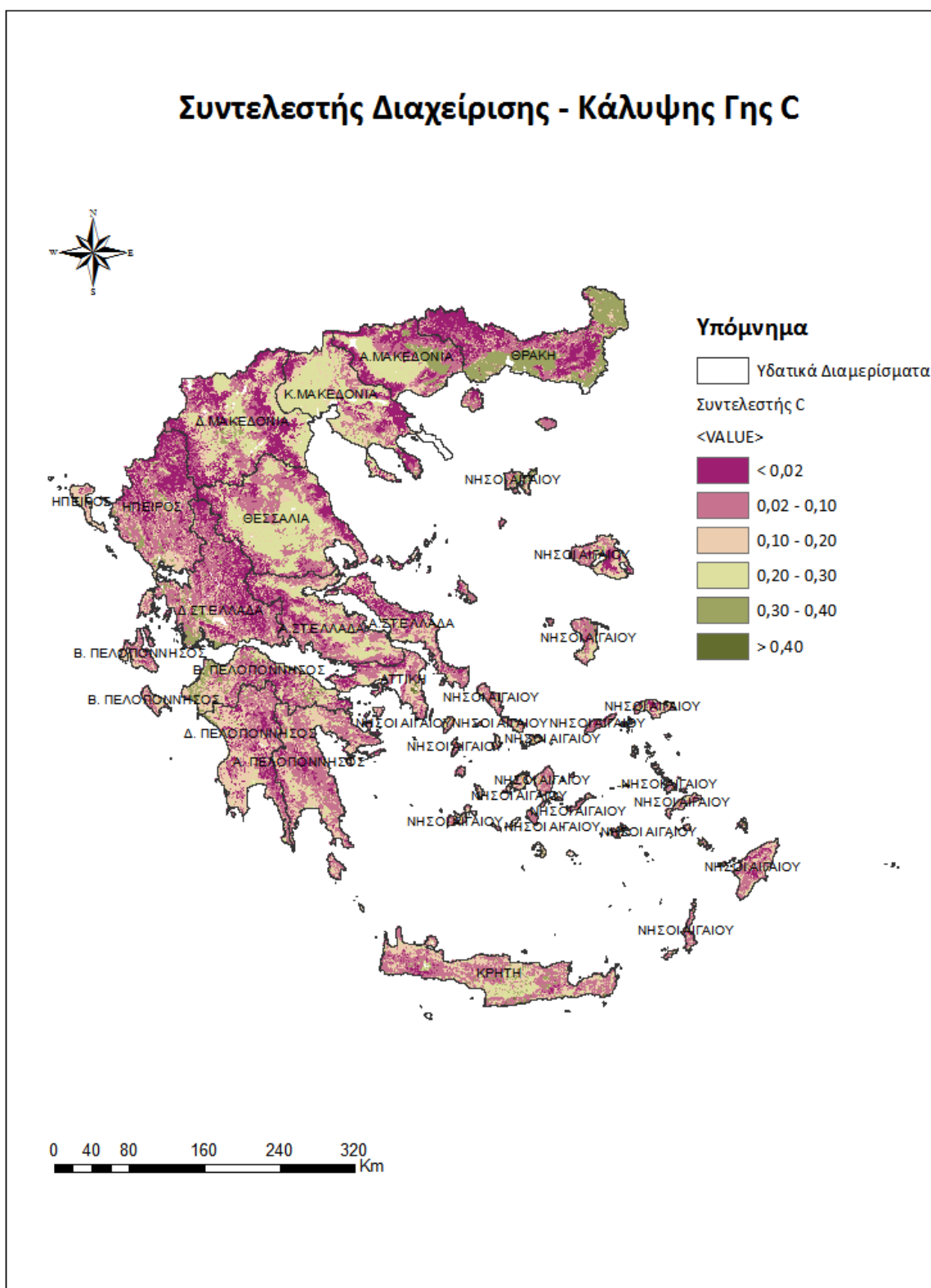
Η μέση τιμή του συντελεστή C για την Ελλάδα είναι 0,110 με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του 0,104. Η διακύμανση των τιμών είναι από 0,0001 έως 0,5198. Η μεγαλύτερη μέση τιμή παρατηρείται στη Κ. Μακεδονία (0,1580) και στη Θεσσαλία (0,1489), ενώ η μικρότερη τιμή στη Δ. Ελλάδα και στην Αττική (<0,1). Από τον χάρτη της εικόνας 5.8 παρατηρείται στην Θράκη η διάκριση μεταξύ υψηλών και χαμηλών τιμών κλάσης του συντελεστή, που αφορά καλλιεργήσιμες εκτάσεις και δασικές περιοχές αντίστοιχα. Οι τιμές του συντελεστή διασποράς κυμαίνονται από 0,67 έως 1,26, που θεωρούνται υψηλές και υποδηλώνουν την έντονη ετερογένεια των τιμών του συντελεστή ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

**Πίνακας 5.6:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή διαχείρισης - κάλυψης γης C ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0005	0.4632	0.4627	0.0924	0.0766	0.83
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0002	0.4169	0.4167	0.1176	0.1005	0.85
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.0002	0.4760	0.4758	0.0900	0.0671	0.75
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0001	0.3924	0.3922	0.0697	0.0880	1.26
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0.0002	0.4500	0.4498	0.0692	0.0835	1.21
6	ΑΤΤΙΚΗ	0.0002	0.4430	0.4429	0.0945	0.0856	0.91
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.0002	0.4500	0.4498	0.1062	0.1005	0.95
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0.0005	0.4757	0.4752	0.1489	0.1188	0.80
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0002	0.4393	0.4390	0.1005	0.0988	0.98
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0003	0.4081	0.4078	0.1580	0.1059	0.67
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.0005	0.4411	0.4406	0.1300	0.1215	0.94
12	ΘΡΑΚΗ	0.0003	0.4430	0.4427	0.1278	0.1352	1.06
13	ΚΡΗΤΗ	0.0010	0.4500	0.4490	0.1273	0.0876	0.69
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0.0002	0.5198	0.5195	0.1060	0.0847	0.80

Για παράδειγμα σύμφωνα με τη βάση δεδομένων CORINE στο μεγαλύτερο τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας η κύρια χρήση γης αφορά καλλιεργήσιμες εκτάσεις (κωδικοί 211,212) κάτι το οποίο αιτιολογεί την υψηλή τιμή του συντελεστή C στην κατηγορία κλάσης από 0,20 έως 0,30. Ο χάρτης του συντελεστή C μπορεί να συνδυαστεί με τον χάρτη των υποστηρικτικών πρακτικών P.

## Συντελεστής Διαχείρισης - Κάλυψης Γης C



**Εικόνα 5.8:** Χάρτης του συντελεστή διαχείρισης - κάλυψης γης C ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

## 5.5 Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P)

Η μέση τιμή του συντελεστή P για την Ελλάδα είναι 0,950 με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του 0,124. Η διακύμανση των τιμών είναι από 0,181 έως 1. Το μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από την έλλειψη υποστηρικτικών πρακτικών (P=1) ή παρουσιάζει υψηλές τιμές του συντελεστή που υποδηλώνει μικρή εφαρμογή μέτρων υποστήριξης (Εικόνα 5.9). Η μεγαλύτερη μέση τιμή παρατηρείται στη Αττική (0,9942) και στη Δ. Στ. Ελλάδα (0,9925) ενώ η μικρότερη τιμή στα νησιά του Αιγαίου (0,7966) και στη Δ. Πελοπόννησο (0,8874). Ο συντελεστής διασποράς παρουσιάζει μικρές τιμές από 0,04 έως 0,29 την μεγαλύτερη τιμή στα νησιά του Αιγαίου, κάτι που επαληθεύεται και από τον αντίστοιχο χάρτη 5.9.

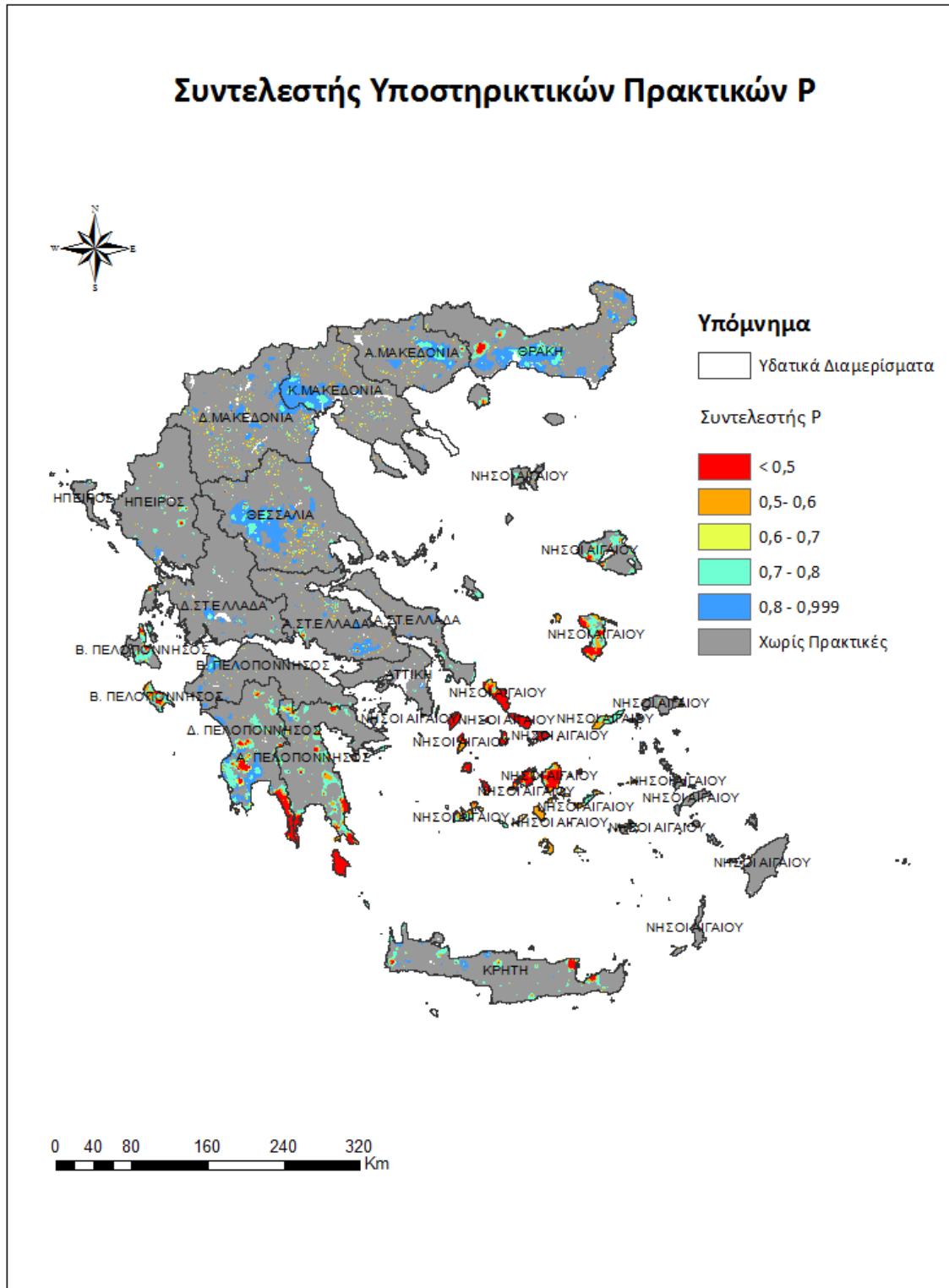
**Πίνακας 5.7:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή υποστηρικτικών πρακτικών P ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

α/α	Υδατικά Διαμερίσματα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.1815	1	0.8185	0.8874	0.1819	0.20
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.3168	1	0.6832	0.9568	0.1144	0.12
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.2336	1	0.7664	0.8965	0.1812	0.20
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.3545	1	0.6455	0.9925	0.0455	0.05
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0.3545	1	0.6455	0.9881	0.0606	0.06
6	ΑΤΤΙΚΗ	0.4242	1	0.5758	0.9942	0.0400	0.04
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.3463	1	0.6537	0.9841	0.0647	0.07
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0.3463	1	0.6537	0.9615	0.0858	0.09
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.3000	1	0.7000	0.9739	0.0789	0.08
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.3463	1	0.6537	0.9648	0.0847	0.09
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.3620	1	0.6380	0.9683	0.0816	0.08
12	ΘΡΑΚΗ	0.2685	1	0.7315	0.9500	0.1029	0.11
13	ΚΡΗΤΗ	0.2848	1	0.7152	0.9653	0.1061	0.11
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0.1901	1	0.8099	0.7966	0.2286	0.29

Οι υποστηρικτικές πρακτικές είναι πολύ σημαντικές σε περιοχές που εμφανίζουν μεγάλες κλίσεις και είναι επιρρεπείς στην διάβρωση ώστε να βοηθήσουν στην μείωση της εδαφικής απώλειας. Έτσι λοιπόν είναι σημαντική στις περιοχές αυτές η επένδυση στη κατασκευή πέτρινων τοίχων σε μόνιμες καλλιέργειες σε σχέση με τις πεδινές περιοχές. Για παράδειγμα στο νησί της Κρήτης που κυριαρχούν οι ελιές ως μόνιμη καλλιέργεια θα περίμενε κανείς να εμφανίζει χαμηλή τιμή ο συντελεστής P, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει όπως φαίνεται και από τον χάρτη 5.7. Τα νησιά του Αιγαίου εμφανίζουν κυρίως χαμηλές τιμές του συντελεστή (< 0,5).

Η πρακτική του οργώματος αποτελεί ένας παράγοντας κινδύνου διάβρωσης του εδάφους με υψηλή χωροχρονική μεταβλητότητα. Στην Ελλάδα μόνο στο 2% της γεωργικής γης δεν εφαρμόζεται όργωμα, ενώ το συμβατικό όργωμα εφαρμόζεται στο 20% περίπου των

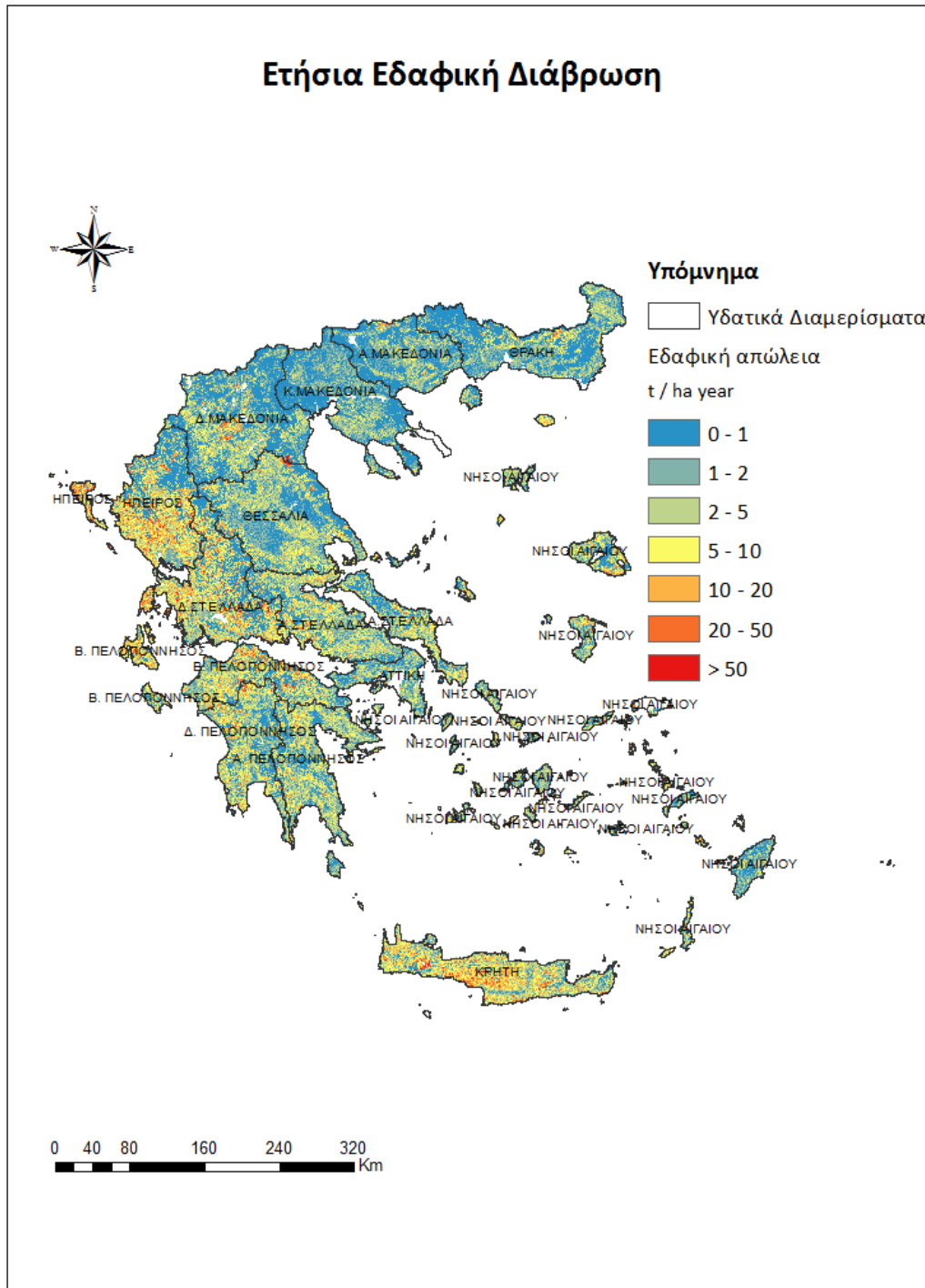
καλλιεργειών (Eurostat, 2014b). Και οι δύο τιμές είναι χαμηλότερες από το μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, το συμβατικό όργανο έχει αρκετό χαμηλό ποσοστό συμμετοχής σε περιοχές με έντονη διάβρωση όπως η Πελοπόννησος (44%), η Κρήτη (55%) και η Δυτική Ελλάδα (66%).



**Εικόνα 5.9:** Χάρτης του συντελεστή υποστηρικτικών πρακτικών κατά της διάβρωσης P ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

## 5.6 Εκτίμηση της εδαφικής απώλειας στην Ελλάδα

Η εκτίμηση της εδαφικής απώλειας όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4.6, πραγματοποιείται με το τροποποιημένο μοντέλο RUSLE (RUSLE2015) χρησιμοποιώντας ως εισαγόμενες παραμέτρους τους συντελεστές που αναλύονται στα προηγούμενα κεφάλαια. Ο χάρτης της εδαφικής διάβρωσης για την Ελλάδα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.8.



**Εικόνα 5.8:** Χάρτης της εδαφικής απώλειας ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα (έτος αναφοράς: 2010)

Η μέση τιμή της ετήσιας εδαφικής απώλειας για την Ελλάδα είναι  $3,61 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του  $7,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι μεγάλη, από 0 έως  $325 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  λόγω της διαφορετικής τοπογραφίας, κλιματολογίας, χρήσης γης και διαχείρισης. Η μεγαλύτερη μέση ετήσια εδαφική απώλεια εμφανίζεται στα Υδατικά Διαμερίσματα της Ηπείρου, της Δ. Στ. Ελλάδας και της Κρήτης ( $> 7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ). Η μικρότερη μέση ετήσια εδαφική απώλεια εμφανίζεται στη Κ. Μακεδονία, στην Ανατολική Μακεδονία και στη Θράκη ( $< 2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ). Ο συντελεστής διασποράς λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδος, από 1,17 έως 2,03, με αποτέλεσμα οι τιμές της εδαφικής απώλειας ανά Υδατικό Διαμέρισμα, να παρουσιάζουν ανομοιογένεια.

**Πίνακας 5.8:** Στατιστικά χαρακτηριστικά του βαθμού ετήσιας εδαφικής απώλειας ανά Υδατικό Διαμέρισμα στην Ελλάδα.

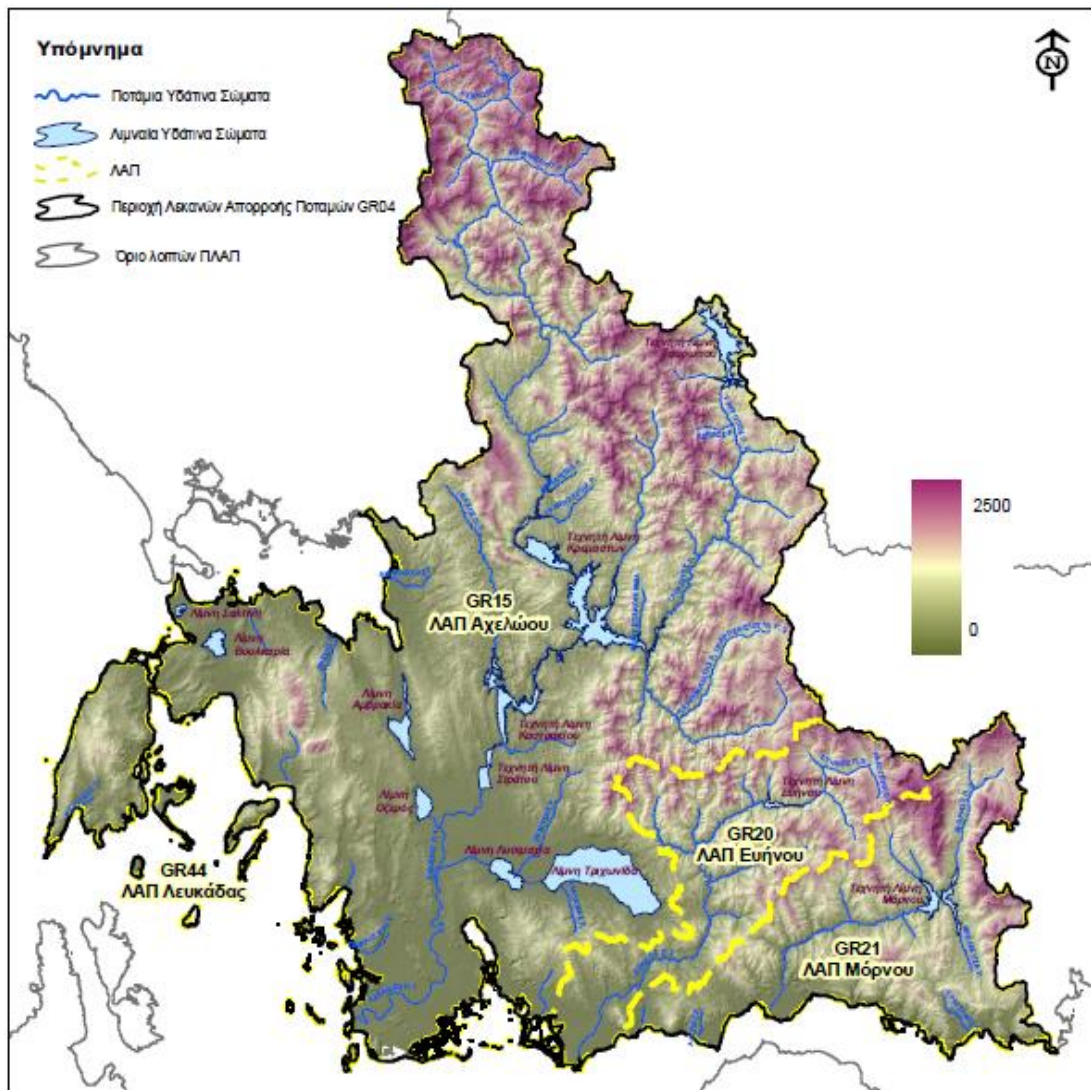
α/α	Υδατικό Διαμέρισμα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διασποράς
		$\text{t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$					
1	Δ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.00029	294.38	294.38	4.85	6.81	1.40
2	Β. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.00032	325.00	325.00	6.20	8.83	1.42
3	Α. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	0.00009	238.40	238.40	3.67	4.85	1.32
4	Δ.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.00009	325.00	325.00	7.13	12.12	1.70
5	ΗΠΕΙΡΟΣ	0.00023	325.00	325.00	7.81	12.35	1.58
6	ΑΤΤΙΚΗ	0.00005	77.71	77.71	2.35	2.79	1.19
7	Α.ΣΤ.ΕΛΛΑΔΑ	0.00007	325.00	325.00	4.01	5.93	1.48
8	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	0.00012	325.00	325.00	3.02	5.20	1.72
9	Δ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.00018	325.00	325.00	2.52	5.13	2.03
10	Κ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.00008	56.82	56.82	1.36	1.59	1.17
11	Α.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	0.00035	156.07	156.07	1.76	3.00	1.71
12	ΘΡΑΚΗ	0.00008	215.49	215.49	1.95	3.39	1.74
13	ΚΡΗΤΗ	0.00069	325.00	325.00	7.81	10.61	1.36
14	ΝΗΣΟΙ ΑΙΓΑΙΟΥ	0.00008	317.40	317.40	3.58	5.22	1.46

Ο συνδυασμός της υψηλής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-factor) με τις σχετικά απότομες κλίσεις (LS-factor) οδηγούν σε αυξημένες τιμές της εδαφικής απώλειας. Όπως αναφέρεται τα Υδατικά Διαμερίσματα της Ηπείρου, της Δ. Στ. Ελλάδας, της Κρήτης και της Β. Πελοποννήσου εμφανίζουν υψηλές τιμές του συντελεστή R ( $R > 900 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) και παράλληλα με τις υψηλές τιμές του συντελεστή LS ( $LS > 10$ ) αποτελούν περιοχές που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση. Παράλληλα ο συνδυασμός του χάρτη συντελεστή υποστηρικτικών πρακτικών P (Εικόνα 5.8) με αυτόν του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R (Εικόνα 5.4), αναδεικνύει την έλλειψη υποστηρικτικών μέτρων στις προαναφερόμενες περιοχές.

## 6. Εκτίμηση της στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής στην Ελλάδα

### 6.1 Υδρολογική λεκάνη του π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Το υδατικό διαμέρισμα 04, της Δ. Στ. Ελλάδας, περιλαμβάνει τρεις κύριες υδρολογικές λεκάνες του Αχελώου, του Ευήνου και του Μόρνου. Εκτός από τις τρεις κύριες λεκάνες, σημαντικό τμήμα του διαμερίσματος καταλαμβάνουν και οι λεκάνες των παραποτάμων του Αχελώου (Ταυρωπού, Τρικεριώτη, Αγραφιώτη και Ίναχου και άλλα μικρότερα υδατορεύματα πχ Ξηροπόταμος, Αράπης κλπ.) καθώς και η λεκάνη της Λευκάδας. Επισημαίνεται ωστόσο ότι η υπολεκάνη του π.Ταυρωπού (Μέγδοβα), ανάντη του φράγματος Πλαστήρα, έκτασης 161 km<sup>2</sup>, αν και υδρολογικά ανήκει σε αυτή του Αχελώου, από διαχειριστική σκοπιά εντάσσεται σε αυτή του Πηνειού (δηλαδή στο Υδατικό Διαμέρισμα 08), καθώς το σύνολο, πρακτικά, των υδατικών πόρων της εκτρέπονται προς την πλευρά της Θεσσαλίας.



Εικόνα 6.1: Μορφολογικός χάρτης ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.

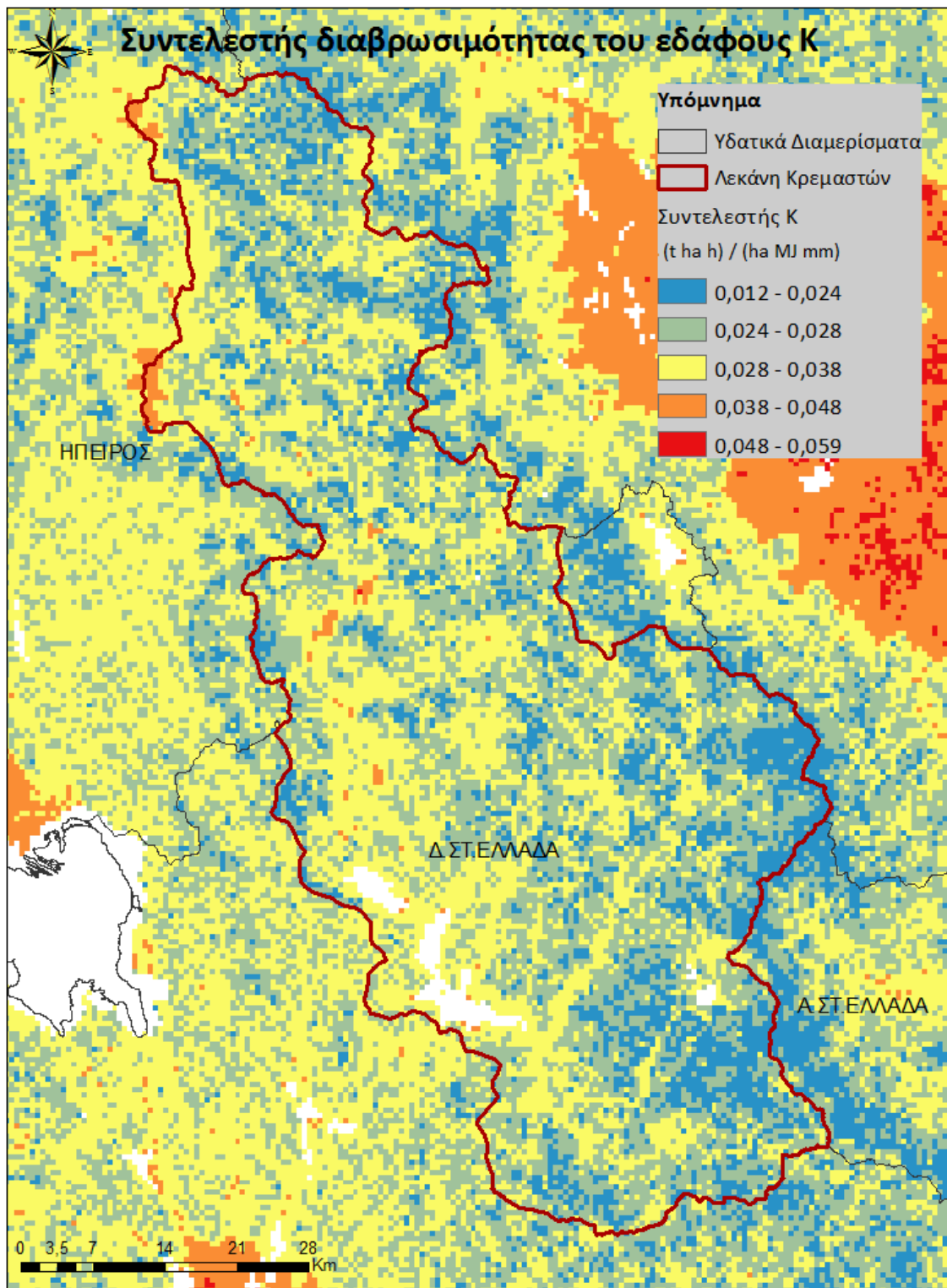
Αναλυτικότερα ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών είναι αυτός που συγκεντρώνει τις απορροές του ποταμού Αχελώου και των παραποτάμων του Ταυρωπού, Αγραφιώτη και Τρικεριώτη. Ο ταμιευτήρας στη στάθμη του υπερχειλιστή καταλαμβάνει έκταση 80,6 km<sup>2</sup> ενώ ο συνολικός αποθηκευτικός όγκος είναι ίσος με 4.495 hm<sup>3</sup>. Η λεκάνη απορροής έχει επιφάνεια 3.292 km<sup>2</sup> ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 1.433 mm. Η μέση ετήσια εισροή στον ταμιευτήρα είναι ίση με 107,8 m<sup>3</sup>/s για τα υδρολογικά έτη από 1966-67 έως 2000-01. Τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής κυμαίνονται από +284 m έως +2.433 m. Το γεωλογικό υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται κατά κύριο λόγο από το φλύσχη της ζώνης του Γαβρόβου και της Πίνδου και τους ελαφρά δολομιτωμένους ασβεστόλιθους της ζώνης του Γαβρόβου και τους ασβεστόλιθους με ενδιαστρώσεις κερατολίθων, αργλικών σχιστολίθων και φλύσχη της ζώνης Πίνδου. Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζεται η μορφή της λεκάνης απορροής του π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστώ.

Από κάθε έναν χάρτη των συντελεστών της εξίσωσης RUSLE και του αποτελέσματος της πολλαπλασιαστικής πράξης αυτών που είναι η εδαφική απώλεια, με τη χρήση της επιλογής Zonal του εργαλείου Spatial Analyst Tool στο arcGIS, προκύπτουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του πίνακα 6.1.

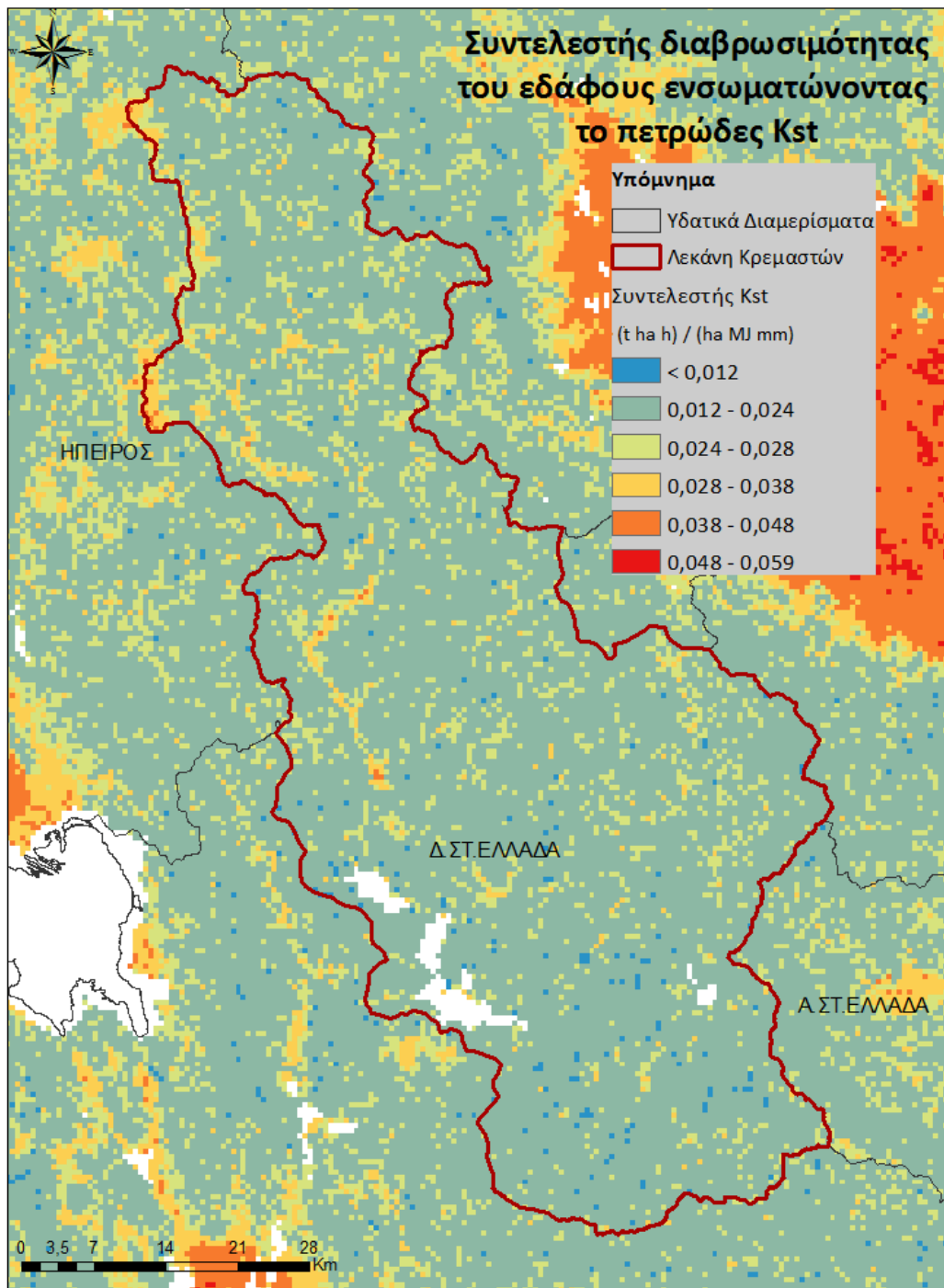
**Πίνακας 6.1:** Στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών της εξίσωσης RUSLE και της εδαφικής απώλειας για τον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

	K	K <sub>st</sub>	R (MJ mm / ha h yr)	LS	C	P	E (t / ha / yr)
	(t ha h / ha MJ mm)						
<b>Ελάχιστη τιμή</b>	0,0155	0,0076	541,8	0,03	0,0001	0,5772	0
<b>Μέγιστη τιμή</b>	0,0488	0,0422	2.169,1	91,64	0,3923	1	325
<b>Εύρος</b>	0,0332	0,0346	1.627,3	91,61	0,3922	0,4228	325
<b>Μέση τιμή</b>	0,0272	0,0203	1.113,5	7,90	0,0382	0,9991	6,54
<b>Τυπική απόκλιση</b>	0,0036	0,0039	310,6	5,50	0,0585	0,0170	12,66



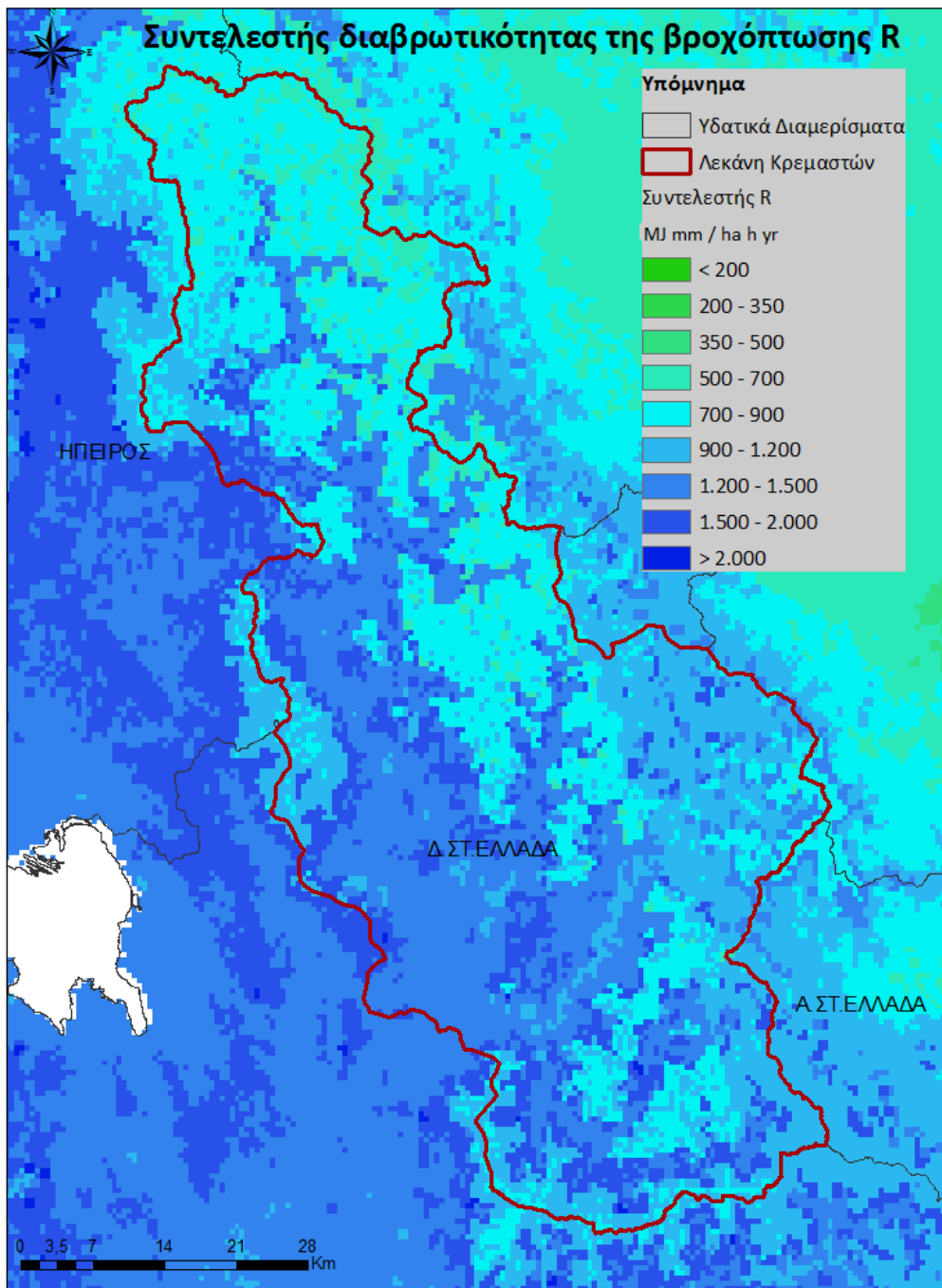


**Εικόνα 6.2:** Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.



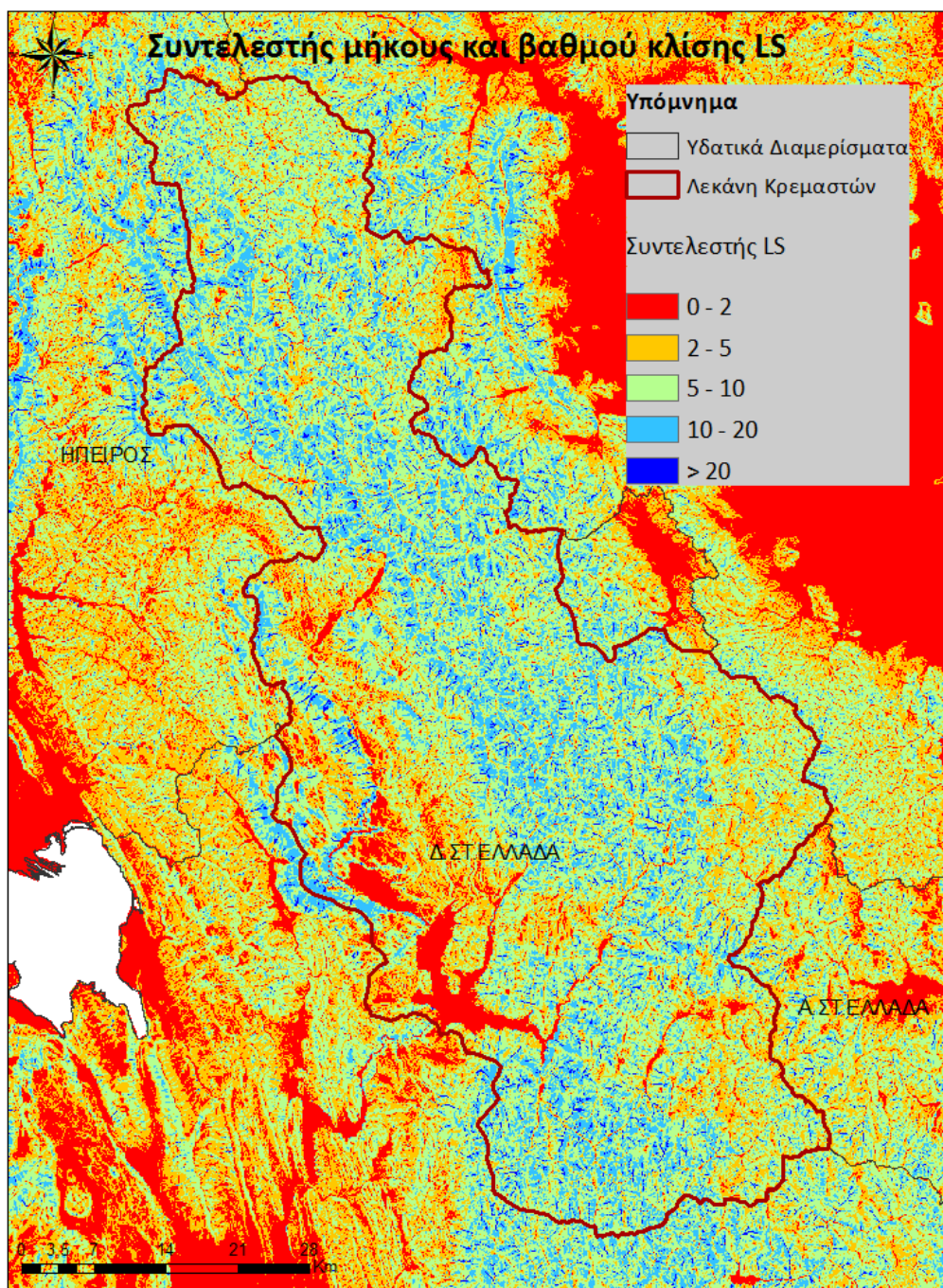
**Εικόνα 6.3:** Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες  $K_{st}$  στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

Σύμφωνα με τον χάρτη 6.3 η κυρίαρχη κατηγορία τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες  $K_{st}$  είναι από 0,012 έως 0,024, εν αντιθέσει με την κατηγορία τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής διαβρωσιμότητας  $K$  του εδάφους από 0,028 έως 0,038. Από τη σύγκριση των χαρτών αυτών, η ενσωμάτωση της προστατευτικής επίδρασης του πετρώδους έχει ως αποτέλεσμα μια μέση μείωση του συντελεστή  $K$  κατά 25%.



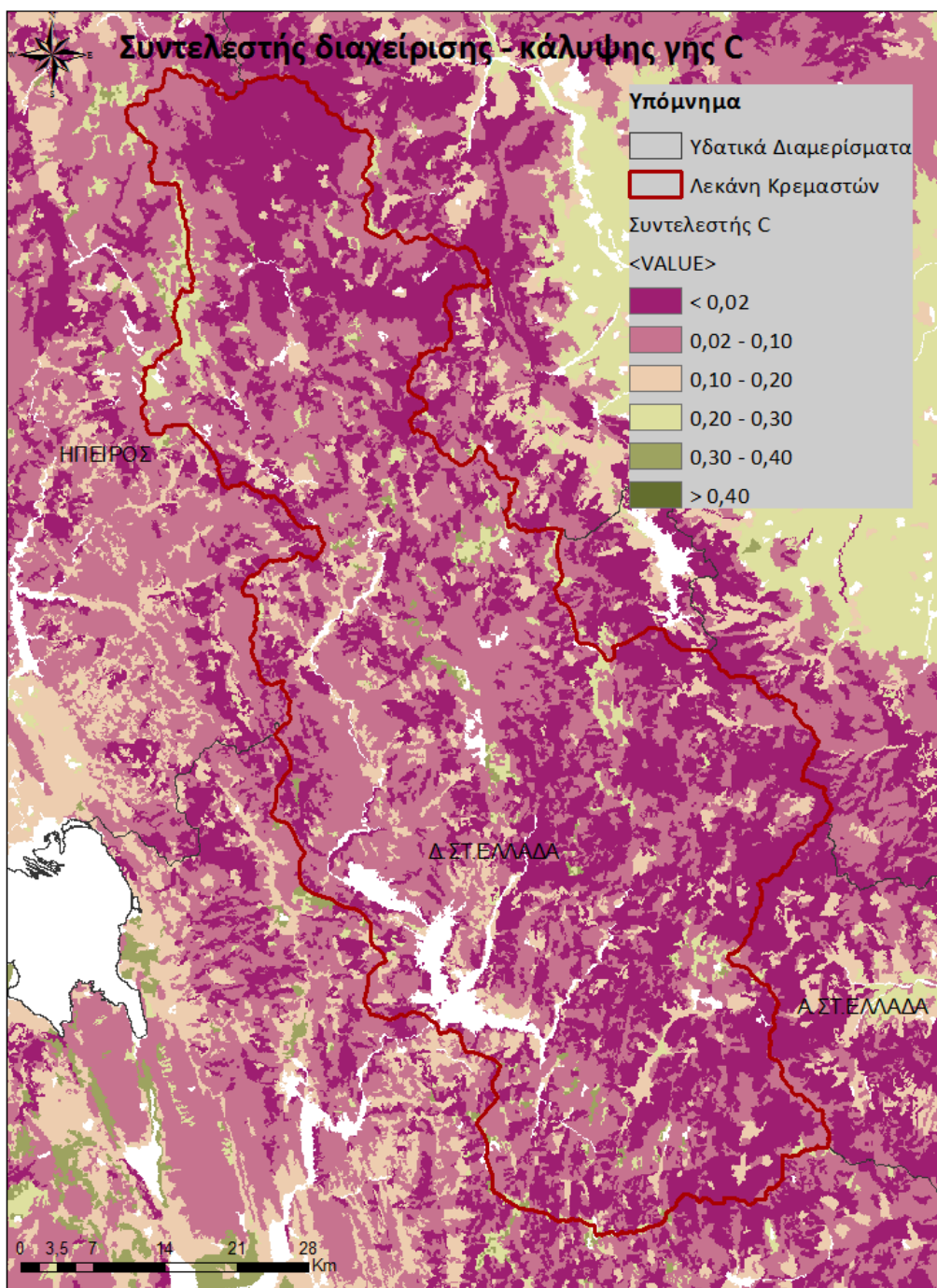
**Εικόνα 6.4:** Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

Η μέση τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής R είναι  $1.113,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , με ελάχιστη τιμή τα  $541,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  κάτι το οποίο επαληθεύεται και από τον αντίστοιχο χάρτη της εικόνας 6.4. Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή αυτού δεν ευρίσκονται εντός της λεκάνης απορροής αλλά λαμβάνονται δεδομένα από τις κοντινότερες περιοχές.



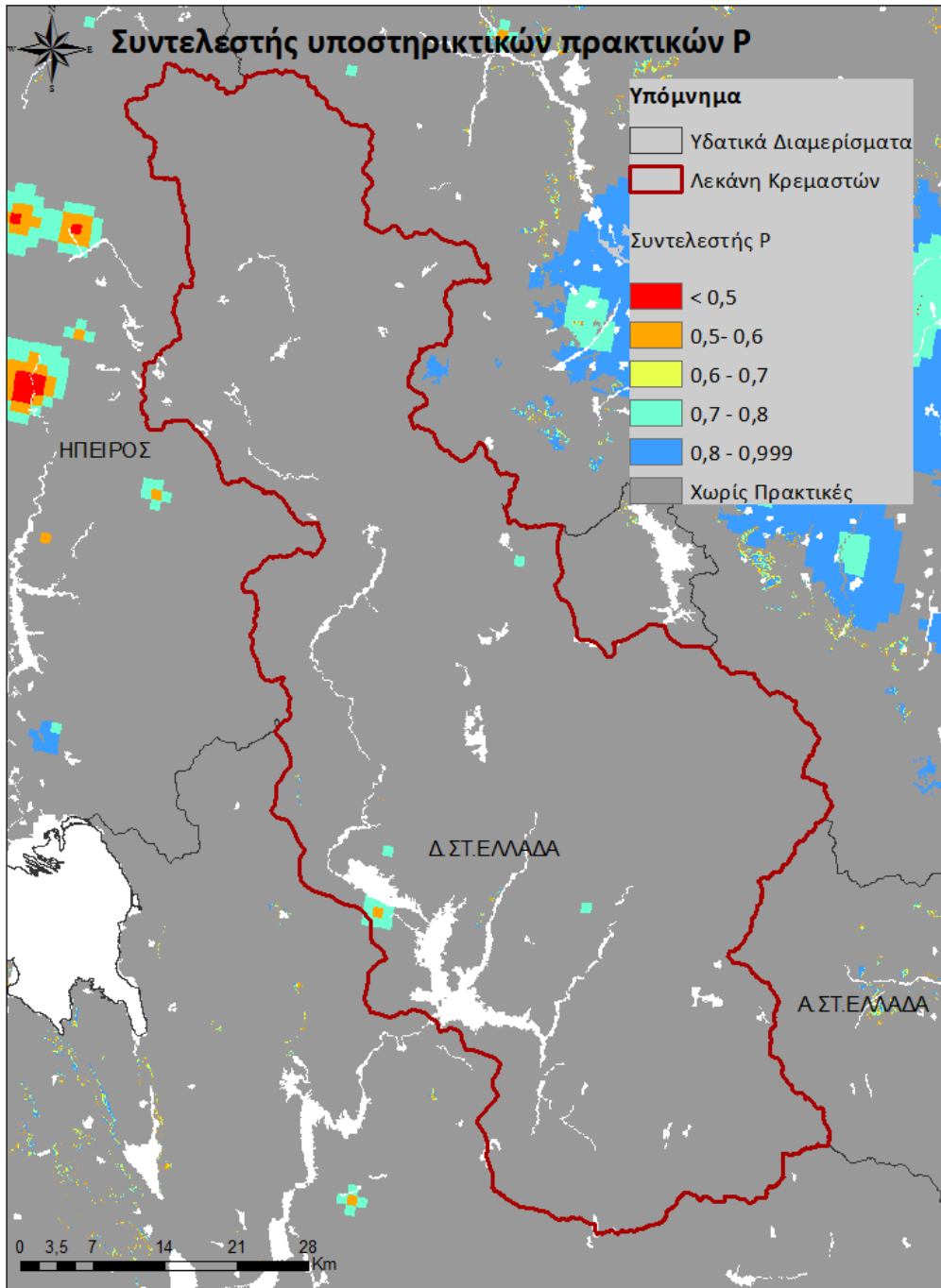
**Εικόνα 6.5:** Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

Οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή LS εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (>10), ενώ καθώς κατευθυνόμαστε προς τα εξωτερικά όρια της λεκάνης η τιμή του συντελεστή μικραίνει.



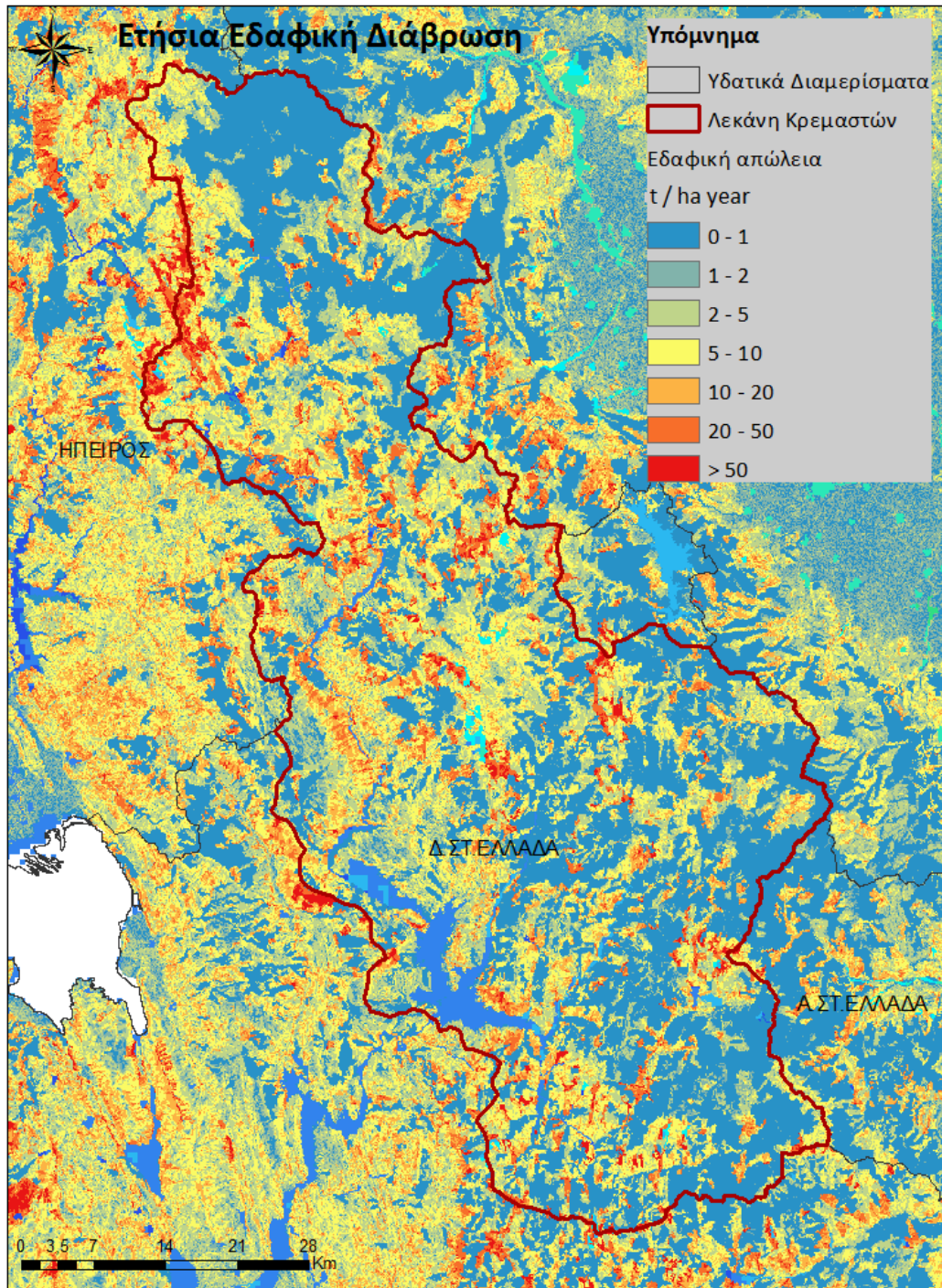
**Εικόνα 6.6:** Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης C στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

Η κύρια κάλυψη γης στη υπό μελέτη λεκάνη απορροής σύμφωνα με τη βάση δεδομένων CORINE είναι δασική, σε αυτό οφείλεται και η χαμηλή μέση τιμή του συντελεστή  $C=0,0382$ . Ειδικότερα στο βόρειο και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης ο συντελεστής λαμβάνει τιμές  $<0,02$ , ενώ στο δυτικό τμήμα όπου διαφοροποιείται η βλάστηση αυξάνει ελάχιστα ο συντελεστής και μεταβαίνει στην επόμενη κατηγορία τιμών από  $0,02-0,10$ .



**Εικόνα 6.7:** Ο συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών P στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

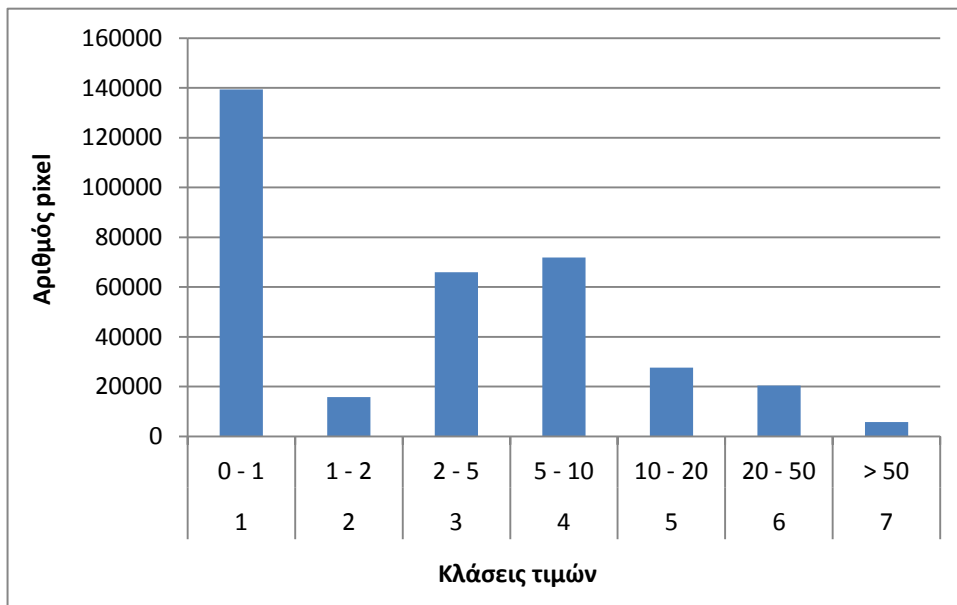
Όπως φαίνεται και στο χάρτη 6.7 στην περιοχή δεν εφαρμόζονται καθόλου υποστηρικτικά μέτρα, με αποτέλεσμα και η τιμή του συντελεστή να αγγίζει τη μονάδα.



**Εικόνα 6.8:** Η ετήσια εδαφική απώλεια στη λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση των Κρεμαστών.

Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.6, ο χάρτης της εικόνας 6.8 παρουσιάζει τη χωρική διακύμανση της ετήσιας εδαφικής απώλειας, συγκεκριμένα στη λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα Κρεμαστών με τη μέση τιμή να προκύπτει ίση με 6,54 t/ha yr. Από το ιστόγραμμα της εικόνας 6.9 παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης, συγκεκριμένα στο βόρειο και νοτιοανατολικό, η εδαφική διάβρωση είναι της τάξεως από 0-

1 t/ha year και ακολουθεί η κατηγορία τιμών από 5-10 t/ha year. Η διάβρωση που είναι μεγαλύτερη στο κεντρικό τμήμα επηρεάζεται από τις υψηλές τοπογραφικές κλίσεις (Εικόνα 6.5).



**Εικόνα 6.9:** Ιστόγραμμα που παρουσιάζει την αντιστοιχία του αριθμού των pixels στις κλάσεις τιμών της εδαφικής απώλειας για την λεκάνη των Κρεμαστών.

Η λεκάνη απορροής στη θέση του φράγματος έχει επιφάνεια ίση με 3.580 km<sup>2</sup> όπως προκύπτει από το arcGIS. Εξαιρώντας τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα καθώς και τμήμα της λεκάνης απορροής που απορρέει άμεσα στον ταμιευτήρα όπως αναφέρουν οι Ζαρρής, κ.ά., 2001, η λεκάνη απορροής των ποταμών Αχελώου, Αγραφιώτη, Μέγδοβα και Τρικεριώτη είναι ίση με 3.292 km<sup>2</sup> (1.271 mi<sup>2</sup>).

Ο συντελεστής στερεοαπορροής (SDR) που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση του Vanoni (3.6) προκύπτει ίσος με 0,17. Η εκτιμώμενη στερεοαπορροή με τη χρήση της σχέσης (3.3) προκύπτει ίση με 1,11 t/ha yr ή 111 t/km<sup>2</sup>.

Δύο εκτιμήσεις του όγκου των αποθέσεων ταμιευτήρων στον ελληνικό χώρο, που αξίζουν αναφοράς για αξιολόγηση και σύγκριση με τις εκτιμήσεις της παρούσας εργασίας, είναι αυτές του ταμιευτήρα Κρεμαστών (Ζαρρής κ.ά., 2001) και Μαραθώνα (Ξανθάκης, 2011). Στις δύο αυτές περιπτώσεις οι αποθέσεις εκτιμώνται μέσω υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα, που αποτελεί την πιο αξιόπιστη επιλογή μέτρησης των αποθέσεων και μετέπειτα εκτίμησης ποσοτήτων στερεοαπορροής (με προϋπόθεση βέβαια την ύπαρξη ταμιευτήρα για τη διεξαγωγή της αποτύπωσης). Σύμφωνα με τους Ζαρρής κ.ά., (2001), η μέση ετήσια στερεοαπορροή της συνολικής λεκάνης απορροής των Κρεμαστών, για 34 χρόνια είναι ίση με 1.005,6 t/km<sup>2</sup> ενώ η μέση ετήσια στερεοαπορροή είναι ίση με 106,4 kg/s.

Παράλληλα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες» (Ζαρρής κ.ά., 2001) εφαρμόζεται ένα



υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής, με την υιοθέτηση της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας, βασισμένης σε σύγχρονο περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας. Η μέση τιμή της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών υπολογίζεται ίση με 47,26 t/ha yr. Για τα 34 χρόνια λειτουργίας του ταμιευτήρα η συνολική εδαφική διάβρωση είναι ίση με 528.971.728 t δηλαδή 528,97 Mt. Με βάση τη συνολική ποσότητα της εδαφικής διάβρωσης που κατακρατείται στον ταμιευτήρα ο συντελεστής στερεοαπορροής της λεκάνης Κρεμαστών εκτιμάται ίσος με 0,20 και η συνολική στερεοαπορροή υπολογίζεται ίση με 13,32 t/ha.

**Πίνακας 6.2:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα, το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής και τα δεδομένα εδαφικής διάβρωσης.

Υδρογραφική αποτύπωση ταμιευτήρα		Υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής (ΠΕΕΑ)		Δεδομένα εδαφικής διάβρωσης (RUSLE)	
Μέση ετήσια στερεοαπορροή (t/km <sup>2</sup> )	SDR	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (t/km <sup>2</sup> )	SDR	Μέση ετήσια στερεοαπορροή (t/km <sup>2</sup> )	SDR
1.005,6	0,20	1.332	0,26	111	0,17

Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα με τη συνδυασμένη χρήση της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα, του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής καθώς και αυτά με τη χρήση των δεδομένων της εδαφικής διάβρωσης από τα στοιχεία του Πανάγου. Είναι φανερό ότι η στερεοαπορροή που υπολογίζεται από το υδρολογικό μοντέλο υπερεκτιμά σε κάποιο βαθμό τη μετρημένη στερεοαπορροή. Αυτό το συμπέρασμα δηλώνει και την αδυναμία του μοντέλου να υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια τη στερεοαπορροή ακόμα και στην περίπτωση της βαθμονόμησης του δείκτη στερεοαπορροής. Σε γενικές γραμμές, το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής SEAGIS δίνει φυσιολογικά και λογικά αποτελέσματα σε σχέση με τη μετρημένη τιμή της στερεοαπορροής στον ταμιευτήρα Κρεμαστών για όλη τη λεκάνη απορροής. Συγκρινόμενη όμως η τιμή της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής με τη χρήση των δεδομένων του Πανάγου από τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν με τα δεδομένα του ερευνητικού προγράμματος «Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες» διαπιστώνεται μεγάλη ασυμφωνία. Συγκεκριμένα η μετρούμενη στερεοαπορροή με τα δεδομένα Πανάγου, εμφανίζεται κατά 89% μικρότερη. Η υποεκτίμηση αυτή οφείλεται στο ότι η εδαφική διάβρωση που έχει υπολογιστεί με το εμπειρικό μοντέλο της RUSLE, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής και σε συνδυασμό με άλλες εμπειρικές σχέσεις πχ του Vanoni αυξάνει το ποσοστό αβεβαιότητας. Επίσης δεν υπολογίζονται τυχόν άλλα είδη διάβρωσης που μπορεί

να λαμβάνουν χώρα στην έκταση της λεκάνης ή άλλα φαινόμενα υπεύθυνα για την αύξηση των φερτών υλικών.

Η επιλογή της εξίσωσης του Vanoni για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής έδωσε μικρότερη τιμή απότι στις δυο άλλες μεθόδους, κάτι που υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά σε λεκάνες απορροής μεγάλης έκτασης.

Το μέγεθος του συντελεστή διαβρωτικότητας R έχει την πιο δραστική επιρροή στη διαμόρφωση του μεγέθους εδαφικής απώλειας. Μια πηγή αβεβαιότητας στον υπολογισμό του αποτελεί η διαφορετική χρονική ανάλυση των μετρήσεων των βροχομετρικών σταθμών στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Όπως αναφέρει και ο Πανάγος, σε περιφερειακή ή τοπική κλίμακα, συνιστάται να χρησιμοποιούνται δεδομένα από τη Βάση Δεδομένων Διαβρωτικότητας της Βροχόπτωσης Ευρωπαϊκής κλίμακας (REDES), σε συνδυασμό με τοπικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης ώστε να πραγματοποιούνται οι παρεμβολές των τιμών.

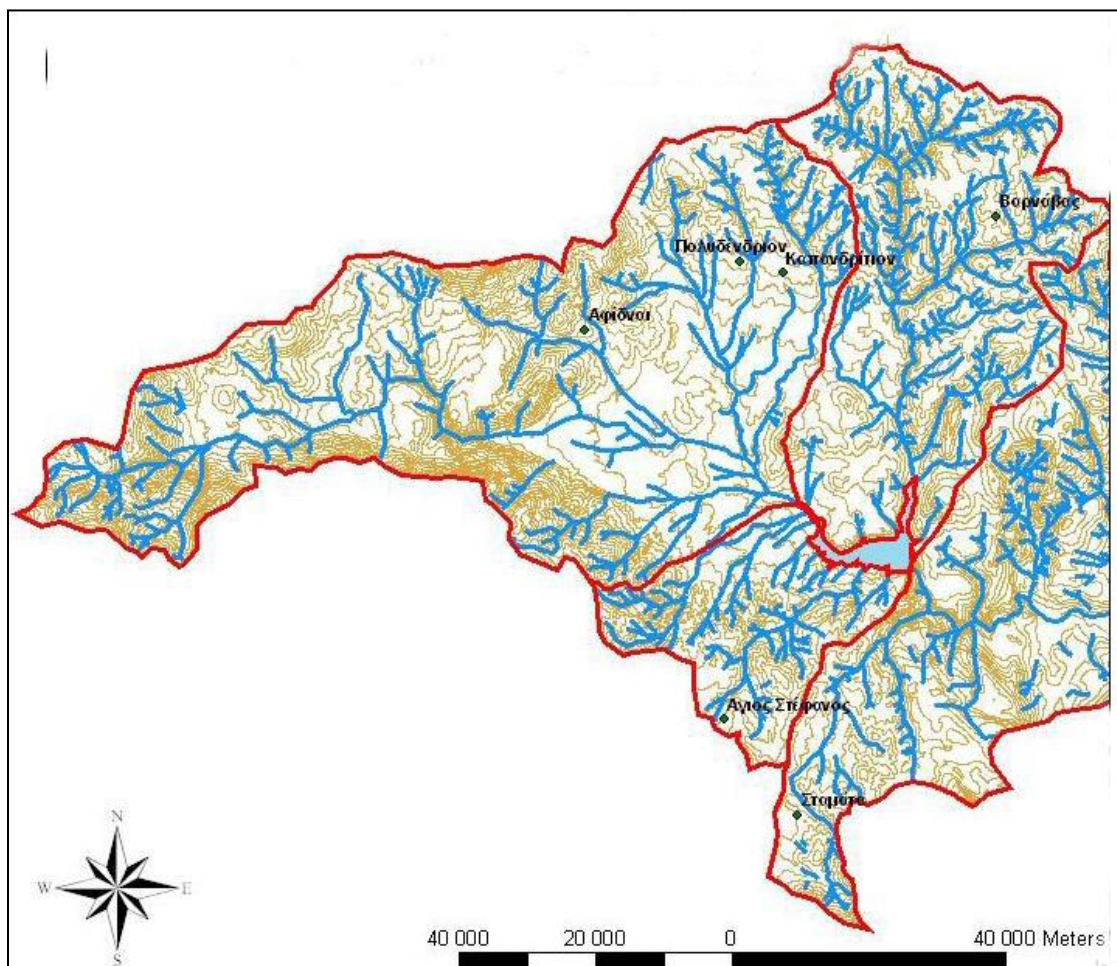
Σύμφωνα με τον χάρτη 5.3, δεν υπάρχουν στοιχεία από βροχομετρικούς σταθμούς στην έκταση της λεκάνης απορροής, παρά μονάχα στις πλησιέστερες περιοχές όπου και χρησιμοποιούνται ώστε να εκτιμηθεί ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R. Η μέση τιμή του συντελεστή R με χρονικό βήμα τα 30 min, είναι  $1.113,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Στον παρακάτω πίνακα 6.3 απεικονίζονται οι τιμές του ετήσιου συντελεστή διαβρωτικότητας R για τα 7 έτη από το βροχομετρικό σταθμό Καρπενησίου όπου το χρονικό βήμα είναι τα 10 min. Η μέση τιμή που προκύπτει είναι  $2.373 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Συνεπώς ο τελευταίος συντελεστής R είναι κατά 53% φορές μεγαλύτερος οπότε και η εδαφική απώλεια αυξάνεται αντίστοιχα.

**Πίνακας 6.3:** Έτη αναλυτικών υπολογισμών – τιμές μηνιαίου και ετήσιου R βροχομετρικού σταθμού Καρπενησίου.

ΥΔΡΟΛ. ΕΤΟΣ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
2008-09											208	47	255
2009-10	1,22 2	231	112	194	134	280	43	86	24	0	80	0	2.406
2010-11	199	220	928	841	2.109	257	31	121	96	380	0	84	5.266
2011-12	714	583	197	38	100	64	80	179	120	0	149	101	2.325
2012-13	255	0	439	170	365	39	317	199	0	0	481	683	2.948
2013-14	534	119	674	504	278	354	91	0	40	0	0	449	3.043
2014-15	48	279	41										368
<b>Μέση</b>	270, 2	130, 2	217,4	158, 8	271,5	90,4	51,1	53,2	25,5	34,5	83,5	124,0	<b>2.373</b>

## 6.2 Υδρολογική λεκάνη της Λίμνης Μαραθώνα

Η λίμνη του Μαραθώνα ή σωστότερα ο ταμιευτήρας είναι ένα τεχνητό έργο που δημιουργήθηκε ύστερα από την κατασκευή του ομώνυμου φράγματος στη συμβολή των χειμάρων Χάραδρου και Βαρνάβα κοντά στον οικισμό του Μαραθώνα Αττικής. Το εμβαδόν του ταμιευτήρα στο ύψος του φράγματος είναι 2,45 km<sup>2</sup> με μέγιστο βάθος τα 50 m περίπου. Ο ταμιευτήρας συλλέγει νερό από μια λεκάνη απορροής 118 km<sup>2</sup> με μια μέση βροχόπτωση 589 mm το χρόνο. Το μητρικό πέτρωμα της λεκάνης απορροής συνίσταται από ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Στη περιοχή απαντώνται επίσης τριτογενείς αποθέσεις που περιλαμβάνουν αλλουβιακές αποθέσεις, συνεκτικά πλευρικά κορημάτα και κώνους κορημάτων, λεπτομερείς προσχωματικές αποθέσεις με διάσπαρτες κροκάλες που αποτελούν υλικά ποτάμιων αποθέσεων του Χάραδρου και του Βαρνάβα και μια μικρή περιοχή στην Πάρνηθα που εδράζεται ο φλύσχος.

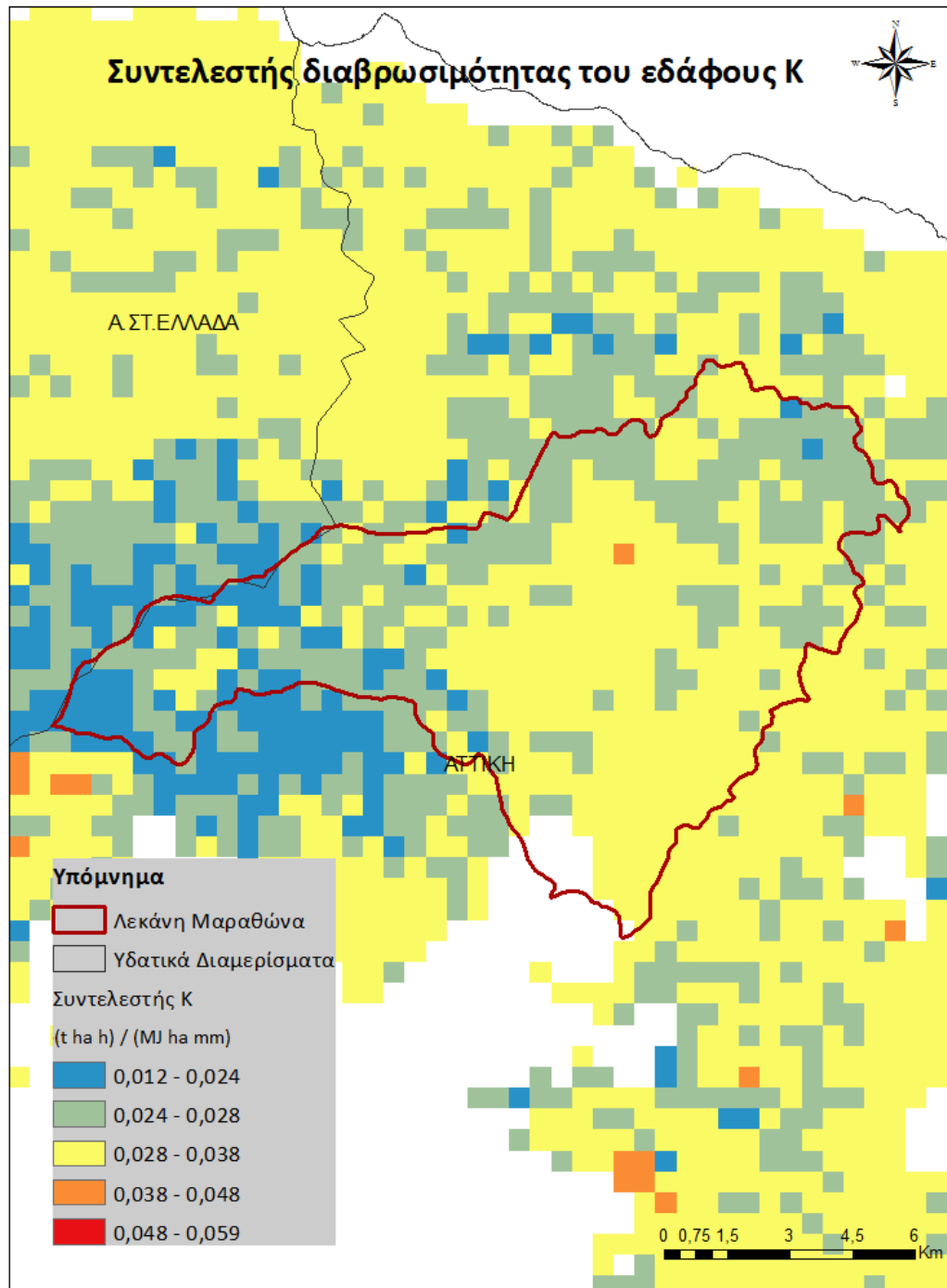


**Εικόνα 6.9:** Η ευρύτερη λεκάνη απορροής του Οινόη ποταμού (Ξανθάκης κ.ά., 2010).

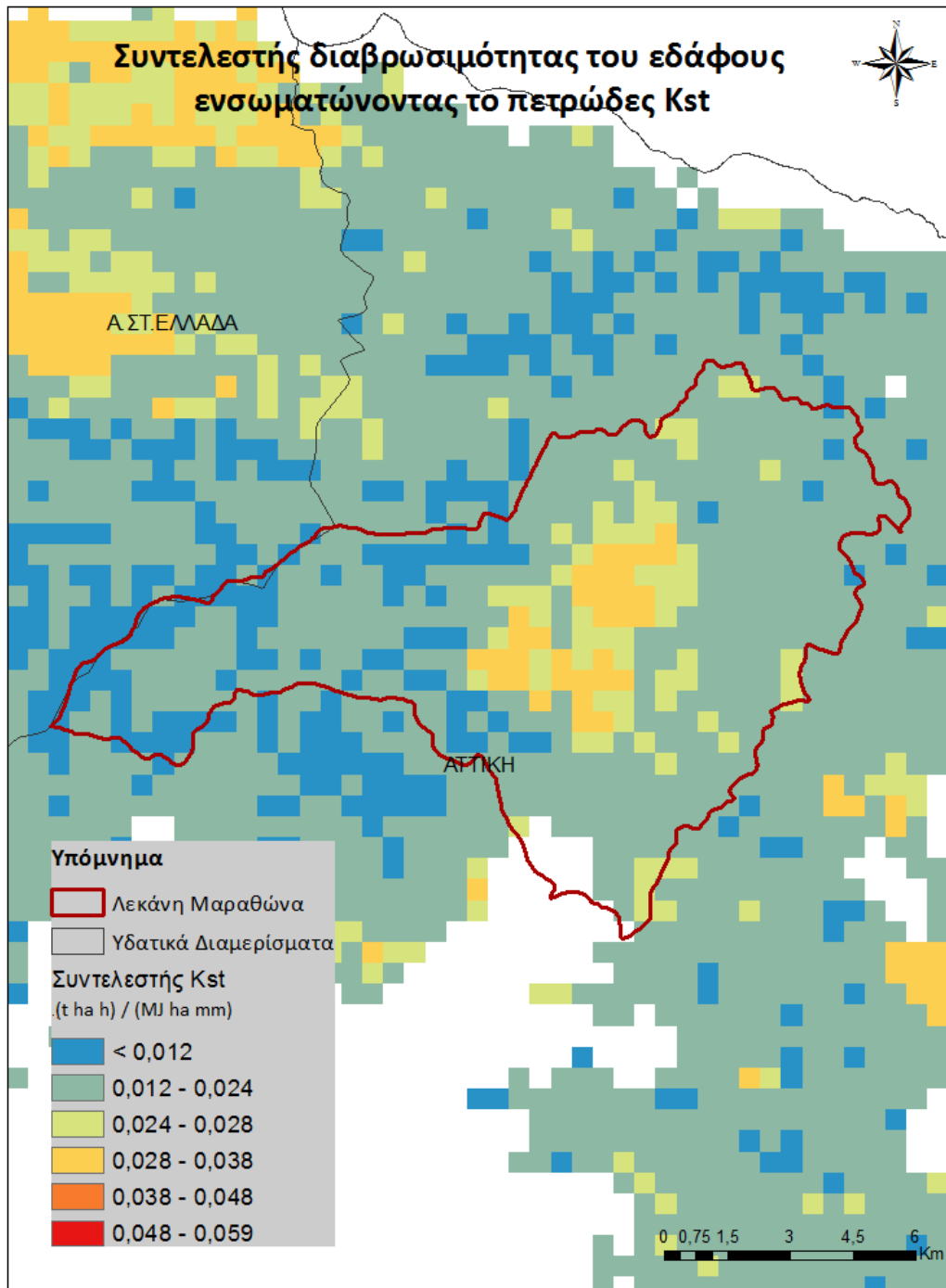
Με τη χρήση της επιλογής Zonal Statistics του εργαλείου Spatial Analyst Tool στο arcGIS, προκύπτουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του πίνακα 6.4 για κάθε ένα συντελεστή της εξίσωσης RUSLE αλλά και της εδαφικής απώλειας.

**Πίνακας 6.4:** Στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών της εξίσωσης RUSLE και της εδαφικής απώλειας για τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.

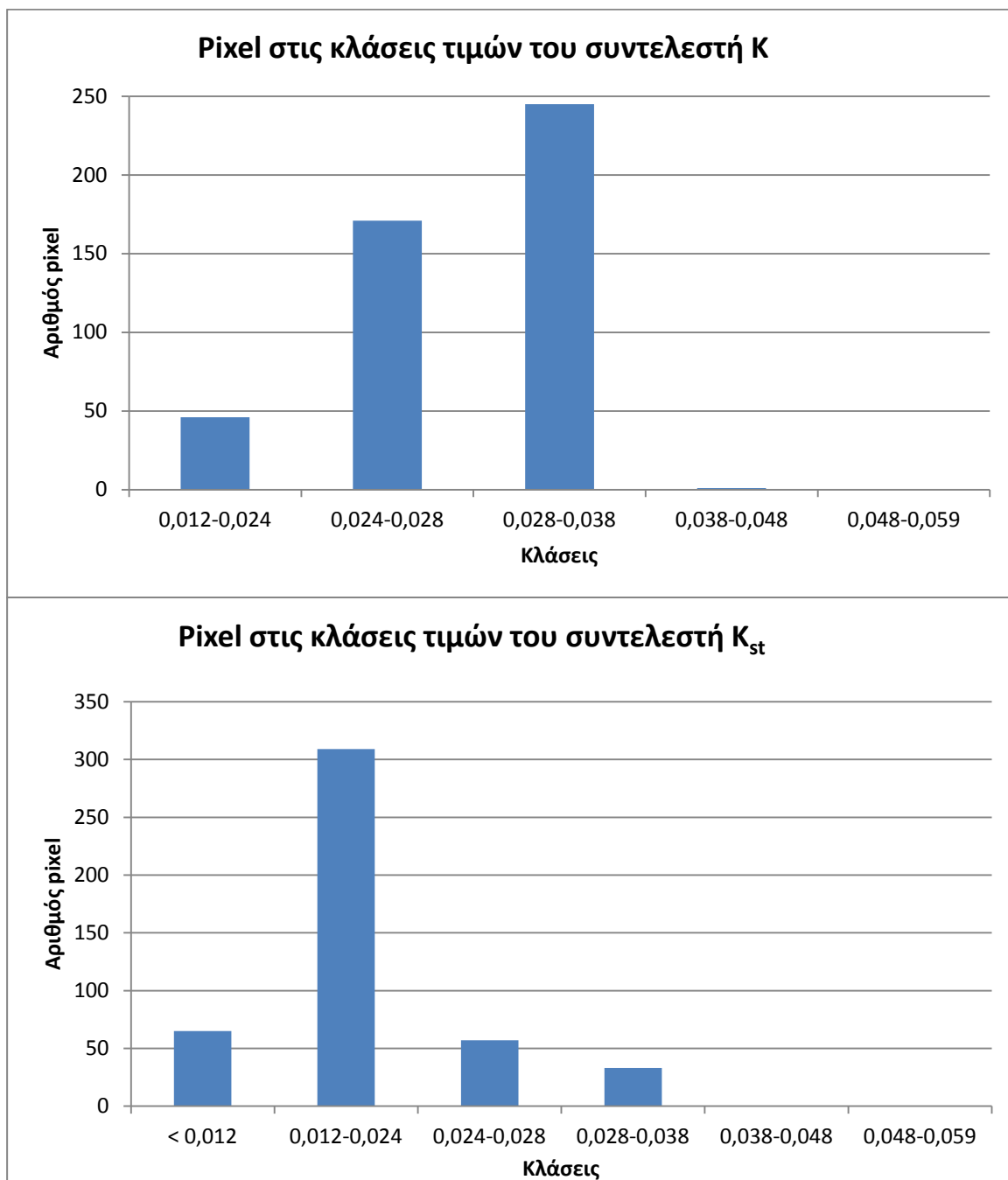
	K	K <sub>st</sub>	R	LS	C	P	E (t / ha / yr)
	(t ha h / ha MJ mm)		(MJ mm / ha h yr)				
<b>Ελάχιστη τιμή</b>	0,0201	0,0067	535	0,03	0,0009	0,6	0
<b>Μέγιστη τιμή</b>	0,0389	0,0362	1270,3	48,18	0,2538	1	38,08
<b>Εύρος</b>	0,0188	0,0295	735,3	48,15	0,2529	0,4	38,08
<b>Μέση τιμή</b>	0,0284	0,0187	771,1	2,21	0,1016	0,992	2,19
<b>Τυπική απόκλιση</b>	0,0034	0,0059	124,4	2,06	0,0788	0,051	2,40



**Εικόνα 6.10:** Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K στη λεκάνη του Μαραθώνα.

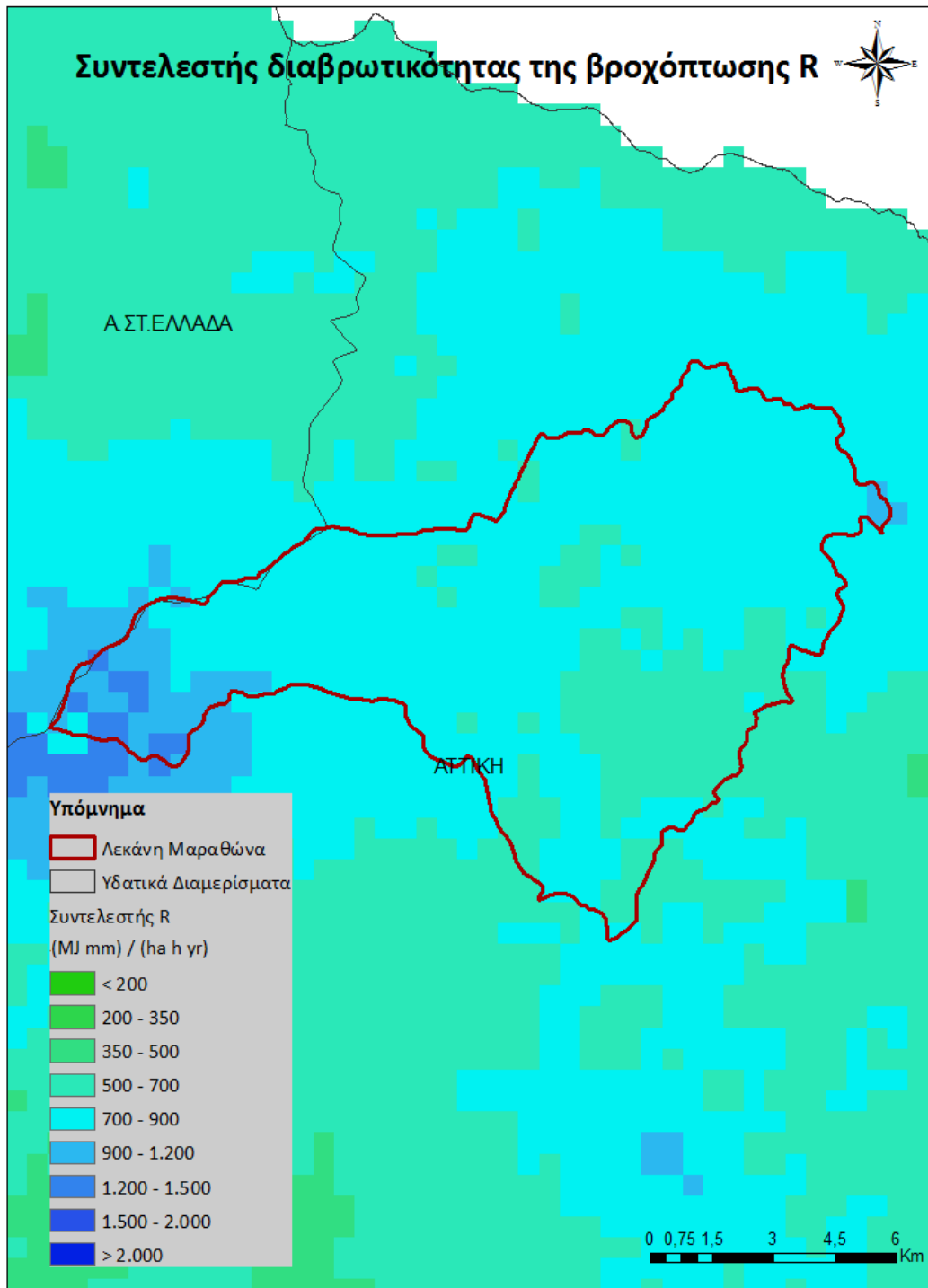


**Εικόνα 6.11:** Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες K<sub>st</sub> στη λεκάνη του Μαραθώνα.



**Εικόνα 6.12:** Ιστογράμματα που παρουσιάζουν την αντιστοιχία του αριθμού των pixels στις κλάσεις τιμών των συντελεστών K και  $K_{st}$ .

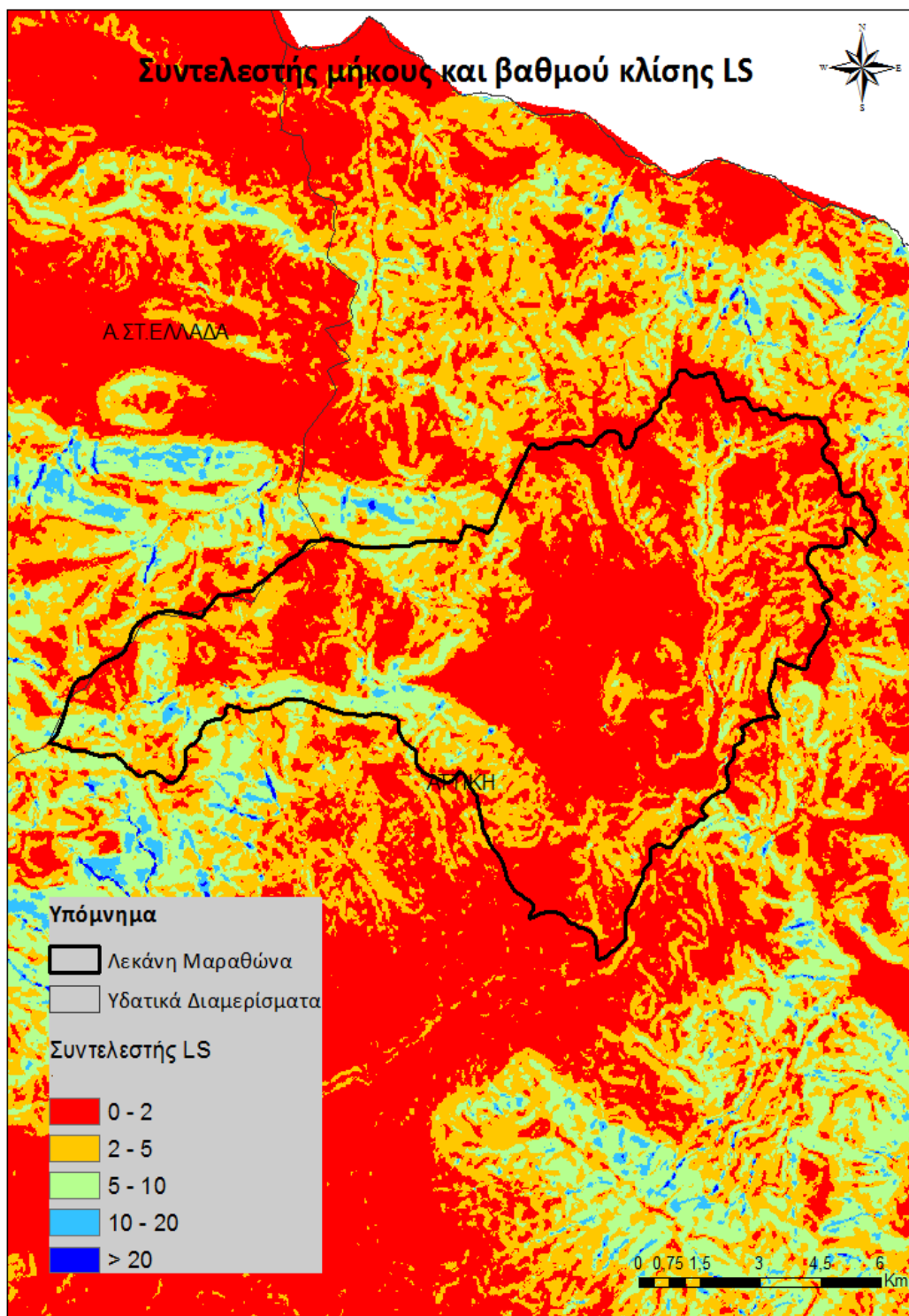
Σύμφωνα με τα παραπάνω ιστογράμματα η κυρίαρχη κατηγορία τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ενσωματώνοντας το πετρώδες  $K_{st}$  είναι από 0,012 έως 0,024, εν αντιθέσει με την κατηγορία τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής διαβρωσιμότητας K του εδάφους από 0,028 έως 0,038. Από τη σύγκριση των χαρτών αυτών, η ενσωμάτωση της προστατευτικής επίδρασης του πετρώδους έχει ως αποτέλεσμα μια μέση μείωση του συντελεστή K κατά 25%.



**Εικόνα 6.13:** Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R στη λεκάνη του Μαραθώνα.

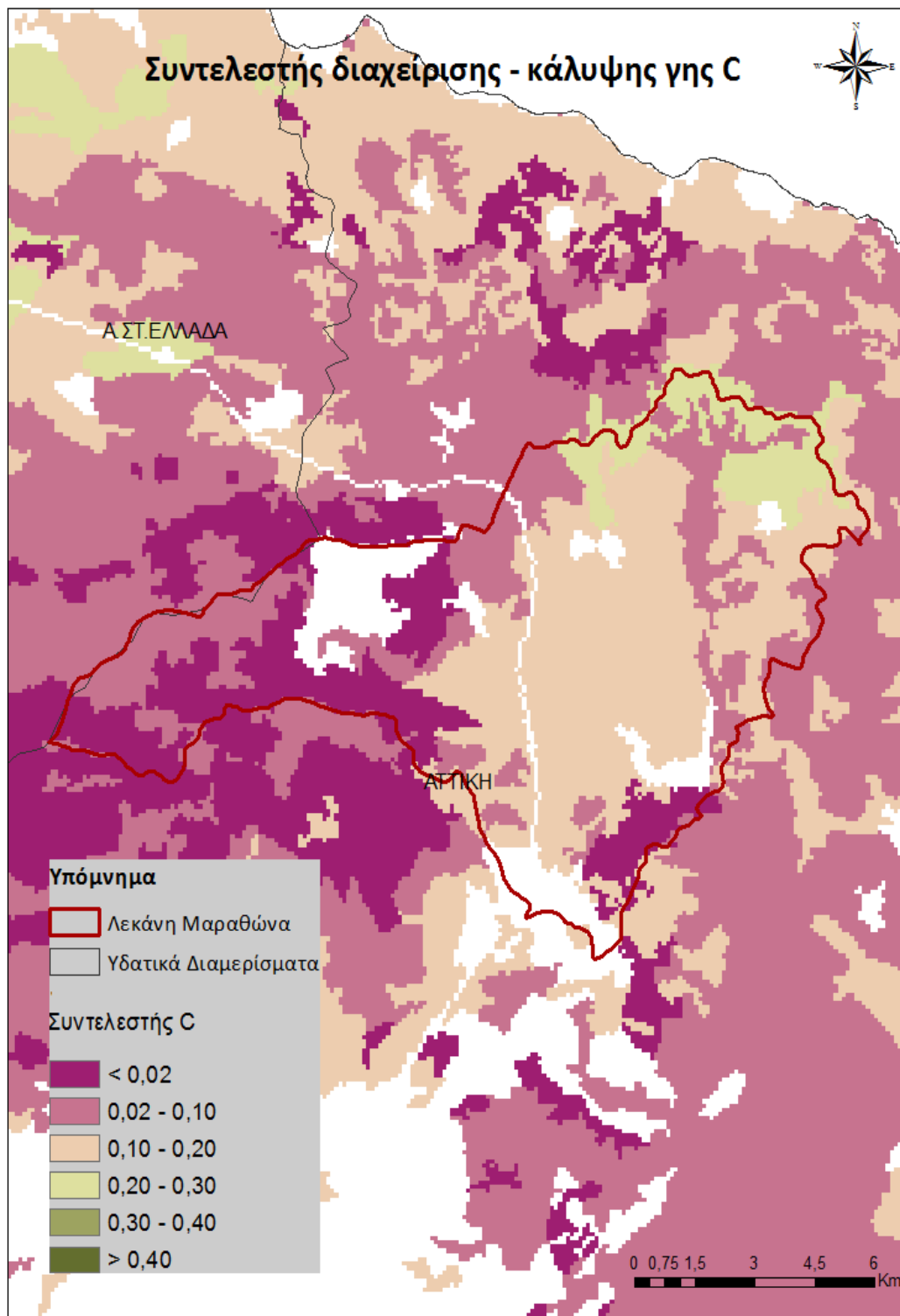
Η μέση τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής R είναι  $771,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , με ελάχιστη τιμή τα  $535 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  κάτι το οποίο επαληθεύεται και από τον αντίστοιχο χάρτη της εικόνας 6.13.





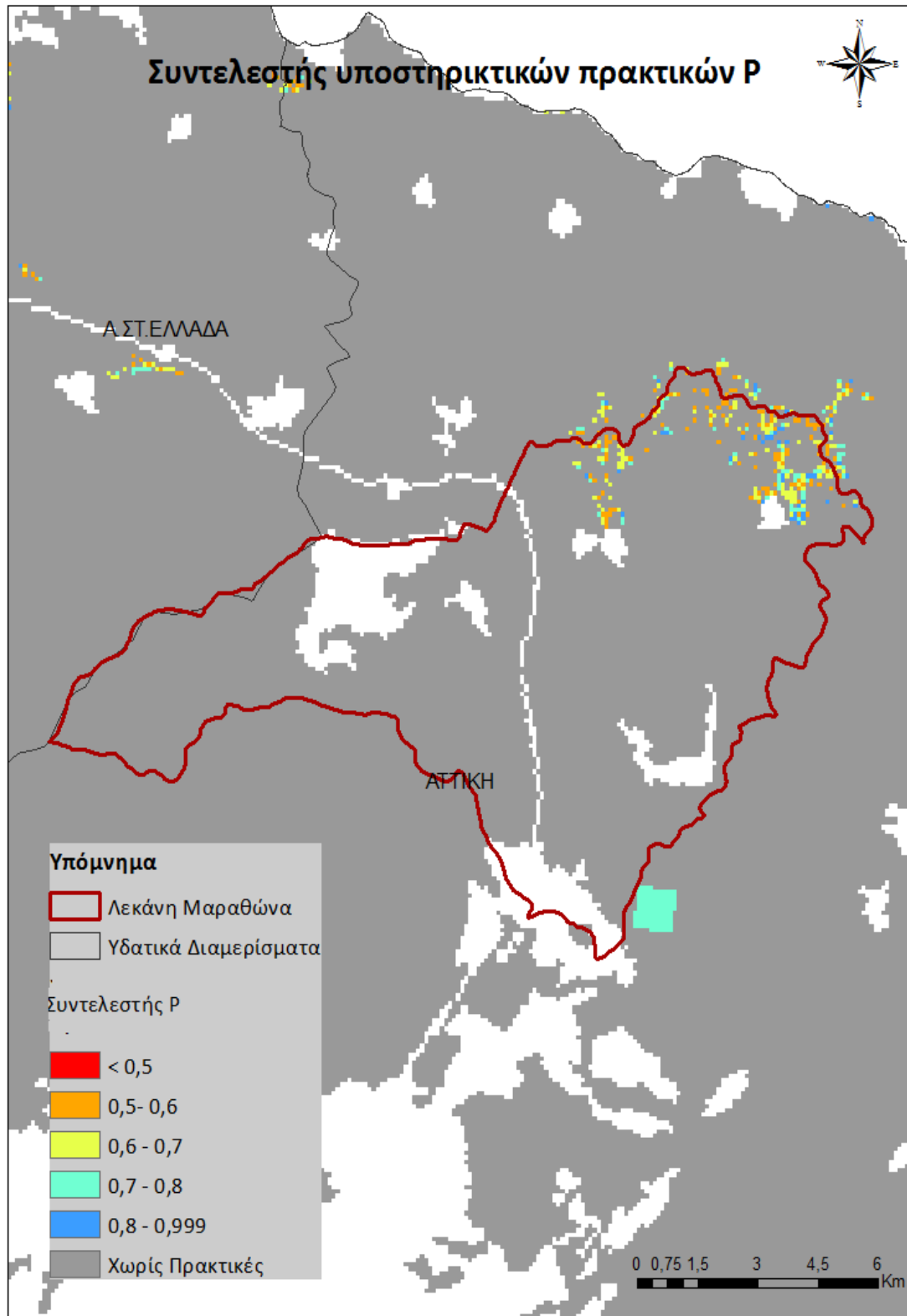
**Εικόνα 6.13:** Ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης LS στη λεκάνη του Μαραθώνα.

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης ανήκει στην μικρότερη κατηγορία τιμών του συντελεστή LS από 0 έως 2. Καθώς κατευθυνόμαστε στα εξωτερικά όρια της λεκάνης γίνεται μετάβαση στις επόμενες κατηγορίες τιμών (2-5) με το ΝΔ τμήμα να λαμβάνει υψηλότερες τιμές της κατηγορίας 5 έως 10.



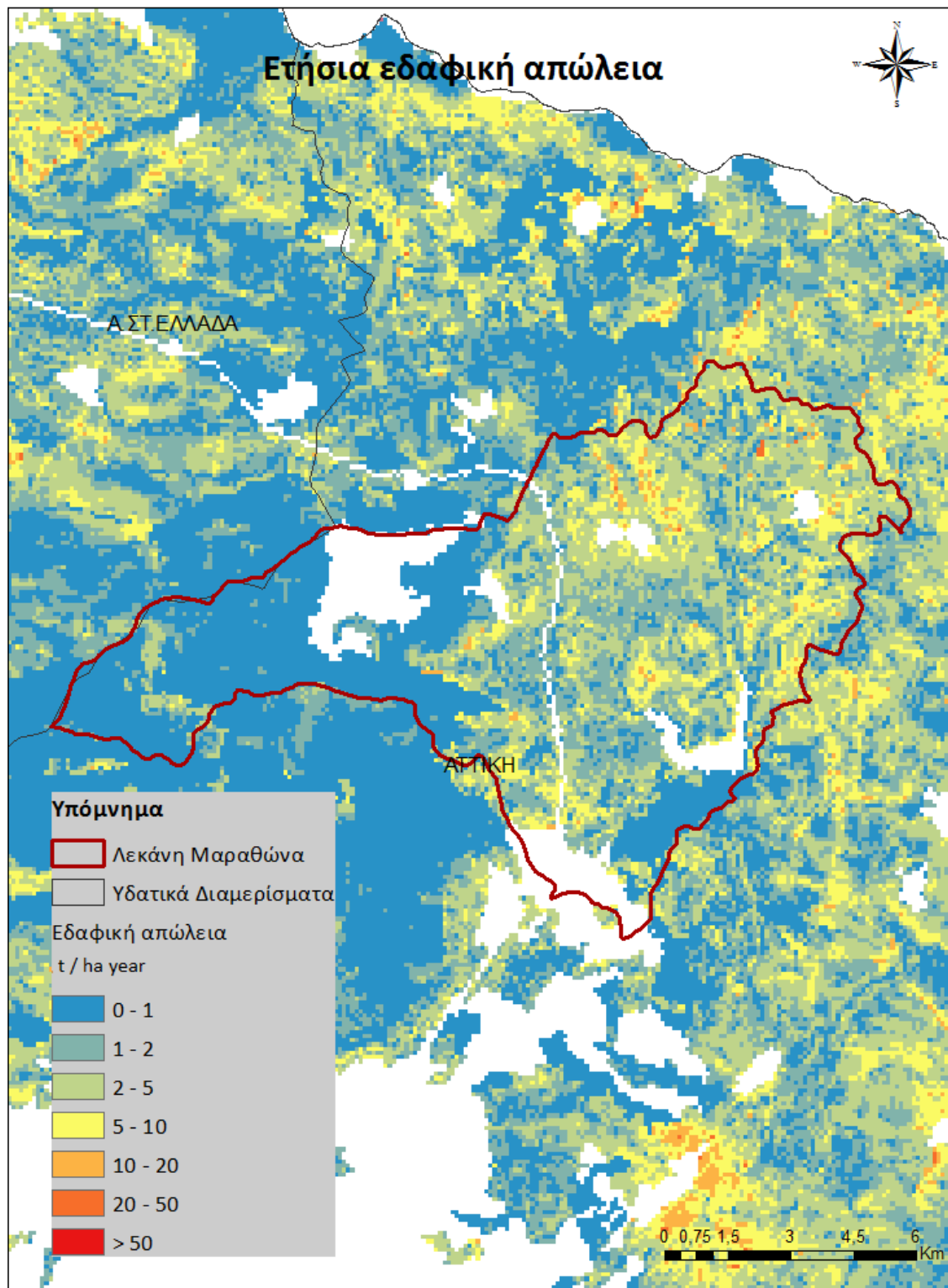
**Εικόνα 6.14:** Ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης C στη λεκάνη του Μαραθώνα.

Η μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης απορροής λαμβάνει τιμές από την κατηγορία τιμών 0,10 έως 0,20, όπου σύμφωνα με το CORINE αποτελούν ετερογενείς γεωργικές περιοχές (code: 242, 243). Το δυτικό τμήμα λαμβάνει τις μικρότερες τιμές (<math>< 0,10</math>) καθώς αποτελούν δασική έκταση, ενώ το ΒΑ τμήμα τις υψηλότερες τιμές (0,20 έως 0,30) καθώς αποτελούν μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις.



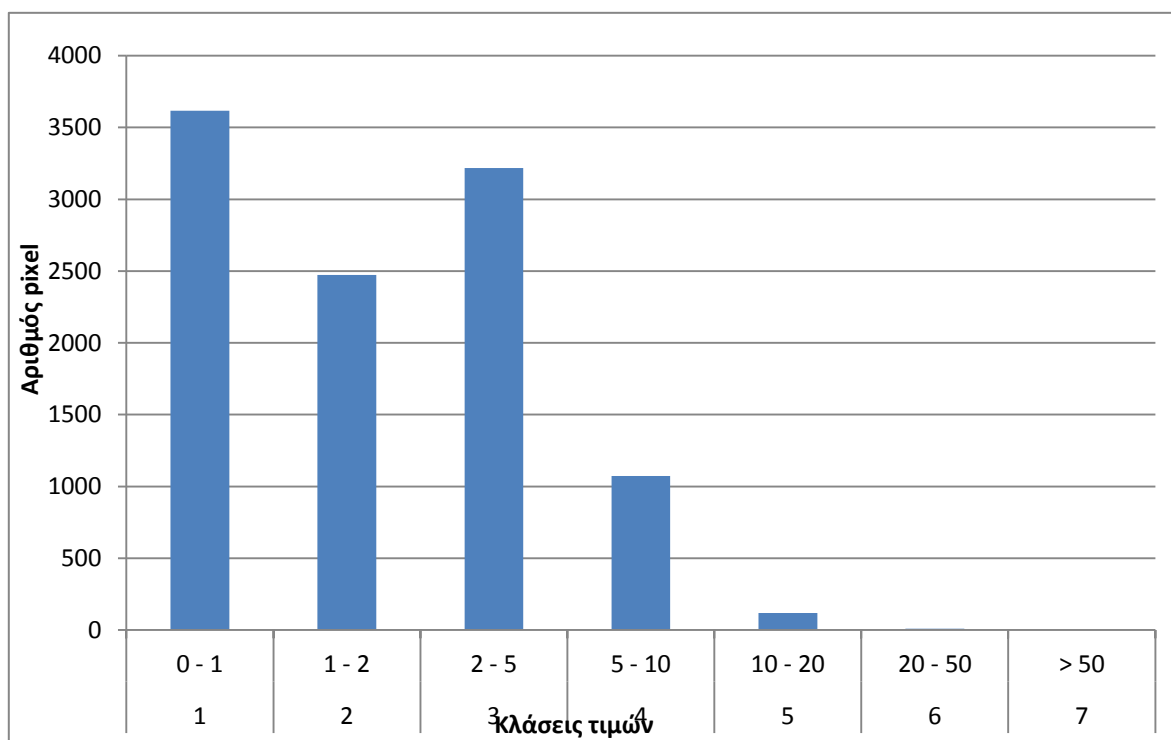
**Εικόνα 6.15:** Ο συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών P στη λεκάνη του Μαραθώνα.

Όπως φαίνεται από τον χάρτη της εικόνας 6.15 δεν λαμβάνονται υποστηρικτικές πρακτικές για την αντιμετώπιση της διάβρωσης, μονάχα στο βόρειο τμήμα της λεκάνης μια μικρή έκταση όπου είναι και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις.



**Εικόνα 6.16:** Η ετήσια εδαφική απώλεια στη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα.

Η μέση τιμή της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη του Μαραθώνα υπολογίζεται σε 2,19 t/ha. Η λεκάνη απορροής έχει επιφάνεια ίση με 118,6 km<sup>2</sup> όπως προκύπτει από το arcGIS. Ο συντελεστής στερεοαπορροής υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση του Vanoni (1975), (3.6) και προκύπτει ίσος με 0,23. Η εκτιμώμενη στερεοαπορροή με τη χρήση της σχέσης (3.4) προκύπτει ίση με 0,50 t/ha/yr ή 50 t/km<sup>2</sup>.



**Εικόνα 6.17:** Ιστόγραμμα που παρουσιάζει την αντιστοιχία του αριθμού των pixels στις κλάσεις τιμών της εδαφικής απώλειας για τη λεκάνη του Μαραθώνα.

Σύμφωνα με τον Ξανθάκης 2011, ο συνολικός όγκος των αποθέσεων που προκύπτει από την εφαρμογή της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα το 2009, εκτιμάται ίσος με 4,68 hm<sup>3</sup>. Στο μέγεθος αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται οι αποθέσεις που βρίσκονται έξω από τα όρια της υδρογραφικής αποτύπωσης. Η μέση ετήσια στερεοαπορροή της συνολικής λεκάνης του Μαραθώνα, για 80 χρόνια εκτιμάται ίση με 508,2 t/km<sup>2</sup>. Παράλληλα στη μελέτη αυτή πραγματοποιούνται τρεις προσπάθειες εκτίμησης διάβρωσης εκ των οποίων η μια μέθοδος είναι της RUSLE. Ο συντελεστής στερεοαπορροής εκτιμάται με την εξίσωση του Renfro και προκύπτει ίσος με 24%.

Παρατηρείται ότι γίνεται υποεκτίμηση της στερεοαπορροής στο 1/10 της μετρούμενης τιμής. Η χρήση εμπειρικών σχέσεων αλλά και οι αβεβαιότητες των συντελεστών που εισάγονται στην RUSLE οδηγούν στην υποεκτίμηση της διάβρωσης. Η τιμή που προκύπτει από την βυθομέτρηση αφορά και τις ποσότητες των φερτών που αυξήθηκαν λόγω της πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στο Μαραθώνα το 2009 (Ξανθάκης, 2011). Εν προκειμένω τα δεδομένα χρήσης/κάλυψης γης που χρησιμοποιούνται από τη βάση δεδομένων CORINE για τον υπολογισμό του συντελεστή C αφορούν στη χρονολογία του 2006, οπότε υποεκτιμάται η εδαφική διάβρωση.

Η μέση τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής R όπως υπολογίζεται από την ομάδα του Πανάγου είναι 771,1 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Στον παρακάτω πίνακα 6.4 απεικονίζονται οι τιμές του ετήσιου συντελεστή διαβρωτικότητας R για τα 11 έτη από το βροχομετρικό σταθμό Πεντέλης όπου το χρονικό βήμα είναι 10 min. Η μέση τιμή που προκύπτει είναι 1673,2 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Ο τελευταίος συντελεστής R είναι περίπου κατά 2,2 φορές μεγαλύτερος οπότε και η εδαφική απώλεια αντίστοιχα αυξάνεται περίπου σε 4,75 t/ha.

**Πίνακας 6.5:** Έτη αναλυτικών υπολογισμών – τιμές μηνιαίου και ετήσιου R βροχομετρικού σταθμού Πεντέλης.

ΥΔΡΟΛ. ΕΤΟΣ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡΤ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
2005-06		1.049	127	135	104	32	0	345	55	0	0	108	1.955
2006-07	1.000	27	17	0	120	138	0	184	0	0	0	0	1.486
2007-08	195	78	138	42	50	119	75	0	159	0	0	0	856
2008-09	0	227	235	128	110	34	9	0	0	657	0	234	1.634
2009-10	201	21	256	95	14	27	0	0	750	525	0	41	1.930
2010-11	878	102	24	55	535	47	69	0	32	0	0	0	1.742
2011-12	53	12	191	18	173	0	35	33	0	0	0	0	515
2012-13	26	626	1243	183	959	128	0	83	786	0	0	0	4.034
2013-14	110	219	69	261	16	44	184	0	109	40	0	0	1.052
2014-15	214	76	406	24	30	299	18	88	0	0	0	138	1.293
2015-16	1.484	158	13	66	48	139							1.908
<b>Μέση</b>	<b>378,3</b>	<b>235,9</b>	<b>247,2</b>	<b>91,5</b>	<b>196,3</b>	<b>91,5</b>	<b>35,5</b>	<b>66,6</b>	<b>171,9</b>	<b>111,1</b>	<b>0,0</b>	<b>47,4</b>	<b>1.673,2</b>

## 7. Συμπεράσματα

Η RUSLE είναι ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας με ευκολία στη χρήση, συνεπώς απολαμβάνει μεγάλη εφαρμογή παγκοσμίως. Για αυτό το λόγο επιλέγεται ως το μοντέλο που εκτιμά την εδαφική απώλεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Ερευνών. Από τα πανευρωπαϊκά δεδομένα εξάγονται αυτά που αφορούν την Ελλάδα. Η μέση τιμή της ετήσιας εδαφικής απώλειας για τη χώρα μας προκύπτει  $3,61 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του  $7,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Η διακύμανση των τιμών είναι μεγάλη, από 0 έως  $325 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  λόγω της διαφορετικής τοπογραφίας, κλιματολογίας, χρήσης γης και διαχείρισης. Προκύπτει ότι ο συνδυασμός της υψηλής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-factor) με τις σχετικά απότομες κλίσεις (LS-factor) οδηγούν στις αυξημένες τιμές της εδαφικής απώλειας. Συγκεκριμένα στα Υδατικά Διαμερίσματα της Ηπείρου, της Δ. Στ. Ελλάδας, της Κρήτης και της Β. Πελοποννήσου που εμφανίζουν υψηλές τιμές του συντελεστή R ( $R > 900 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) με τις υψηλές τιμές του συντελεστή LS ( $LS > 10$ ) αποτελούν περιοχές που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση. Παράλληλα η έλλειψη υποστηρικτικών πρακτικών P στα προαναφερόμενα υδατικά διαμερίσματα εντείνει το πρόβλημα.

Ουσιαστικά η RUSLE ως εμπειρικό μοντέλο προσομοιώνει σε γενικό βαθμό μόνο την επιφανειακή διάβρωση και τη αυλακωτή διάβρωση, και σε μεγαλύτερες λεκάνες απορροής όπως αυτή των Κρεμαστών όπου υπεισέρχονται επιπλέον φυσικές διεργασίες, όπως κατολισθήσεις, απόθεση φερτών υλικών στις πλημμυρικές κοίτες ποταμών, διάβρωση όχθων και άλλες οι οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να περιγραφούν μαθηματικά και να προβλεφθούν, υποεκτιμά τη τιμή της εδαφικής απώλειας. Το ίδιο συμβαίνει και στην λεκάνη απορροής του Μαραθώνα που παρόλο τη μικρότερη έκταση της εμφανίζονται και άλλα είδη διάβρωσης όπως η πραινική και χαραδρωτή διάβρωση. Το πρόβλημα μεγεθύνεται όταν η RUSLE (ή USLE) χρησιμοποιείται ως εργαλείο υδρολογικής και όχι εδαφολογικής ή γεωργικής διαχείρισης. Στις περιπτώσεις αυτές, η μέθοδος εφαρμόζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής, όπου το ενδιαφέρον δεν περιορίζεται στην εκτίμηση της παραγωγής εδαφικής διάβρωσης συγκεκριμένων περιοχών και χρήσεων γης, αλλά επεκτείνεται στον προσδιορισμό της ποσότητας φερτών υλικών που τελικά θα μεταφερθεί μέσω του υδρογραφικού δικτύου εκτός της λεκάνης αναφοράς, δηλαδή της στερεοαπορροής. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος και της συσχέτισης της εδαφικής διάβρωσης με τη στερεοαπορροή, χρησιμοποιείται ο συντελεστής στερεοαπορροής. Ωστόσο είναι σημαντική η επιλογή της κατάλληλης σχέσης υπολογισμού του συντελεστή στερεοαπορροής, με ποια μεταβλητή συνδέεται (πχ γεωμορφολογικά/φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης ή/και του υδρογραφικού δικτύου) και πως έχει προκύψει η σχέση αυτή, ώστε να επιλέγεται η πλέον κατάλληλη για τη περιοχή μελέτης.

Στις λεκάνες απορροής των Κρεμαστών και του Μαραθώνα η εκτίμηση της στερεοαπορροής πραγματοποιείται με τη σχέση του Vanoni (1975), ως η αντιπροσωπευτικότερη των σχέσεων  $SDR \sim A$ . Ωστόσο στην λεκάνη απορροής των Κρεμαστών προκύπτει μικρότερη η τιμή του συντελεστή ( $SDR=0,17$ ) εν συγκρίσει με τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου ( $SDR=0,20$ ) και του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής ( $SDR=0,26$ ) (Ζαρρής κ.ά, 2001). Μπορούμε να πούμε ότι η σχέση του Vanoni, ως εμπειρική, παρουσιάζει αβεβαιότητες που προκύπτουν λόγω των διαφορετικών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών για

τις οποίες έχει προκύψει αυτή η εξίσωση. Στη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα προκύπτει συντελεστής στερεοαπορροής ( $SDR=0,23$ ) που συνάδει με αυτόν από τους υπολογισμούς της αντίστοιχης μελέτης ( $SDR=0,24$ ) (Ξανθάκης, 2011). Ενώ στη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα που είναι μικρότερης έκτασης ο συντελεστής ταυτίζεται με τους υπολογισμούς της αντίστοιχης μελέτης, στην λεκάνη των Κρεμαστών που είναι πολύ μεγαλύτερης έκτασης υποεκτιμάται.

Οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης  $R$  μπορεί να είναι: α) σφάλμα των καταγραφικών οργάνων στους βροχομετρικούς σταθμούς β) η αποτελεσματικότητα στην μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της κινητικής ενέργειας της βροχόπτωσης από την ένταση της γ) η διαφορετική χρονική ανάλυση της βροχόπτωσης από τους σταθμούς που επιλέγονται. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο συντελεστής  $R$  υποτιμάται όταν το χρονικό βήμα αυξάνει από 5, 10, 15, 30 έως 60 min. Η αναλυτική μέθοδος εκτίμησης της διαβρωτικότητας, ακριβώς λόγω της αυξημένης χρονικής διακριτότητας, οδηγεί σε αποτελέσματα που κατά κανόνα είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα που προκύπτουν με χρήση διάφορων εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης του  $R$  (Renard and Freimund, 1994). Η μετατροπή της ανάλυσης των 60 min, όπως έγινε και στην εν λόγω μελέτη στην Ευρώπη, σε υψηλότερη ανάλυση εισάγει ένα αρκετά μεγαλύτερο επίπεδο αβεβαιότητας. Ως συμβιβαστική λύση, χρησιμοποιείται η χρονική ανάλυση των 30 min παρόλο που οι περισσότερες μετρήσεις συναντώνται στο χρονικό βήμα των 60 min. Η μετατροπή τους πραγματοποιείται με συναρτήσεις παλινδρόμησης. Η διαδικασία αυτή εισάγει σφάλματα στο αποτέλεσμα των μετρήσεων και οδηγεί στην υποεκτίμηση του συντελεστή  $R$ . Σε σύγκριση με υπάρχουσες τιμές  $R$  από το βροχομετρικό σταθμό της Πεντέλης παρατηρείται ότι ο συντελεστής είναι κατά 2,2 φορές μεγαλύτερος, οπότε θεωρώντας σταθερές τους άλλες συντελεστές, η εδαφική απώλεια στη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα αυξάνει ανάλογα.

Ο συντελεστής διαχείρισης και κάλυψης γης  $C$ , διαμορφώνεται από τις εκάστοτε πολιτικές που εφαρμόζονται στην γεωργία αλλά και από τις χρήσεις/κάλυψης γης. Η εκτίμηση του γίνεται βάση των δεδομένων CORINE της χρονολογίας 2006. Όμως το 2009 στην λεκάνη απορροής του Μαραθώνα, άλλαξε η κάλυψη γης σε γυμνό-καμένο έδαφος στο ΝΑ τμήμα, λόγω μια πυρκαγιάς που έλαβε χώρα με αποτέλεσμα την αύξηση των φερτών υλικών. Συνεπώς υποεκτιμάται ο συντελεστής  $C$  άρα και η τιμή της εδαφικής απώλειας.

Οι αβεβαιότητες οι οποίες προκύπτουν για την εγγύτητα του συντελεστή  $P$  αφορά στους αγρότες που εφαρμόζουν την καλή γεωργική και περιβαλλοντική κατάσταση, στην έλλειψη δεδομένων για τις πρακτικές που μπορεί να εφαρμόζονται σε περιοχές οι οποίες δεν έχουν καταγραφεί στην εν λόγω μελέτη, στη διαφορετική κατασκευή των υποστηρικτικών πρακτικών ανά χώρα, στην επιλογή της μεθόδου της παρεμβολής. Οι υποστηρικτικές πρακτικές έχουν τοπική επίδραση στη μείωση του κινδύνου της εδαφικής διάβρωσης. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη εφαρμογή των μέτρων στήριξης, ειδικά στη καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών. Επίσης οι πέτρινοι τοίχοι περιορίζονται σε Ευρωπαϊκή κλίμακα και



μπορούν να συμβάλλουν περισσότερο αποτελεσματικά εάν είναι χτισμένοι σε απόκρημνες πλαγιές.

Βέβαια να αναφερθεί ότι αβεβαιότητες μπορεί να προκύψουν και στις πραγματικές μετρήσεις του όγκου των φερτών κατά τη διαδικασία της βυθομέτρησης.

## 8. Βιβλιογραφία

### Ελληνόγλωσσα

- Βαχαβιώλος Φ., 2014, Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμιευτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο--Μεταπτυχιακή Εργασία. Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”
- Παναγούλια, Δ. και Γ. Δήμου, 2002, Μηχανική των Φερτών Υλικών, Έκδοση 3η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, σσ 462.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη και Δ. Κουτσογιάννης, 2001, Τελική Έκθεση, Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 243 σελίδες, Αθήνα.
- Ζαρρής, Δ. και Ε. Λυκούδη, ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ ΣΤΟΝ ΑΝΩ ΡΟΥ ΤΟΥ Π. ΑΧΕΛΩΟΥ– <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=6064>.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, Τεχνικά Χρονικά, 7 (3), 127-154, 1987.
- Κωτούλας Δ., (2001) Υδρολογία και Υδραυλική Φυσικού Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ., Τμήμα Εκδόσεων.
- Κωτούλας Δ., (2001) Ορεινή Υδρονομική Τόμος Ι: Τα ρέοντα ύδατα , Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ., Τμήμα Εκδόσεων.
- Μισοπολινός, Ν.Δ., 1992. Γεωλογία-Πετρογραφία. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαρρίζος, Σ. & Χατζημηλιάδης, Α. Μ. 2010. Το χειμαρρικό περιβάλλον του ποταμού Σπερχειού, Διπλωματική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ορεστιάδα.
- Ξανθάκης, Μ, Κ. Παυλόπουλος, Γ. Αποστολόπουλος, Β. Καψιμάλης, Α. Γκορέγια, Π. Στεφανίδης και Χ. Μαρουκιάν, 2010, Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης φερτών υλών σε τεχνητούς ταμιευτήρες – μελέτη περίπτωσης λίμνης Μαραθώνα, Πρακτικά του 9ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Αθήνα 4-6 Νοεμβρίου 2010, σσ 133-140.
- Ξανθάκης, Μ., 2011, Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, σσ 288.

## Ξενόγλωσση

- Desmet, P.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.* 1996, 51, 427–433.
- Eurostat, 2014a. Soil cover agro-environmental indicator Accessed at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_soil\\_cover](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_soil_cover).
- Eurostat, 2014b. Tillage practices agro-environmental indicator Accessed at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_tillage\\_practices](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_tillage_practices)
- Foster, G.R., L.J Lane, J.D. Nowlin, J.M. Laflen and R.A. Young, 1981, Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas, *Transaction of the American Society of Agricultural Engineering (ASAE)*, 24(5), pp 1253-1262.
- Karydas, C.G., P. Panagos and I.Z. Gitas, 2012, A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics, *International Journal of Digital Earth*, pp 1-22, DOI:10.1080/17538947.2012.671380.
- Kinnell PIA. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review. *J Hydrol* 2010; 385:384–97.
- LUCAS, 2013. Technical Reference Document C-1. Instructions for Surveyors. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/lucas/documents/LUCAS2012\\_C1-InstructionsRevised\\_20130110a.pdf](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/lucas/documents/LUCAS2012_C1-InstructionsRevised_20130110a.pdf) (accessed November 2014).
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusbürger, K. 2016. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *Catena*, 137, pp. 161-172.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusbürger, K., van der Zanden, E.H., Poesen, J., Alewell, C., 2015. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European Scale. *Environ. Sci. Policy* 51, 23–34.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusbürger, K., Klik, A., Rousseva, S., Tadic, M.P., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. Rainfall erosivity in Europe. *Sci Total Environ.* 511 (2015), pp. 801-814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.008
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusbürger, C., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L., 2015b. Estimating the soil erosion cover management factor at European scale. *Land Use Policy J.* (in press).
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusbürger, K., Montanarella, L., Alewell, C. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5: 117-126.

Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., Alewell, C., 2014b. Soil erodibility in Europe: a high-resolution dataset based on LUCAS. *Sci. Total Environ.* 479–480 (2014), 189–200.

Renard, K.G, G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder et al., 1997, Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), US Department of Agriculture (USDA), Washington, DC, USA, Agricultural handbook 703, pp 404.

Renard, K.G. and J.R. Freimund, 1994, Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, *Journal of Hydrology*, 157, pp 287-306.

Tóth, G., Jones, A., Montanarella, L. (eds.) 2013. LUCAS Topsoil Survey. Methodology, data and results. JRC Technical Reports. Luxembourg. Publications Office of the European Union, EUR26102 – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online); ISBN 978-92-79-32542-7; doi: 10.2788/97922.

Vanoni, V.A., 1975, Sedimentation Engineering, in *Manuals and Reports on Engineering Practices*, ASCE, New York.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1965, Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation, *Agriculture Handbook 282*, U.S. Department of Agriculture (USDA), Washington DC, USA.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978, Predicting rainfall erosion losses – a guide for conservation planning, *Agriculture Handbook 537*, U.S. Department of Agriculture (USDA), Washington DC, USA.

### Διαδίκτυο

<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion>

<http://geodata.gov.gr/dataset/udatika-diamerismata-eidike-grammateia-udaton>

<http://hydroscope.gr/>