



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Εκτίμηση του Ποσοστού Εδαφικής Διάβρωσης στην ευρύτερη περιοχή των
Χανίων, με χρήση τεχνολογιών Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και
Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών**

Διπλωματική Εργασία της

Ταμπακοπούλου Ευτυχίας

A.M.: 2012050010



Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ Τσάνης Ιωάννης

Τριμελής Επιτροπή: Δρ Τσάνης Ιωάννης

Δρ Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος

Δρ Αλεξάκης Δημήτριος

Χανιά, Φεβρουάριος 2019

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περιεχόμενα | 5 |
| Ευχαριστίες | 7 |
| Κατάλογος Διαγραμμάτων..... | 8 |
| Κατάλογος Πινάκων | 8 |
| Κατάλογος Εικόνων..... | 8 |
| Περίληψη | 10 |
| Abstract..... | 11 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 12 |
| 1.1 Χωρικό μοντέλο εκτίμησης διάβρωσης RUSLE..... | 14 |
| 1.2 Μοντέλο μεταβολών χρήσεων γης Land Use Land Cover | 16 |
| 1.3 Μοντέλα κλιματικής αλλαγής..... | 17 |
| 1.4 Σκοπός εργασίας..... | 19 |
| 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ..... | 20 |
| 2.1 Περιοχή Μελέτης | 20 |
| 2.2 Δεδομένα | 22 |
| 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ | 27 |
| 3.1 Μοντέλο RUSLE..... | 29 |
| 3.1.1 Συντελεστής βροχοπτώσεων R | 30 |
| 3.1.2 Συντελεστής χρήσεων γης C..... | 33 |
| 3.1.3 Συντελεστής πρακτικών διαχείρισης P | 37 |
| 3.1.4 Συντελεστής διαβρωσιμότητας K | 37 |
| 3.1.5 Συντελεστές κλίσης LS..... | 38 |
| 3.2 Μοντέλο Land Use Land Cover | 39 |
| 3.3 Κλιματικό μοντέλο | 40 |
| 3.4 Σενάρια Ανάλυσης | 42 |
| 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 44 |
| 4.1 Φασματική Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων – Supervised Classification | 44 |
| 4.2 Μοντέλο Land Use Land Change..... | 46 |
| 4.3 Κλιματικό μοντέλο | 47 |
| 4.4 Μοντέλο RUSLE..... | 48 |
| 4.4.1 Συντελεστής R | 48 |
| 4.4.2 Συντελεστής C | 48 |
| 4.4.3 Συντελεστής P | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.4.4 Συντελεστής K | 50 |
| 4.4.5 Συντελεστής LS..... | 52 |
| 4.4.6 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2018 | 53 |
| 4.4.7 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Κίτρινο Σενάριο) | 54 |
| 4.4.8 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Πράσινο Σενάριο) | 55 |
| 4.4.9 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Μοβ Σενάριο) | 56 |
| 4.4.10 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE – Λεκάνη Ακρωτηρίου, ΚΗ..... | 57 |
| 4.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα μοντέλων LULC και RUSLE | 58 |
| 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ..... | 60 |
| 5.1 Μοντέλο Land Use Land Cover | 60 |
| 5.1.1 Ακρωτήριο..... | 60 |
| 5.1.2 Βρύσες..... | 61 |
| 5.1.3 Δελιανά | 62 |
| 5.1.4 Κερίτης | 62 |
| 5.1.5 Συνολική Περιοχή Μελέτης | 63 |
| 5.2 Μοντέλο RUSLE..... | 65 |
| 5.2.1 Ακρωτήριο..... | 65 |
| 5.2.2 Βρύσες..... | 68 |
| 5.2.3 Δελιανά | 69 |
| 5.2.4 Κερίτης | 69 |
| 5.3 Τελικά Συμπεράσματα | 71 |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 73 |
| 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ | 75 |
| 7.1 Διάγραμμα Ροής για το 2018 | |
| 7.2 Διάγραμμα Ροής – Κίτρινο Σενάριο | 75 |
| 7.3 Διάγραμμα Ροής – Μοβ Σενάριο | 76 |
| 7.4 Διάγραμμα Ροής – Πράσινο Σενάριο | 76 |
| 7.5 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – 2018 | 77 |
| 7.6 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Κίτρινο Σενάριο | 77 |
| 7.7 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Μοβ Σενάριο | 77 |
| 7.8 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Πράσινο Σενάριο | 78 |
| 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 79 |

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στα πλαίσια της, εξετάζεται το φαινόμενο της εδαφικής διάβρωσης στην περιοχή της δυτικής Κρήτης.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ Τσάνη Ιωάννη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη για την πραγματοποίησή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ Αλεξάκη Ιωάννη για τις γνώσεις, τη συνεχή στήριξη και βοήθεια που μου προσέφερε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς και για το θερμό και ευχάριστο κλίμα που επικράτησε στη συνεργασία μας.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στον Δρ Κωνσταντίνο Χρυσικόπουλο, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για την παρουσία του και το χρόνο που διέθεσε για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδερφό μου για τη συνεχή στήριξη τους, καθώς χωρίς αυτούς δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση των σπουδών μου.

Κατάλογος Διαγραμμάτων

| | |
|--|----|
| Διάγραμμα 1 - Σενάρια RCP (Knutti και Sedlacek, 2012)..... | 18 |
| Διάγραμμα 2 - Διάγραμμα Ροής..... | 28 |
| Διάγραμμα 3 - Ακρωτήριο LULC..... | 60 |
| Διάγραμμα 4 - Βρύσες LULC | 61 |
| Διάγραμμα 5 - Δελιανά LULC | 62 |
| Διάγραμμα 6 - Κερίτης LULC | 62 |
| Διάγραμμα 7 - Περιοχή Μελέτης LULC..... | 63 |
| Διάγραμμα 8 - Κλίση ανά χρήση γης | 64 |
| Διάγραμμα 9 - Ακρωτήριο '18 RUSLE με Κ, ΚΗ | 65 |
| Διάγραμμα 10 - Ακρωτήριο '50 RUSLE..... | 66 |
| Διάγραμμα 11 - Ακρωτήριο RUSLE, Κ | 67 |
| Διάγραμμα 12 - Ακρωτήριο RUSLE, ΚΗ..... | 67 |
| Διάγραμμα 13 - Βρύσες RUSLE | 68 |
| Διάγραμμα 14 - Δελιανά RUSLE..... | 69 |
| Διάγραμμα 15 - Κερίτης RUSLE..... | 69 |
| Διάγραμμα 16 - Περιοχή Μελέτης RUSLE..... | 70 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1 - Μορφολογικά Χαρακτηριστικά Δελιανών, Κερίτη, Ακρωτηρίου και Βρυσών..... | 20 |
| Πίνακας 2 - Κατηγορίες CLC..... | 23 |
| Πίνακας 3 - Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Εικόνων | 23 |
| Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Δεκτών | 24 |
| Πίνακας 5 - Παράγοντας R | 32 |
| Πίνακας 6 - Αξιολόγηση Ακρίβειας Μεθόδων Κατηγοριοποίησης | 36 |
| Πίνακας 7 - Κατηγορίες Ομαδοποίησης και τιμές C..... | 36 |
| Πίνακας 8 - Παράγοντας R50..... | 41 |
| Πίνακας 9 - RUSLE 2018, Μέσες Εδαφικές Απώλειες..... | 53 |
| Πίνακας 10 - RUSLE 2050 (Κίτρινο), Μέσες Εδαφικές Απώλειες..... | 54 |
| Πίνακας 11 - RUSLE 2050 (Πράσινο), Μέσες Εδαφικές Απώλειες..... | 55 |
| Πίνακας 12 - RUSLE 2050 (Μοβ), Μέσες Εδαφικές Απώλειες..... | 56 |
| Πίνακας 13 - RUSLE ΚΗ, Λεκάνη Ακρωτηρίου, Μέσες Εδαφικές Απώλειες | 57 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1 - Χάρτης Μεσογείου, Τοποθεσία Περιοχής Μελέτης..... | 20 |
| Εικόνα 2 - Σημεία Δειγματοληψίας | 22 |
| Εικόνα 3 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 1998..... | 24 |
| Εικόνα 4 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 2008..... | 25 |
| Εικόνα 5 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 2018..... | 25 |
| Εικόνα 6 - Χρήσεις Γης 1998 | 44 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 7 - Χρήσεις Γης 2008 | 45 |
| Εικόνα 8 - Χρήσεις Γης 2018 | 45 |
| Εικόνα 9 - Πιθανοτικός Χάρτης Χρήσεων Γης 2050..... | 46 |
| Εικόνα 10 - Συντελεστής R50 | 47 |
| Εικόνα 11 - Συντελεστής R | 48 |
| Εικόνα 12 - Συντελεστής C 2018 | 49 |
| Εικόνα 13 - Συντελεστής C 2050 | 49 |
| Εικόνα 14 - Συντελεστής P | 50 |
| Εικόνα 15 - Συντελεστής K, Συνολική Περιοχή Μελέτης | 51 |
| Εικόνα 16 - Συντελεστής KH, Λεκάνη Ακρωτηρίου | 51 |
| Εικόνα 17 - Συντελεστής LS..... | 52 |
| Εικόνα 18 - RUSLE 2018 | 53 |
| Εικόνα 19 - RUSLE 2050 - Κίτρινο Σενάριο..... | 54 |
| Εικόνα 20 - RUSLE 2050 - Πράσινο Σενάριο..... | 55 |
| Εικόνα 21 - RUSLE 2050 - Μοβ Σενάριο | 56 |
| Εικόνα 22 - RUSLE, Ακρωτήρι με KH | 57 |
| Εικόνα 23 - Αφαίρεση χάρτη, RUSLE 2050-RUSLE 2018 | 71 |

Περίληψη

Το φαινόμενο της εδαφικής διάβρωσης στην περιοχή της Μεσογείου αυξάνεται εντατικά τα τελευταία χρόνια. Η Κρήτη αποτελεί τυπική μεσογειακή περιοχή που έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο αισθητά την τελευταία δεκαετία. Η επίγνωση της παρούσας κατάστασης καθώς και η πρόβλεψη της εξέλιξης της επιταχυνόμενης εδαφικής διάβρωσης είναι σημαντική για τη διαχείριση του φαινομένου και των επιπτώσεων που επιφέρει άμεσα και έμμεσα στο περιβάλλον και την οικονομία. Στην παρούσα εργασία μελετάται ο κίνδυνος διάβρωσης του εδάφους σε τέσσερις υδρολογικές λεκάνες της δυτικής Κρήτης και συγκεκριμένα του Ακρωτηρίου, των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη, μέσω του μοντέλου RUSLE, και εκτιμάται η πιθανότητα κινδύνου διάβρωσης στην περιοχή για το 2050, με χρήση πιθανοτικού μοντέλου χρήσεων γης (LULC) και βροχοπτώσεων (RCM). Το μοντέλο RUSLE εξετάζει το φαινόμενο μέσω πέντε βασικών παραγόντων που αφορούν τις βροχοπτώσεις, τις χρήσεις γης, τη μορφολογία, τη γεωμορφολογία και τις πρακτικές προστασίας και διαχείρισης που εφαρμόζονται για την πρόληψη του φαινομένου. Ο παράγοντας των βροχοπτώσεων υπολογίστηκε από ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα σταθμών πλησίον και εσωτερικά της περιοχής μελέτης, ο παράγοντας χρήσεων γης εξάχθηκε με χρήση τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, ο μορφολογικός παράγοντας μέσω ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου, ο παράγοντας που αφορά τις πρακτικές προστασίας των εδαφών με οπτική παρατήρηση των εικόνων του Google Earth, ενώ ο συντελεστής που αφορά τη διαπερατότητα του εδάφους εξετάστηκε μέσω της βιβλιογραφίας αλλά και μέσω δειγματοληψίας και ανάλυσης εδάφους που πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο. Από την εκπόνηση της εργασίας αποδεικνύεται (α) η τάση για διάβρωση της περιοχής και προβλέπεται αύξηση των απωλειών εδάφους, (β) μαζί με την προβλεπόμενη μεταβολή των κατακριμνήσεων, όπως υπολογίζεται από το κλιματικό μοντέλο, και (γ) η τάση προς αύξηση- επέκταση κυρίως των αστικών περιοχών, όσο αφορά το χωροταξικό μοντέλο.

Abstract

Soil erosion is a phenomenon on the rise that apart from soil affects ground water and the air and has multiple environmental and economical consequences. Greenhouse gases production has been increasing rapidly the past few decades, resulting in global warming and many environmental issues. The climate is changing, temperatures and weather conditions intensity are increasing, leading to accelerated soil erosion in prone locations. Urbanization and overexploitation of the land is also characteristic of our time, resulting in a constant transformation of the landscape and its uses. In this study, soil erosion is examined using basic variables that are involved, that concern weather conditions, morphological and geomorphological data and the uses and manipulation of the land, through the RUSLE model. The study area is located at the north-western part of Crete, an island which is particularly prone to soil erosion because of its morphological and meteorological characteristics. The assessment of the phenomenon in the study area is combined with examining its correlation and differentiation regarding land uses and the climatic conditions through different scenarios. Using remote sensing techniques, satellite images of the area were spatially categorized and then were used to analyze the uses and changes that have taken place in the last two decades, but also to produce a potential spatial distribution map of the land in the future, based on Markov analysis. Corrected rain fall data were used to create a future potential rainfall data profile. The combinations of the processed data produced the different RUSLE scenarios that are finally put into comparison. With an increase in rainfall amount and intensity and constant landscape use changes, soil erosion is expected to increase in the next few decades in the study area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάβρωση των εδαφών είναι η φυσική διεργασία κατά την οποία αποκολλείται, μεταφέρεται και μετατοπίζεται έδαφος από την επιφάνεια, μέσω κυρίως του νερού και του αέρα, στην ανώτερη και στην υπόγεια, χερσαία και υδάτινη επιφάνεια. Η διάβρωση αποτελεί μία από τις πιο κοινές μορφές υποβάθμισης του εδάφους, κατά την οποία πλήτεται κυρίως το ανώτερο εδαφικό στρώμα, επιφέροντας διάφορες επιπτώσεις σε όλο το περιβαλλοντικό σύστημα, καθώς επηρεάζει τα υπόγεια ύδατα και τον αέρα. Η προδιάθεση μίας περιοχής για διάβρωση και η ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο εξαρτάται κυρίως από την κλίση του εδάφους και από τις βροχοπτώσεις, τους ανέμους και τα λοιπά έντονα καιρικά φαινόμενα. Περιοχές με έντονη κλίση παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα διάβρωσης καθώς ευνοείται η κίνηση του εδάφους από τα υψηλότερα στα χαμηλότερα ύψη. Έντονα και διαρκή καιρικά φαινόμενα συμβάλλουν καθοριστικά στη διάβρωση, καθώς άνεμος, βροχές και υδάτινοι φορείς παρασέρνουν κομμάτια εδάφους και τα μετατοπίζουν στην επιφάνεια ή στο υπόγειο σύστημα. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και η θερμοκρασία είναι επίσης παράμετροι που συντελούν στην εμφάνιση του φαινομένου της διάβρωσης καθώς επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και τη συμπεριφορά του εδάφους. Οι χρήσεις και η διαχείριση της γης είναι βασικές μεταβλητές στην εξέλιξη της διάβρωσης. Περιοχές με πλούσια βλάστηση, καλλιεργήσιμες εκτάσεις αλλά και περιοχές στις οποίες λαμβάνονται μέτρα προστασίας, είναι λιγότερο ευαίσθητες στο φαινόμενο αυτό, ενώ αντίστοιχα περιοχές χωρίς βλάστηση επηρεάζονται περισσότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες και τα έντονα καιρικά φαινόμενα. Το φαινόμενο της διάβρωσης, εκτός από το έδαφος, επηρεάζει και την ποιότητα του νερού καθώς με τις εδαφικές μάζες μετατοπίζονται θρεπτικά στοιχεία, εντομοκτόνα από τις καλλιέργειες αλλά και άλλες χημικές ουσίες που μπορεί να υπάρχουν στο έδαφος. Κατά αυτό τον τρόπο, φορτίζεται ο υδροφόρος ορίζοντας και υποβαθμίζεται η ποιότητα των υδάτων. Ο αέρας είναι επίσης ένα στοιχείο που επηρεάζεται, λόγω των διάφορων αέριων που εκλύονται από το διαβρωμένο έδαφος, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και τα οξείδια αζώτου (N_xO) (Lal 2001, Boyle 2002).

Η διάβρωση είναι μια απόλυτα φυσική διεργασία που λαμβάνει χώρα σε όλα τα εδάφη, μπορεί να επιταχυνθεί όμως σε ευνοϊκές για τη διάβρωση συνθήκες (κλιματικές και ατμοσφαιρικές) και λόγω άμεσων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που δεν είναι περιβαλλοντικά βιώσιμες. Η ραγδαία αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα, τα επίπεδα του οποίου έχουν σχεδόν διπλασιαστεί τα τελευταία 50 χρόνια, αλλά και άλλων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, καθιστούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου εντονότερο, δηλαδή αυξάνεται η ακτινοβολία που εγκλωβίζεται στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία του πλανήτη αυξάνεται, καθώς και η διάρκεια και η ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, οι βροχοπτώσεις σε κάποιες περιοχές μειώνονται, το νερό στους ωκεανούς διαστέλλεται και οι πάγοι στους πόλους λιώνουν ταχύτερα, πράγμα που προκαλεί σταδιακά την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Φυσικά το φαινόμενο είναι

εξαιρετικά πιο περίπλοκο και οι εκφάνσεις του πολλαπλές και αλληλοεξαρτώμενες. Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των αλλαγών αυτών στο κλίμα και τις μετεωρολογικές συνθήκες, με ήπια αλλά και πιο δυσμενή σενάρια. Οι συνθήκες και οι βλέψεις αυτές σε συνδυασμό με την κακή περιβαλλοντική διαχείριση και τις δυσμενείς ανθρωπογενείς δραστηριότητες οδηγούν σε πλήθος επιπτώσεων εις βάρος του περιβάλλοντος, της οικονομίας, της κοινωνίας και της δημόσιας υγείας. Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να ευνοήσει την επιταχυμένη διάβρωση των εδαφών, επιδρώντας αρνητικά στις μεταβλητές που την επηρεάζουν, όπως η ένταση, το ύψος βροχοπτώσεων και οι αυξημένες θερμοκρασίες. Ακόμα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ και οι μεγάλες θερμοκρασίες επηρεάζουν την υγρασία του εδάφους, αλλά και τη γονιμοποίηση και ανάπτυξη των φυτών. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που είναι και κύρια πηγή της επιδείνωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής, συμβάλλουν έμμεσα και άμεσα στην επιταχυμένη διάβρωση των εδαφών. Η εκτεταμένη αστικοποίηση είναι μια παγκόσμια τάση που έχει αυξηθεί σημαντικά τον 21ο αιώνα και ενεργεί ως σημαντικός παράγοντας στην αλλαγή της δομής και των λειτουργιών του τοπίου (Antrop 2004, Banerjee και Srivastava 2013), καθώς και στα επίπεδα ρύπανσης όλου του περιβαλλοντικού συστήματος. Η υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων, οι εκτεταμένες κατασκευές και οι καλλιέργειες είναι κάποιες από τις δραστηριότητες που επηρεάζουν αρνητικά τις εδαφικές επιφάνειες και οδηγούν στην υποβάθμιση του εδάφους. Ο αγροτικός τομέας, επηρεάζει αλλά και επηρεάζεται άμεσα από τη διάβρωση και αυτά που συνεπάγεται το φαινόμενο, αφού οι επιφάνειες εδάφους που καλλιεργούνται έχουν μεγαλύτερη τάση για διάβρωση από επιφάνειες με φυσική βλάστηση (Brown 1984) και αντίστοιχα αυτό που πλήγεται κυρίως είναι το ανώτερο, καλλιεργήσιμο εδαφικό στρώμα και τα ύδατα που πιθανόν να χρησιμοποιούνται για άρδευση. Οι άνθρωποι έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον της γης μεταβάλλοντας τις χρήσεις γης και τις εδαφικές καλύψεις. Οι αλλαγές αυτές, συνήθως ξεκινούν από ανθρωπογενή δραστηριότητα και ακολουθούνται από φυσικές διεργασίες (Niemela et al., 2000). Όπως έχει φανεί και από σχετικές μελέτες, οι χρήσεις γης επηρεάζουν σημαντικά την εδαφική διάβρωση (Kosmas et al., 1997, Gysels et al., 2005), κομμάτι που θα μελετηθεί εκτενώς στη παρούσα εργασία.

Το πρόβλημα της εδαφικής διάβρωσης αποτυπώνεται σε παγκόσμιο επίπεδο με διαφορετική ένταση. Η Ευρώπη, ιδιαίτερα η νοτιότερη περιοχή της και η Μεσόγειος, έχει μεγάλη τάση για διάβρωση λόγω του κλίματος, που περιλαμβάνει μακριές ξηρές περιόδους ακολουθούμενες από έντονες βροχοπτώσεις, αλλά και της μορφολογίας, που παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο με πολλές αυξομειώσεις στο υψόμετρο και την κλίση, ανά την επιφάνεια της (Onori et al. 2006). Σε κάποιες περιοχές της Μεσογείου η διάβρωση έχει φτάσει σε μη αναστρέψιμο σημείο, αφού με δεδομένο τον αργό ρυθμό σχηματισμού του εδάφους, απώλειες μεγαλύτερες του 1 tn/he γ⁻¹, μπορούν να θεωρηθούν μη αναστρέψιμες εντός χρονικού διαστήματος 50-100 ετών (Kouli et al. 2008). Στην Ελλάδα, το φαινόμενο της διάβρωσης του εδάφους επηρεάζει 3,5 εκατομμύρια εκτάρια, δηλαδή το 26,5% της συνολικής έκτασης της χώρας (Mitsios et al., 1995).

Η διάβρωση των εδαφών είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζει δυσκολία στη μέτρηση του, ειδικά σε μεγάλη κλίμακα. Οι κύριες μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται είναι ετερογενείς και σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα είναι συχνά ελλιπή. Τα χωροχρονικά μοντέλα αποτελούν εύχρηστα εργαλεία για την εκτίμηση της έκτασης του φαινομένου αλλά και την πρόβλεψη της πιθανής εξέλιξης του. Η δημιουργία και χρήση μοντέλων είναι ουσιαστική για την αναγνώριση, την ανάλυση και την λήψη αποτελεσματικών μέτρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Γενικά, τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες (Merritt et al., 2003, Volk et al., 2010): α) με βάση τη φυσική, όπου η λύση βασίζεται σε θεμελιώδεις φυσικές εξισώσεις, (β) εμπειρικά ή στατιστικά μοντέλα, όπου η λύση βασίζεται σε παρατηρούμενες ή στοχαστικές σχέσεις μεταξύ των υπό μελέτη παραμέτρων και της παραγωγής του μοντέλου και (γ) εννοιολογικά μοντέλα, όπου η προσομοίωση περιλαμβάνει μια γενική και συνολική περιγραφή των διαδικασιών συλλογής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι συγκεκριμένες λεπτομέρειες των αλληλεπιδράσεων διεργασίας (Kourgialas et al., 2016). Οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης διάβρωσης εδάφους μπορούν επίσης να διαιρεθούν σε ποιοτικές ή ποσοτικές μεθόδους. Οι ποιοτικές μέθοδοι υποδηλώνουν την ένταση του κινδύνου διάβρωσης του εδάφους, ενώ ποσοτικές μέθοδοι υπολογίζουν τις ποσότητες και τα ποσοστά των απωλειών του εδάφους μέσω μοντέλων που ενσωματώνουν τεχνικές τηλεσκοπικής και GIS, για τη δημιουργία χαρτών κινδύνου διάβρωσης του εδάφους (Kourgialas et al., 2016).

Η Κρήτη, είναι ένα τυπικό δείγμα περιοχής της Μεσογείου, με έντονο παρατηρούμενο πρόβλημα εδαφικής διάβρωσης την τελευταία δεκαετία. Το κλίμα είναι εύκρατο Μεσογειακό και οι συνθήκες κυμαίνονται από σχετικά κρύους, υγρούς χειμώνες σε θερμά, ξηρά καλοκαίρια. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τέσσερις υδρολογικές λεκάνες, τα Δελιανά, τον Κερίτη, το Ακρωτήρι και τις Βρύσες, συνολικής έκτασης 487,7 km². Η περίοδος βροχοπτώσεων περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε 6 μήνες, που ακολουθείται από μια μεγάλη περίοδο ξηρασίας, δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για το φαινόμενο της διάβρωσης.

1.1 Χωρικό μοντέλο εκτίμησης διάβρωσης RUSLE

Η διεθνής βιβλιογραφία περιέχει διάφορες προσεγγίσεις και εξισώσεις αξιολόγησης κινδύνου ή πρόβλεψης για τη διάβρωση του εδάφους. Μια από τις πιο διαδεδομένες, είναι η μέθοδος RUSLE (Revised Soil Loss Equation). Αρχικά, οι Wischmeier και Smith το 1965 συλλέγοντας στοιχεία για τη διάβρωση εδάφους σε 21 πολιτείες των ΗΠΑ, ανέλυσαν και αξιολόγησαν διάφορους κυρίαρχους παράγοντες που συντελούν στη διάβρωση του εδάφους και εισήγαγαν την καθολική εξίσωση απώλειας εδάφους, USLE. Η εξίσωση USLE, προβλέπει τον μακροπρόθεσμο μέσο ετήσιο ρυθμό διάβρωσης στο κεκλιμένο πεδίο, βασισμένη σε βροχομετρικά δεδομένα, τον τύπο εδάφους, την τοπογραφία, το σύστημα καλλιέργειας και τις πρακτικές διαχείρισης. Συμπεριλαμβάνοντας και ενσωματώνοντας πρόσθετα ερευνητικά δεδομένα και αποτελέσματα, η εξίσωση USLE βελτιώθηκε και η αναθεωρημένη έκδοση του μοντέλου αποτελεί την εξίσωση RUSLE (Renard et al., 1997). Η αναθεωρημένη αυτή έκδοση, ενίσχυσε περαιτέρω την ικανότητά της να προβλέψει τη

διάβρωση με την ενσωμάτωση νέων πληροφοριών διαθέσιμων μέσω έρευνας των τελευταίων χρόνων. Το μοντέλο RUSLE, σε συνδυασμό με το περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών / GIS και τις τεχνολογίες τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), παρέχουν ένα εύχρηστο μηχανογραφικό και υπολογιστικό περιβάλλον, με τα κατάλληλα εργαλεία, για την επεξεργασία των διαφορετικών δεδομένων και πληροφοριών και τελικά τον υπολογισμό του αποτελέσματος. Το μηχανογραφικό σύστημα του GIS, διευκολύνει την εισαγωγή, την ανάλυση και την παρουσίαση των δεδομένων, ειδικά των γεωγραφικά αναφερόμενων (georeferenced) δεδομένων και παρέχει χρήσιμα και εύχρηστα εργαλεία για τις μετατροπές και τους υπολογισμούς τους. Η τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη της δημιουργίας και σύνθεσης δεδομένων, με την ανίχνευση και την καταγραφή πληροφοριών όπως της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας, και η επεξεργασία, ανάλυση και εφαρμογή αυτών των πληροφοριών της επιφάνειας της Γης. Η χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης, είναι ένας σχεδόν άμεσος, πρακτικός και αποδοτικός τρόπος για την έγκαιρη επισκόπηση της επιφάνειας της Γης, για αυτό και αποτελεί κύριο κομμάτι των δεδομένων επεξεργασίας και υπολογισμού στο GIS του μοντέλου RUSLE, και πολλών άλλων διαδικασιών. Το μοντέλο RUSLE, επιτρέπει την πρόβλεψη του μέσου ρυθμού διάβρωσης για την περιοχή μελέτης, για οποιοδήποτε σενάριο. Εκφράζεται μέσω εξίσωσης η οποία δίνει ως αποτέλεσμα τη μέση χωρική απώλεια εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας ανά έτος [$t\text{h} / (\text{ha year})$] και υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό πέντε βασικών συντελεστών, R , C , L , S , K και P , που σχετίζονται με τις βροχοπτώσεις, τις χρήσεις γης, το μήκος και το βάθος κλίσης, τη διαπερατότητα και τις πρακτικές διατήρησης και προστασίας του εδάφους, αντίστοιχα. Η εξίσωση έχει τη μορφή που βλέπουμε στην εξίσωση 1.

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

Όπου:

- A η υπολογιζόμενη μέση χωρική απώλεια εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας [$t\text{h} / (\text{ha year})$]
- R ο συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης-απόρριψης [$\text{MJ mm} / (\text{ha h year})$]
- K ο συντελεστής διαπερατότητας [$t\text{h ha h} / (\text{ha MJ mm})$]
- L ο παράγοντας μήκους κλίσης (αδιάστατος)
- S ο παράγοντας απότομης κλίσης (αδιάστατος)
- C ο συντελεστής διαχείρισης γης (αδιάστατος)
- P ο συντελεστής πρακτικής της συντήρησης (αδιάστατος)

Οι παράγοντες αυτοί απαντώνται στο μοντέλο με τη μορφή επιφανειών ψηφιδωτών αρχείων (raster). Τα ψηφιδωτά αρχεία (rasters) αποτελούν μια παράσταση από εικονοστοιχεία (pixels) που εκφράζουν τα χαρακτηριστικά του κάθε σημείου στο χάρτη και προσφέρουν αναλυτικές δυνατότητες για συνεχή δεδομένα και γρήγορη πρόσβαση και επεξεργασία των λειτουργιών επικάλυψης του χάρτη (επίπεδα) (Fernandez et al. 2003).

Στην εξίσωση RUSLE, οι παράγοντες που μεταβάλλονται με ταχύτερο ρυθμό και χαρακτηρίζονται από πιο έντονες αλλαγές σε σχέση με τους υπόλοιπους, οι οποίοι καθορίζουν και σε μεγάλο βαθμό τις μεταβολές του αποτελέσματος της εξίσωσης ανά τα χρόνια, είναι ο συντελεστής χρήσεων γης C και ο συντελεστής διαβρωτικότητας βροχοπτώσης R. Στη παρούσα μελέτη, οι παράγοντες αυτοί καθώς και ο βαθμός επιρροής αυτών στην εξίσωση RUSLE, ερευνήθηκαν περαιτέρω, σύμφωνα με τη χρήση και την εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων και δεδομένων σε χωροταξικά και κλιματικά μοντέλα, δίνοντας τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων της εξίσωσης RUSLE για πιθανοτικά μελλοντικά σενάρια.

1.2 Μοντέλο μεταβολών χρήσεων γης Land Use Land Cover

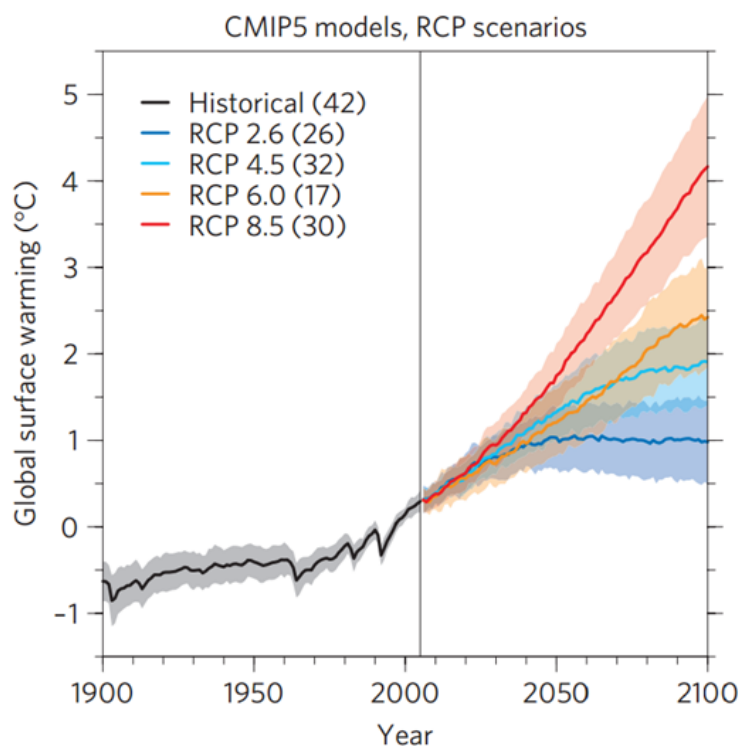
Το μοντέλο LULC (Land Use Land Cover), προβλέπει σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους την εξέλιξη των χρήσεων γης μιας περιοχής. Τα μοντέλα LULC χρησιμοποιούνται συνήθως για να εκτιμηθεί το αντίκτυπο των αλλαγών αλλά και η ανίχνευση της θέσης τους στο τοπίο και να αναπτυχθούν μελλοντικά σενάρια (Behera et al., 2012). Για τον προσδιορισμό των παραγόντων των αλλαγών, χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα για τις χρήσεις γης, στην οποία αξιολογούνται οι μετασχηματισμοί ανα περιόδους και η μεταβατική τάση που ανιχνεύεται, ενσωματώνεται σε περιβαλλοντικές μεταβλητές που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση μελλοντικών σεναρίων (Behera et al., 2012, Yagoub et al., 2014). Η πρόβλεψη αλλαγών LULC είναι σημαντική για να κατανοήσουμε και να επισημάνουμε τις πιθανές τροποποιήσεις και αλλαγές που μπορεί να συμβούν στο τοπίο στο μέλλον, παρέχοντας πλεονεκτήματα σε διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο πολεοδομικός σχεδιασμός καθώς και η επιλογή περιοχών προτεραιότητας προστασίας και διατήρησης. Στη παρούσα μελέτη, η ανάλυση των LULC έγινε με τη χρήση του μοντέλου αλυσίδας Markov. Η ανάλυση της αλυσίδας Markov βασίζεται στην υπόθεση ότι η πιθανότητα ενός συστήματος να είναι σε μια συγκεκριμένη κατάσταση σε συγκεκριμένο χρόνο, μπορεί να προσδιοριστεί εάν είναι γνωστή η προηγούμενη κατάσταση του. Η συνήθης στατιστική πρόβλεψη ενός φυσικού φαινομένου ή μιας κατάστασης στο χρόνο και στον χώρο, βασίζεται σε όσο το δυνατόν περισσότερες προηγούμενες καταστάσεις του φαινομένου σε βάθος χρόνου. Η Μαρκοβιανή διαδικασία αποτελεί μία ειδική περίπτωση στοχαστικών διαδικασιών, σύμφωνα με την οποία, η παρούσα κατάσταση μίας στοχαστικής διαδικασίας δεν εξαρτάται παρά μόνο από την κατάσταση της αμέσως χρονικά προηγούμενης διαδικασίας. Για την εκτίμηση των μεταβολών από κάποια κλάση κάλυψης γης σε κάποια άλλη με τη μέθοδο Markov, χρησιμοποιείται ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης (probability transition matrix), ο οποίος υπολογίζει για κάθε κάλυψη γης την πιθανότητα ύπαρξής της μετά από καθορισμένο αριθμό χρονικών μονάδων. Ο πίνακας αυτός είναι τετραγωνικός με διάσταση όσες και οι καλύψεις γης και υπολογίζει για κάθε κάλυψη γης την πιθανότητα ύπαρξής της μετά από καθορισμένο αριθμό χρονικών μονάδων. Ο probability transition matrix, χρησιμοποιείται ως είσοδος στην εφαρμογή των

κυτταρικών αυτόματων (Cellular Automata Markov ή CA_Markov) στην συνέχεια, για να προσδώσει στη μέθοδο Markov χωρική ομογένεια. Η έξοδος της εφαρμογής CA_Markov, δημιουργεί μία πιθανοτική εικόνα για κάθε κάλυψη γης που υπάρχει στην προγενέστερη και τη μεταγενέστερη εικόνα που έχουν χρησιμοποιηθεί. Η τελική πιθανοτική εικόνα-αποτέλεσμα της εφαρμογής προσδίδει σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας την πιθανότητα να ανήκει στη συγκεκριμένη κάλυψη γης που εκφράζει η εικόνα αυτή (Perakis, 2011). Η πρόβλεψη μοντέλου αλλαγών LULC παρέχει πλεονεκτήματα σε διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο πολεοδομικός σχεδιασμός καθώς και η επιλογή περιοχών προτεραιότητας προστασίας και διατήρησης. Στη παρούσα μελέτη η εφαρμογή του μοντέλου LULC, Markov και CA_Markov έγινε σε περιβάλλον IDRISI TerrSet 18.31. Αρχικά, οι διαδικασίες για την εξαγωγή της πιθανοτικής εικόνας για τις χρήσεις γης, εφαρμόστηκαν με είσοδο τις ομαδοποιημένες εικόνες χρήσεων γης του 1998 και 2008, για την εξαγωγή πιθανοτικής εικόνας του 2018. Τα αποτελέσματα αποδείχθηκαν καλά σύμφωνα με τη διασταύρωση της πιθανοτικής με την πραγματική ομαδοποιημένη εικόνα του 2018 και η διαδικασία εφαρμόστηκε με είσοδο τις εικόνες του 2008 και 2018, για την εξαγωγή της πιθανοτικής εικόνας χρήσεων γης του 2050.

1.3 Μοντέλα κλιματικής αλλαγής

Όσο αφορά το κλίμα, για τον σχηματισμό πιθανοτικού μελλοντικού σεναρίου σε εφαρμογή της εξίσωσης RUSLE, χρησιμοποιήθηκε ανεπτυγμένο κλιματικό μοντέλο (RCP 4.5). Τα κλιματικά μοντέλα παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα και χρήσεις, καθώς η πιθανοτική πρόβλεψη αποτελεί χρήσιμη πληροφορία για την έρευνα και την εφαρμογή άλλων περιβαλλοντικών μοντέλων καθώς και για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την εξέλιξη του κλίματος και την κλιματική αλλαγή. Ενώ τα κλιματικά μοντέλα που συνθέτονται με την πάροδο των χρόνων εξελίσσουν με νέες βελτιώσεις τη φυσική αναπαράσταση του κλιματικού συστήματος (Koutroulis et al., 2016b), οι μοντελοποιημένες μεταβλητές συνήθως περιέχουν αποκλίσεις σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ιστορικά κλιματολογικά δεδομένα και χρήζουν βελτίωσης για να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε μοντέλα αντίκτυπου (Christensen et al., 2008, Haerter et al., 2011). Στην περίπτωση μελετών επιπτώσεων της υδρολογικής κλιματικής αλλαγής, έχει βρεθεί ότι η χρήση πρωτογενών δεδομένων κλιματικών μοντέλων μπορεί να αποφέρει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα (Hansen et al., 2006, Harding et al., 2014.). Συνδυάζοντας τη δόμηση και την εφαρμογή ενός κλιματικού μοντέλου με τη διασταύρωση των πιθανοτικών αποτελεσμάτων με τα πραγματικά δεδομένα, μπορούν να λάβουν χώρα διορθώσεις στο μοντέλο, ώστε να προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Τα κλιματικά μοντέλα βασίζονται στα RCPs (Representative Concentration Pathways – RCPs), τα οποία είναι σενάρια που στηρίζονται στο αντίκτυπο κλιματικού εξαναγκασμού λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας (radiative forcings – σε $\Delta W/m^2$) και εκφράζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αερίων θερμοκηπίου με τον χρόνο. Διακρίνονται τέσσερα βασικά RCPs, που πήραν τα ονόματά τους από την διαφορά στην μέση δρώσα ακτινοβολία που θα έχουν επιτύχει έως το 2100.

Τα σενάρια είναι τα RCP 2.6, 4.5, 6.0 και 8.5 (με 2.6 W/m², 4.5 W/m², 6.0 W/m² και 8.5 W/m² η αύξηση στην μέση παγκόσμια ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους αντίστοιχα). Στη παρούσα μελέτη το μοντέλο RCM, βασίστηκε σε αντιπροσωπευτικές πορείες (μονοπάτια) για τις μελλοντικές συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων (Representative Concentration Pathways – RCPs) (Moss et al., 2008; 2010). Τα RCPs είναι σενάρια που στηρίζονται στο αντίκτυπο κλιματικού εξαναγκασμού λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας (radiative forcings – σε ΔW/m²) και εκφράζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αερίων θερμοκηπίου με τον χρόνο. Στην παρούσα μελέτη λήφθηκε υπόψη το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, ένα μέσο σενάριο, το οποίο ουσιαστικά προβλέπει ότι οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου θα αγγίξουν τη μέγιστη τιμή τους το 2040. Στο διάγραμμα 1 αναπαρίστανται γραφικά τα τέσσερα αυτά σενάρια RCP.



Διάγραμμα 1 - Σενάρια RCP (Knutti και Sedlacek, 2012)

Τα RCPs υποδεικνύουν αλλαγή στην μέση παγκόσμια θερμοκρασία (και εύρος μίας τυπικής απόκλισης στις σκιαγραφημένες περιοχές) και αβεβαιότητα για τον 20ο και 21ο αιώνα, σχετικά με την περίοδο 1986-2005. Στις παρενθέσεις δίδονται ο αριθμός των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCMs) που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό.

1.4 Σκοπός εργασίας

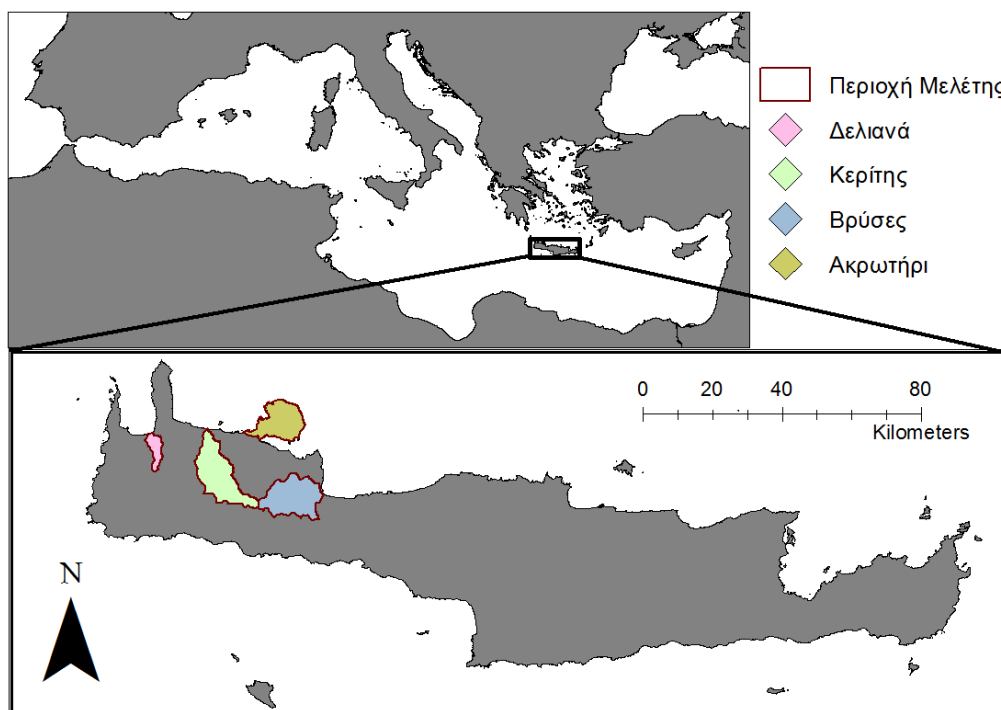
Συνδυάζοντας την εξίσωση RUSLE, με το μοντέλο χρήσεων γης LULC και το κλιματικό μοντέλο RCM, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων που αφορούν την πιθανοτική εξέλιξη των χρήσεων γης και των κλιματικών συνθηκών και πως αυτά επηρεάζουν τον κίνδυνο διάβρωσης μιας περιοχής. Τα αποτελέσματα μπορούν να φανούν χρήσιμα σε πολλές εφαρμογές περιβαλλοντικές ή μη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιώντας την πιθανοτική εικόνα χρήσεων γης για το έτος 2050, που εξάχθηκε από τη διαδικασία LULC με τη χρήση του μοντέλου Markon και ca_Markon, και τα δεδομένα του RCM, έγινε δυνατή η εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης, της περιοχής μελέτης για το έτος 2050. Συνοπτικά οι κύριοι στόχοι της εργασίας είναι οι εξής :

- Η εφαρμογή του μοντέλου RUSLE σε 4 υδρολογικές λεκάνες της Δυτικής Κρήτης (Δελιανών, Κερίτη, Ακρωτηρίου και Βρυσών), για την εκτίμηση του κινδύνου και του ποσοστού διάβρωσης της περιοχής,
- Η ανάδειξη της συμβατότητας του μοντέλου RUSLE με τις τεχνολογίες της Δορυφορικής Τηλεσκοπήσης
- Η εφαρμογή του μοντέλου χρήσεων γης στις υδρολογικές λεκάνες για τη μελέτη της πιθανής μελλοντικής μεταβολής των χρήσεων γης μέχρι το 2050,
- Η εκτίμηση του μοντέλου RUSLE για το 2050 με χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου εκτίμησης των χρήσεων γης LULC και του κλιματικού μοντέλου RCM της περιοχής,
- Η σύνθεση μιας συνολικής εικόνας για τη διάβρωση εδαφών στη περιοχή μελέτης και τη συσχέτιση αυτής με τις μεταβολές στις βροχοπτώσεις και τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

2.1 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο βόρειο δυτικό και κεντρικό τμήμα της Κρήτης, στο νομό Χανίων (Εικ. 1). Η περιοχή περικλείει τέσσερις υδρολογικές λεκάνες, τα Δελιανά, τον Κερίτη, το Ακρωτήριο και τις Βρύσες, σε γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 35,29 και 35,60 και μήκη μεταξύ 23,69 και 24,26 δεκαδικών μορίων. Η συνολική έκταση της περιοχής καλύπτει 487,7 km² και το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 2345 m. Αναλυτικά για κάθε λεκάνη, μορφολογικά στοιχεία αναγράφονται στον πίνακα 1. Γενικά η μορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από το έντονο ανάγλυφο και τις εναλλαγές από ορεινή σε ημιορεινή και επίπεδη επιφάνεια, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα διάβρωσης και τον κίνδυνο απώλειας του ανώτερου εδαφικού στρώματος.



Εικόνα 1 - Χάρτης Μεσογείου, Τοποθεσία Περιοχής Μελέτης

Πίνακας 1 - Μορφολογικά Χαρακτηριστικά Δελιανών, Κερίτη, Ακρωτηρίου και Βρυσών

| Λεκάνη | Ελάχιστο Υψόμετρο (m) | Μέγιστο υψόμετρο (m) | Επιφάνεια (km ²) | Περίμετρος (km) |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Δελιανά | 0.84 | 748.26 | 30.712 | 38.682 |
| Κερίτης | 0.07 | 2344.81 | 174.029 | 92.952 |
| Ακρωτήριο | 0.00 | 525.74 | 122.324 | 73.910 |
| Βρύσες | 0.10 | 2330.04 | 160.616 | 78.767 |
| Περιοχή Μελέτης | 0.00 | 2344.81 | 487.681 | 284.311 |

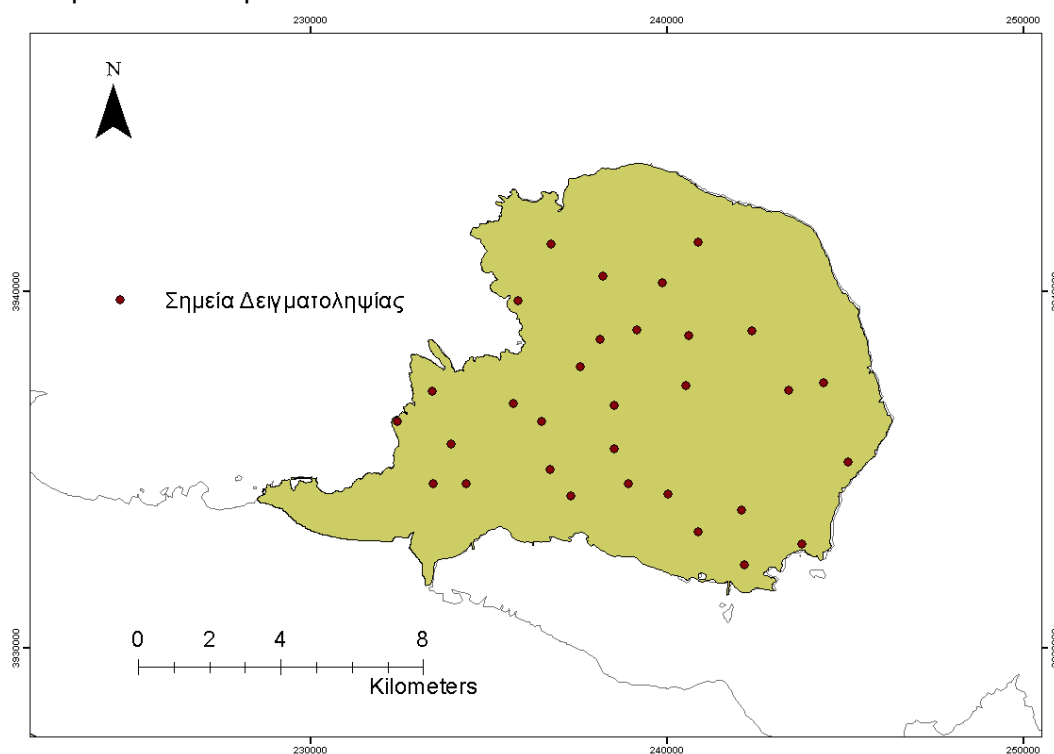
Το κλίμα της περιοχής θεωρείται εύκρατο Μεσογειακό. Οι χειμώνες είναι υγροί και σχετικά κρύοι, ενώ τα καλοκαίρια είναι θερμά και ξηρά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην ευρύτερη περιοχή εκτιμάται ότι είναι 730 mm, εκ των οποίων πάνω από 90% συμβαίνει μεταξύ Οκτωβρίου και Μαΐου. Κατά αυτόν τον τρόπο, η περίοδος ξηρασίας για την περιοχή εκτείνεται σε διάστημα μεγαλύτερο των 6 μηνών. Από το σύνολο των ετήσιων βροχοπτώσεων, περίπου το 64% χάνεται από την εξατμισοδιαπνοή, το 28% γίνεται απορροή στη θάλασσα και μόνο το 6% είναι η επαναφόρτιση υπογείων υδάτων (Kourgialas et al., 2015a, Tsagarakis et al., 2004) . Στη παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 14 μετεωρολογικούς σταθμούς που περικλείουν ή περιέχονται στην περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα καλύπτουν περίοδο 5 ετών από το 2013 έως το 2018. Ο Πίνακας 5 της Μεθοδολογίας, περιγράφει τη μέση ετήσια βροχόπτωση για κάθε σταθμό, ενώ το Σχ. 1 απεικονίζει τη χωρική κατανομή των σταθμών.

Μικρό μέρος των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης αποτελούν οι αστικές περιοχές (13%), με το κύριο μέρος της περιοχής να καταλαμβάνεται από γεωργικές εκτάσεις όπως οι καλλιέργειες ελαιών και εσπεριδοειδών, αλλά και περιοχές με φυσική βλάστηση και βοσκότοποι, καθώς και ορεινές βραχώδεις εκτάσεις. Οι εδαφικές κλίσεις, καθοριστικές για την τάση διάβρωσης της εκάστοτε περιοχής, στις γεωργικές περιοχές αγγίζουν το 40%, ενώ στις βραχώδεις περιοχές φτάνουν μέχρι το 75%. Γενικά, όσο αυξάνεται η βλάστηση, η απώλεια του εδάφους μειώνεται εκθετικά (Gyssels et al., 2005). Στις γεωργικές περιοχές όμως, ιδιαίτερα στις πολυετείς καλλιέργειες, η διάβρωση τείνει να είναι μεγαλύτερη από τις μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Τυπικές μεσογειακές καλλιέργειες, όπως οι ελιές και τα εσπεριδοειδή, συνήθως συνδέονται με υψηλές απώλειες εδάφους και σοβαρές οικονομικές ζημιές για τον αγροτικό τομέα (Brown 1984, Kosmas et al., 1997). Τα υπόγεια ύδατα, των οποίων η ποιότητα επηρεάζεται από την εδαφική διάβρωση, αποτελούν σημαντικό μέρος των υδάτων που χρησιμοποιούνται για την άρδευση των γεωργικών εκτάσεων, η οποία είναι και η κύρια χρήση νερού στην Κρήτη, καταλαμβάνοντας το 84,5% της συνολικής κατανάλωσης, ενώ η εγχώρια χρήση είναι 12% και άλλες χρήσεις 3,5% (Chartzoulakis et al., 2001). Η Κρήτη, λόγω του τουρισμού και των γεωργικών εργασιών, παρουσιάζει σημαντικές περιφερειακές διαφορές στη διαθεσιμότητα νερού, ιδιαίτερα στις παράκτιες, ανατολικές και νότιες περιοχές. Παρόλο που η κατά κεφαλήν διαθεσιμότητα νερού είναι σχετικά υψηλή, σε σχέση με τα επίπεδα της υπόλοιπης χώρας, και ενώ αρδεύεται μόνο το 31% της διαθέσιμης καλλιεργήσιμης γης, η ζήτηση για νερό άρδευσης είναι υψηλή (Chartzoulakis et al., 2001). Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερόμενες συνθήκες και παρατηρήσεις για την εδαφική διάβρωση και την περιοχή μελέτης, ο υπολογισμός της χωρικής κατανομής του κινδύνου διάβρωσης του εδάφους καθώς και η προσέγγιση της ανάλυσης των κύριων παραγόντων που τη διέπουν, όπως οι χρήσεις γης και οι κατακρημνίσεις, είναι χρήσιμα και απαραίτητα για τη μείωση του κινδύνου μελλοντικής διάβρωσης του εδάφους και των επιπτώσεων που αυτή επιφέρει.

2.2 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Μετεωρολογικά δεδομένα που ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο www.meteo.gr για 14 βροχομετρικούς σταθμούς που περιβάλλουν την περιοχή μελέτης, για χρονικό διάστημα 5 ετών, από το 2013 μέχρι τις αρχές του 2018. Οι σταθμοί αναφέρονται αναλυτικά στον πίνακα 5 της Μεθοδολογίας.
- Αρχείο DEM (Digital Elevation Model / Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου) της περιοχής μελέτης χωρικής διακριτικής ικανότητας 30m.
- Σχηματικά αρχεία(shape files) που περιλαμβάνουν την οριοθέτηση των υδρολογικών λεκανών, την τοποθεσία των πόλεων και οικισμών και την τοποθεσία των μετεωρολογικών σταθμών.
- Αποτελέσματα δειγματοληψιών εδάφους από 30 σημεία και υπολογισμού του CaCO_3 και της οργανικής ύλης στην ευρύτερη περιοχή του Ακρωτηρίου, στα σημεία που φαίνονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2 - Σημεία Δειγματοληψίας

- Χάρτης κάλυψης εδάφους Corine 2000 (CLC2000 100 m, έκδοση 1) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΟΧ, Κοπεγχάγη, 2000, <http://www.eea.europa.eu>),

διακριτικής ικανότητας 100m. με συνολικά 44 κατηγορίες χρήσεων γης. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κατηγορίες Corine, που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 2 - Κατηγορίες CLC

| ID | Λεζάντα CORINE | Κατηγορία |
|-----|---|-----------|
| 112 | Ασυνεχής αστικός ιστός | URBAN |
| 121 | Βιομηχανικές ή εμπορικές τοποθεσίες | URBAN |
| 123 | Περιοχές λιμένων | URBAN |
| 124 | Αεροδρόμια | URBAN |
| 131 | Εγκαταστάσεις εξόρυξης ορυκτών | URBAN |
| 133 | Εργοτάξια | URBAN |
| 142 | Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις | URBAN |
| 211 | Μη αρδευόμενες αρόσιμες εκτάσεις | SOIL |
| 221 | Αμπέλια | DGREEN |
| 222 | Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες μούρων | DGREEN |
| 223 | Ελαιώνες | DGREEN |
| 242 | Σύνθετες καλλιέργειες | GREEN |
| 243 | Εκτάσεις κυρίως γεωργικές, με σημαντικές περιοχές βλάστησης | GREEN |
| 312 | Δάσος κωνοφόρων | DGREEN |
| 321 | Φυσικά λιβάδια | SOIL |
| 323 | Σκληρόφυλλη βλάστηση | DGREEN |
| 331 | Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιά | BROCK |
| 332 | Βράχοι | BROCK |
| 333 | Αραιά βλάστηση περιοχές | SOIL |

- ο Δορυφορικές εικόνες (Εικόνες 3,4 και 5) της περιοχής μελέτης που ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο της Γεωλογικής Ερευνητικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (United States Geological Survey, USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Στους πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών εικόνων και των δορυφόρων δεκτών, αντίστοιχα.

Πίνακας 3 - Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Εικόνων

| Δορυφόρος | Χαρακτηριστικά | Path | Row | Ημερομηνία |
|------------------|---------------------|------|-----|-----------------|
| Landsat 5 | TM C1 Level 1 | 182 | 35 | 17 Ιουνίου 1998 |
| Landsat 5 | TM C1 Level 1 | 182 | 35 | 14 Ιουλίου 2008 |
| Landsat 8 | OLI/TIRS C1 Level 1 | 182 | 35 | 5 Απριλίου 2018 |

Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Δεκτών

| Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) | | Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) | |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Φασματικά Κανάλια / Bands | Εύρος μήκους κύματος ακτινοβολίας | Ζώνες / Bands | Εύρος μήκους κύματος ακτινοβολίας |
| Band 1 – Coastal Aerosol | 0.435 - 0.451 | Band 1 - Blue | 0.45 - 0.52 |
| Band 2 – Blue | 0.452 - 0.512 | Band 2 - Green | 0.52 - 0.60 |
| Band 3 - Green | 0.533 - 0.590 | Band 3 - Red | 0.63 - 0.69 |
| Band 4 - Red | 0.636 - 0.673 | Band 4 - Near Infrared | 0.77 - 0.90 |
| Band 5 - Near Infrared (NIR) | 0.851 - 0.879 | Band 5 - Short-wave Infrared | 1.55 - 1.75 |
| Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1 | 1.566 - 1.651 | Band 6 - Thermal Infrared | 10.40 - 12.50 |
| Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2 | 2.107 - 2.294 | Band 7 - Short-wave Infrared | 2.09 - 2.35 |



Εικόνα 3 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 1998



Εικόνα 4 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 2008

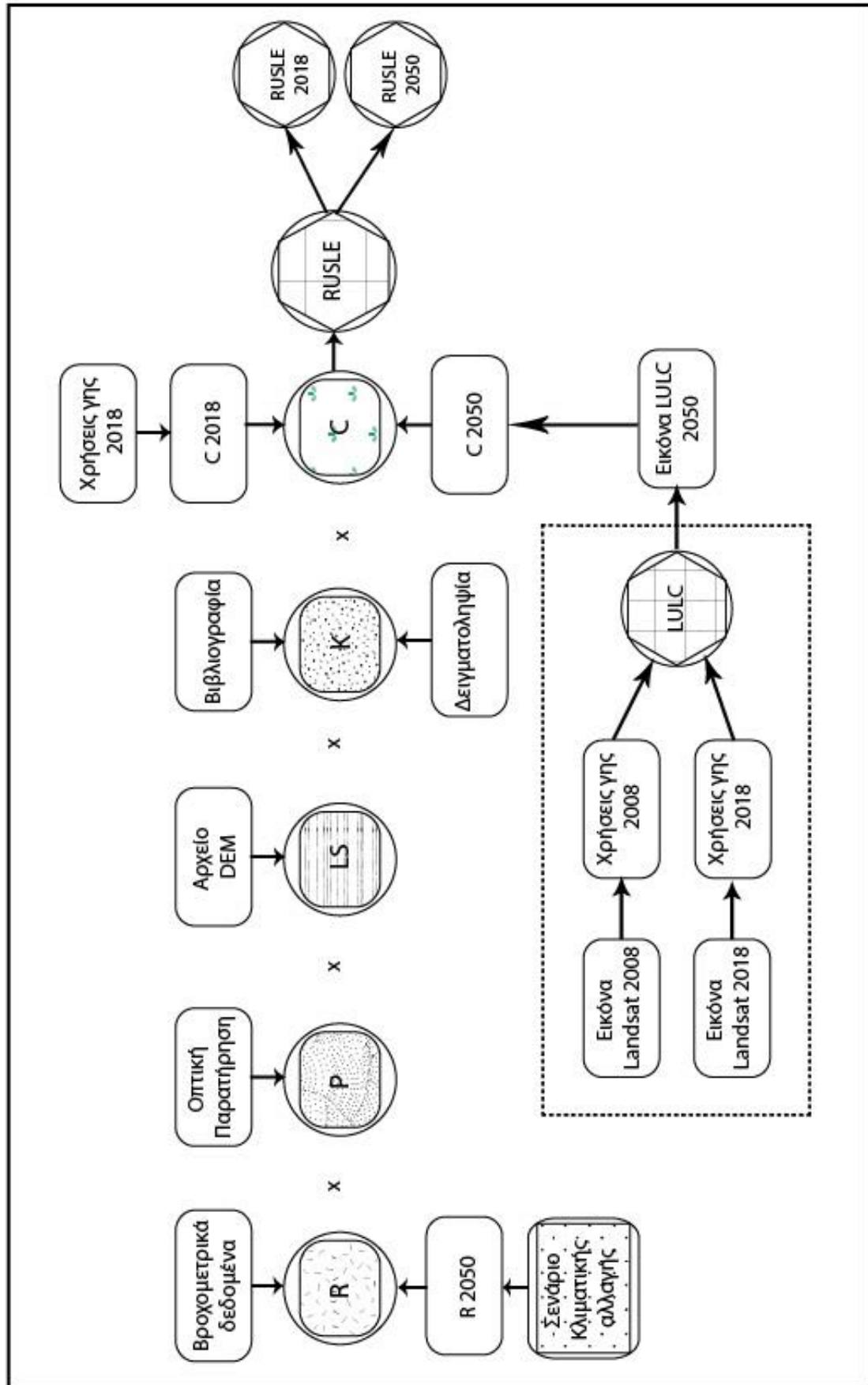


Εικόνα 5 - Δορυφορική Εικόνα Landsat 2018

- Διορθωμένα βροχομετρικά δεδομένα (Grillakis et al., 2013) για το έτος 2050 σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 για 13 σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή. (Εικόνα 10)
- Δεδομένα για την εξαγωγή του συντελεστή K (Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS , Panos Panagos et al., 2014) όπως έχουν προκύψει από σχετικά ερευνητικά αποτελέσματα του *Joint Research Institute* της Ευρωπαϊκής Ένωσης (JRC) (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-erodibility-k-factor-high-resolution-dataset-europe>)

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά στο διάγραμμα ροής. Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 2, η εξίσωση του μοντέλου RUSLE αποτελείται από πέντε βασικούς παράγοντες. Για την εκπόνηση του παράγοντα κλίσης LS, χρησιμοποιήθηκε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους DEM και για τον παράγοντα πρακτικών προστασίας P, έγινε οπτική παρατήρηση και σκιαγράφιση των περιοχών με εφαρμοσμένες πρακτικές προστασίας. Για την εξαγωγή του παράγοντα διαβρωσιμότητας K, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιβλιογραφίας όπως αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.2 των Δεδομένων, για τη συνολική περιοχή μελέτης, καθώς και δεδομένα από τη δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Ακρωτηρίου. Για την εξαγωγή του παράγοντα βροχοπτώσεων R, για το 2018, χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα διάρκειας 5 ετών , ενώ για το 2050 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Διορθωμένο Κλιματικό Μοντέλο για τη χρονιά αυτή. Ο παράγοντας χρήσεων γης C για το 2018 εκπονήθηκε από την ομαδοποίηση της δορυφορικής εικόνας Landsat για το 2018, ενώ για το 2050 χρησιμοποιήθηκε ο πιθανοτικός χάρτης χρήσεων γης που εξάχθηκε από το μοντέλο LULC, με χρήση των δορυφορικών εικόνων για το 2008 και το 2018. Τέλος, έγινε εφαρμογή του μοντέλου RUSLE για το 2018 και για τα σενάρια του 2050.



Διάγραμμα 2 - Διάγραμμα Ροής

3.1 Μοντέλο RUSLE

Για την εκτίμηση των ποσοστών εδαφικής απώλειας στις λεκάνες της περιοχής μελέτης, έγινε χρήση του χωρικού μοντέλου RUSLE. Η αναθεωρημένη έκδοση της εξίσωσης USLE (Universal Soil Loss Equation), η εξίσωση RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) είναι μια από τις πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους υπολογισμού της απώλειας εδάφους, καθώς είναι συμβατή με το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών GIS και με δεδομένα τηλεπισκόπησης (Remote Sensing – RS). Είναι βασισμένη σε εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επί της εξίσωσης USLE (USLE, Wischmeier and Smith 1978), (RUSLE, Renard et al. 1997). Η εξίσωση RUSLE, σε συνδυασμό με το σύστημα GIS και δεδομένα RS, δίνει ως αποτέλεσμα τη μέση χωρική απώλεια εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας ανά έτος [$\text{tn} / (\text{ha year})$] και υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό πέντε βασικών συντελεστών, R, C, L, S, K και P, που σχετίζονται με τις βασικές παραμέτρους που καθορίζουν τη διάβρωση, τις βροχοπτώσεις, τις χρήσεις γης, το μήκος και το βάθος κλίσης, τη διαπερατότητα και τις τεχνικές προστασίας, αντίστοιχα και προκύπτουν από δεδομένα RS, μετεωρολογικά, DEMs και άλλα δεδομένα που αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια. Παρακάτω παρουσιάζεται η εξίσωση RUSLE (Εξίσωση 1).

$$A = R * K * LS * C * P$$

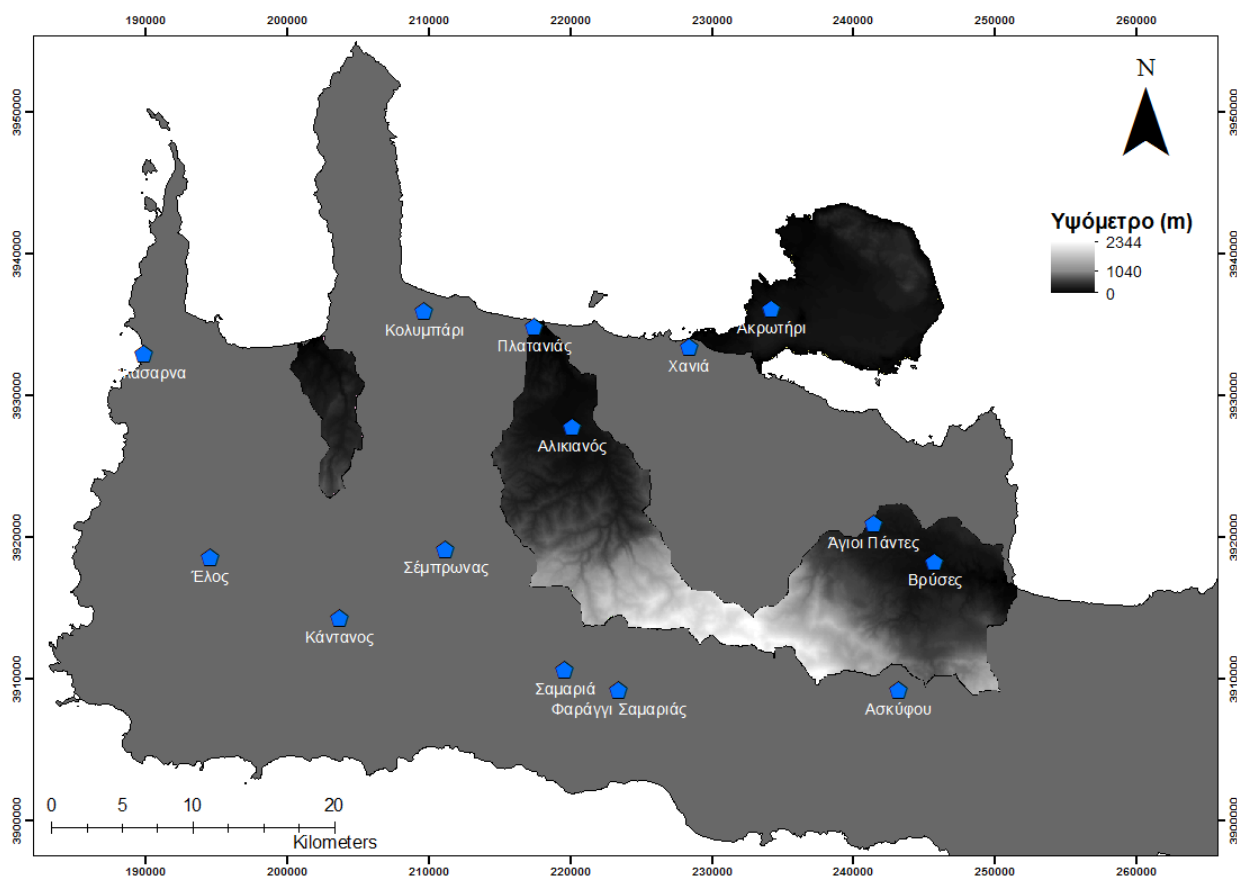
Όπου:

- A η υπολογιζόμενη μέση χωρική απώλεια εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας [$\text{tn} / (\text{ha year})$]
- R ο συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης-απόρριψης [$\text{MJ mm} / (\text{ha h year})$]
- K ο συντελεστής διαπερατότητας [$\text{tn ha h} / (\text{ha MJ mm})$]
- L ο παράγοντας μήκους κλίσης (αδιάστατος)
- S ο παράγοντας απότομης κλίσης (αδιάστατος)
- C ο συντελεστής διαχείρισης γης (αδιάστατος)
- P ο συντελεστής πρακτικής συντήρησης της συντήρησης (αδιάστατος)

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε όλη τη μεθοδολογία του υπολογισμού των εδαφικών απωλειών με τη χρήση της εξίσωσης RUSLE ανάγονται μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Αναλυτικά οι παράγοντες του μοντέλου RUSLE είναι περιγράφονται παρακάτω.

3.1.1 Συντελεστής βροχοπτώσεων R

Ο παράγοντας R εκφράζει το μέτρο της διαβρωτικής δύναμης που παράγεται από τις βροχοπτώσεις. Γενικά, ο R προσδιορίζεται από τον όγκο, την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων της περιοχής και μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά καταγεγραμμένων μετεωρολογικών δεδομένων σε ένα χρονικό διάστημα, από το οποίο μπορεί να ληφθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις βροχοπτώσεις της περιοχής. Καθώς δεδομένα για την ενέργεια και την ένταση των βροχοπτώσεων διατίθενται σπάνια από συμβατικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, αναπτύχθηκαν δείκτες που αξιοποιούν μηνιαία ποσοτικά δεδομένα, όπως ο δείκτης Fournier (FI) και στη συνέχεια ο τροποποιημένος δείκτης Fournier (MFI) (Arnoldus, 1980). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα ύψους βροχής (mm), από τη βάση δεδομένων του ιστότοπου, www.meteo.gr, βάσει των οποίων υπολογίστηκε ο δείκτης MFI. Το μελετώμενο χρονικό διάστημα έχει διάρκεια 5 έτη, από τις αρχές του 2013 μέχρι τις αρχές του 2018, από 14 μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης και της γύρω περιοχής. Τα ημερήσια δεδομένα εισήχθησαν αρχικά στο λογισμικό excel για να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, να υπολογιστούν τα μηνιαία και συνολικά ετήσια ύψη βροχόπτωσης, να υπολογιστεί το MFI και τελικά το R, για κάθε σταθμό. Επίσης, στο στάδιο αυτό έγινε εκκαθάριση των δεδομένων και υπολογισμών με προφανή σφάλματα από το σύνολο των δεδομένων, για τη διόρθωση και την αποφυγή σφαλμάτων στη συνέχεια της διαδικασίας.



Εικόνα 6 - Μετεωρολογικοί Σταθμοί

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 6.

Ο Τροποποιημένος Δείκτης Fournier MFI (Modified Fournier Index), ο οποίος λαμβάνει υπόψη την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, θεωρείται καλά συσχετισμένος με τη διαβρωτική βροχόπτωση (Kouli et al., 2009). Ο MFI εκφράζεται από την Εξίσωση 2.

$$MFI = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{12} \frac{p_{i,j}^2}{P_j} \quad (2)$$

Όπου:

$p_{i,j}$: το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm) του μήνα i , έτους j

P_j : το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (mm) του έτους j

N : το σύνολο των ετών καταγραφής μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του MFI, (years).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή R με τη χρήση του Τροποποιημένου Δείκτη Fournier (MFI), χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν για τις περιοχές της Σικελίας (Ferro et al, 1991) και του Μαρόκο (Renard και Freimund, 1994), οι οποίες εκφράζονται από τις εξισώσεις 3 και 4 αντίστοιχα.

$$R_{Sicily} = 0,6120 * MFI^{1,56} \quad (3)$$

$$R_{Morocco} = 0,264 * MFI^{1,50} \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις 3 και 4, υπολογίστηκαν τα R_{Sicily} και $R_{Morocco}$ και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή τους, που είναι και η τελική τιμή R για κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Στο σημείο αυτό τα δεδομένα εισάχθηκαν στο GIS στο σημειακό σχηματικό αρχείο (shape file) των σταθμών και με τη χρήση του αλγόριθμου Kriging, έγινε γραμμική παρεμβολή ώστε να καλυφθεί χωρικά η περιοχή μελέτης και κάθε σημείο της περιοχής να λάβει την τιμή R που του αναλογεί. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε το τελικό raster/ψηφιδωτό αρχείο/επίπεδο/layer που θα χρησιμοποιήθηκε στην τελική εξίσωση του μοντέλου RUSLE. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών που αναφέρθηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.

| | Σταθμοί | Γεωγραφικό Μήκος | Γεωγραφικό Πλάτος | Διάρκεια καταγραφής δεδομένων (χρόνια) | Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm) | MFI | R factor (Sicily) | R factor (Morocco) | R factor |
|----|---------------------|---------------------|----------------------|---|--------------------------------------|--------|----------------------|-----------------------|----------|
| 1 | Βρύσες | 245735.84 | 3918314.42 | 5 | 854.04 | 162.36 | 1718.33 | 546.17 | 1132.25 |
| 2 | Σαμαριά | 219626.97 | 3910674.99 | 5 | 1304.32 | 291.09 | 4272.09 | 1311.15 | 2731.62 |
| 3 | Αλικιανός | 220136.16 | 3927812.33 | 5 | 670.12 | 125.55 | 1150.59 | 371.40 | 761.00 |
| 4 | Πλατανιάς | 217504.93 | 3934842.62 | 3 | 575.50 | 109.80 | 933.40 | 303.73 | 618.56 |
| 5 | Κολυμπάρι | 209709.55 | 3935962.24 | 1.5 | 902.53 | 267.03 | 3734.16 | 1152.00 | 2443.08 |
| 6 | Σέμπρωνας | 211223.27 | 3919187.32 | 3 | 1104.20 | 235.14 | 3062.09 | 951.90 | 2006.99 |
| 7 | Κάντανος | 203714.98 | 3914279.83 | 2 | 751.46 | 280.30 | 4027.49 | 1238.88 | 2633.18 |
| 8 | Ασκούφου | 243243.70 | 3909236.53 | 4 | 1793.20 | 359.50 | 5937.89 | 1799.47 | 3868.68 |
| 9 | Έλος | 194565.89 | 3918606.28 | 3.5 | 976.33 | 300.88 | 4498.24 | 1377.82 | 2938.03 |
| 10 | Άγιοι Πάντες | 241435.35 | 3920995.17 | 2.5 | 758.40 | 190.57 | 2206.24 | 694.55 | 1450.39 |
| 11 | Φαλάσαρνα | 189922.57 | 3932979.71 | 5 | 547.60 | 112.40 | 968.12 | 314.58 | 641.35 |
| 12 | Φαράγγι Σαμαριάς | 223399.59 | 3909225.25 | 5 | 1067.16 | 342.32 | 5501.27 | 1672.05 | 3586.66 |
| 13 | Ακρωτήριο | 234266.38 | 3936142.63 | 5 | 548.52 | 109.09 | 924.11 | 300.82 | 612.47 |
| 14 | Χανιά | 228461.34 | 3933479.17 | 5 | 578.20 | 113.66 | 985.21 | 319.92 | 652.57 |

Πίνακας 5 - Παράγοντας R

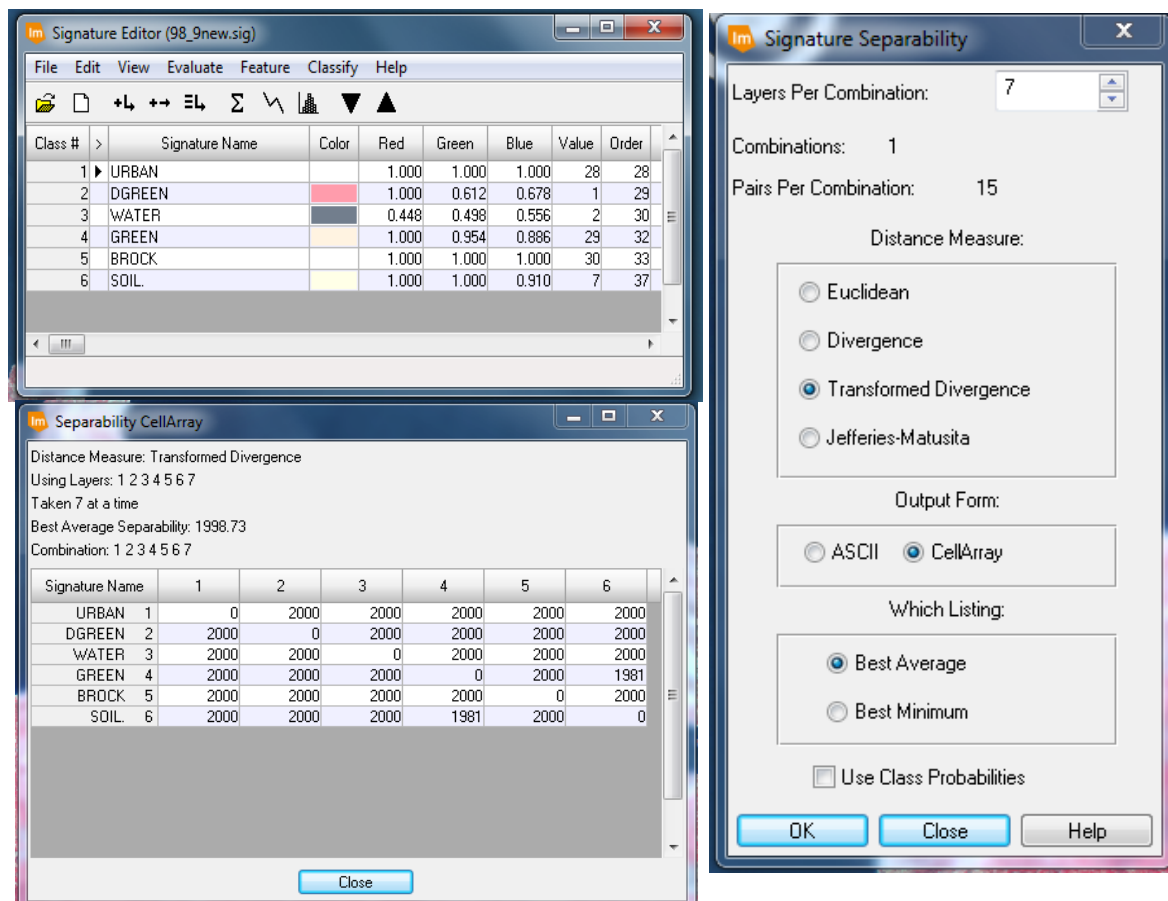
3.1.2 Συντελεστής χρήσεων γης C

Ο συντελεστής κάλυψης και χρήσεων γης C, αντιπροσωπεύει την επίδραση των διάφορων δραστηριοτήτων που διαταράσσουν το έδαφος, πρακτικών καλλιέργειας και διαχειριστικών πρακτικών, καθώς και την επίδραση της υπάρχουσας βλάστησης, στην εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης στην περιοχή μελέτης. Οι τιμές του συντελεστή C κυμαίνονται από 0, για περιοχές που είναι λιγότερο ευαίσθητες, έως 1, για περιοχές που είναι περισσότερο ευαίσθητες στην εδαφική διάβρωση. Για την εκπόνηση του χάρτη συντελεστή C, πραγματοποιήθηκε χρήση τεχνολογιών τηλεσκοπίσης. Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.

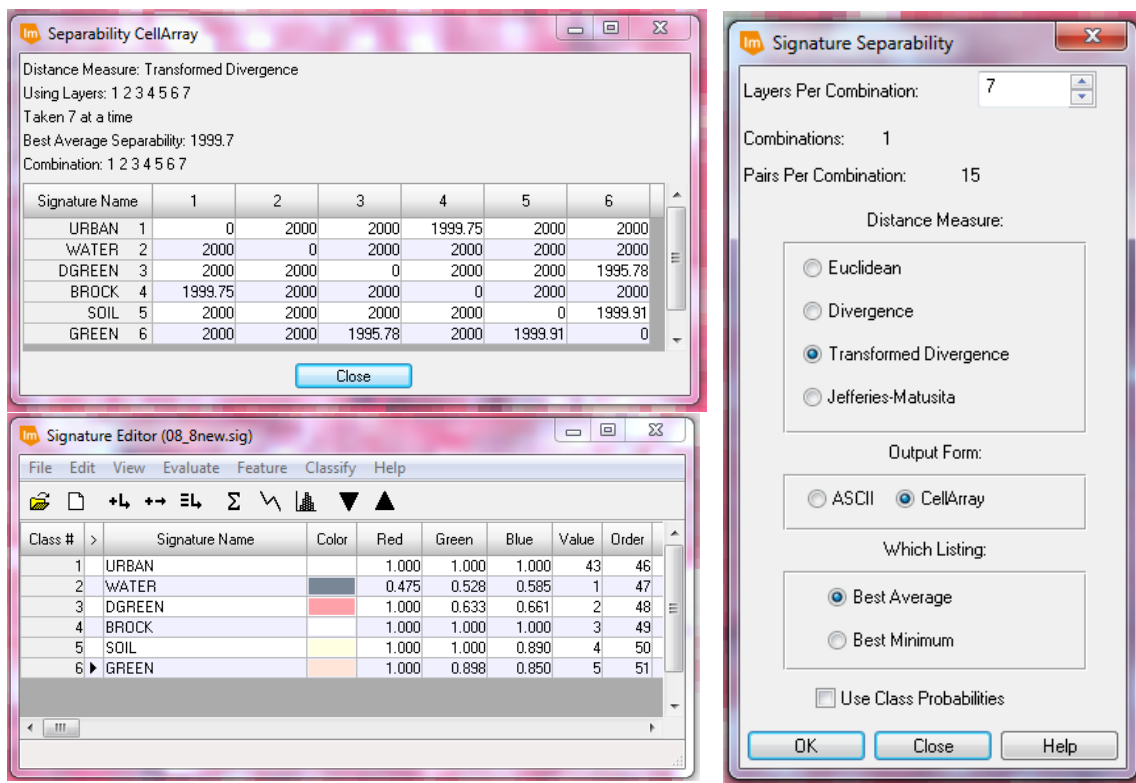
3.1.2.1 Φασματική Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων

Οι δορυφορικές εικόνες της ευρύτερης περιοχής της δυτικής Κρήτης που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη, ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο της Γεωλογικής Ερευνητικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (United States Geological Survey, USGS). Δορυφορικές εικόνες όλου του πλανήτη περίπου ανά 15 ημέρες, αναρτώνται στον ιστότοπο του USGS. Οι εικόνες έχουν χωρική ανάλυση 30m*30m και αποτελούνται από 7 φασματικές ζώνες (bands), όπου κάθε ζώνη καλύπτει ένα συγκεκριμένο εύρος φάσματος ακτινοβολίας και αναλυτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 των Δεδομένων. Για την επεξεργασία και την ομαδοποίηση των κλάσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ERDAS IMAGINE, όπου εισήχθησαν τα πρώτα 7 φασματικά κανάλια και με το εργαλείο layer stack δημιουργήθηκε η νέα σύνθετη εικόνα, η οποία εμπεριέχει και τα 7 κανάλια. Κατά την εμφάνιση μιας έγχρωμης σύνθετης εικόνας, χρησιμοποιούνται τρία βασικά χρώματα (κόκκινο, πράσινο και μπλε). Η συσχέτιση κάθε φασματικής ζώνης με ένα ξεχωριστό, πρωτεύον χρώμα οδηγεί σε μια έγχρωμη σύνθετη εικόνα, που μπορεί να αναδείξει καλύτερα τις πληροφορίες ενδιαφέροντος. Δοκιμάζοντας διάφορους συνδυασμούς των ζωνών στα RGB, επιλέχθηκαν τα φασματικά κανάλια στα Red, Green, και Blue αντίστοιχα για την βέλτιστη απεικόνιση της περιοχής μελέτης (Φυσικό έγχρωμο σύνθετο). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το εργαλείο signature editor, λήφθηκαν ψηφιακά φασματικές υπογραφές από την εικόνα οι οποίες και αντιστοιχήθηκαν με τις κατάλληλες κλάσεις (χρήσεις γης) ομαδοποίησης της εικόνας. Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 6 κλάσεις, οι οποίες δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τις κλάσεις του χάρτη κάλυψης εδάφους Corine 2000 (CLC2000 100 m, έκδοση 1) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σύμφωνα με τον πίνακα 2 των Δεδομένων. Αφού έγινε έλεγχος διαχωρισιμότητας των κλάσεων (Εικόνες 8, 9 ,10), έγινε φασματική επιβλεπόμενη ταξινόμηση (supervised classification), για τρεις περιπτώσεις παραμετρικών κανόνων (parametric rule)/αλγόριθμων ταξινόμησης, αυτή των μέγιστων πιθανοτήτων (Maximum Likelihood), του χαρτογράφου φασματικής γωνίας (Spectral Angle Mapper) και του χαρτογράφου φασματικής συσχέτισης (Spectral Correlation Mapper). Οι τρεις εικόνες χρήσεων γης που παρήχθησαν για κάθε δορυφορική εικόνα που ταξινομήθηκε

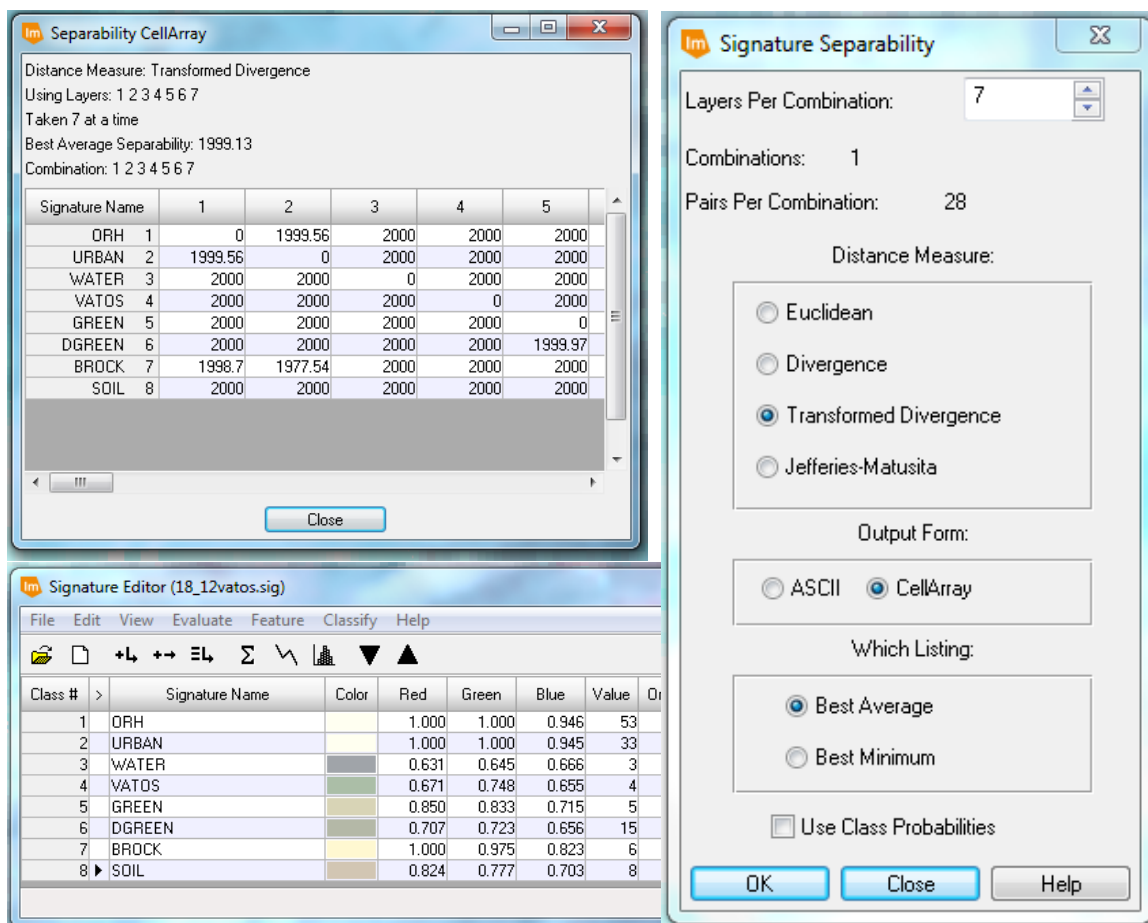
αξιολογήθηκαν ως προς την ακρίβεια τους (Accuracy Assessment) στο περιβάλλον του λογισμικού ERDAS IMAGINE. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ακρίβειας των φασματικών ταξινομήσεων με χρήση των διαφορετικών αλγόριθμων παρουσιάζονται στον πίνακα 6. Όπως διακρίνεται ο συντελεστής K λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές και στις τρεις ικόνες με χρήση του αλγόριθμου μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood). Οι τελικές ομαδοποιημένες εικόνες χρήσεων γης για το 1998, το 2008 και το 2018, παρουσιάζονται στα κεφάλαιο με τα αποτελέσματα.



Εικόνα 7 - Έλεγχος διαχωρισιμότητας κλάσεων, 1998



Εικόνα 8 - Έλεγχος διαχωρισιμότητας κλάσεων 2008



Εικόνα 9 - Έλεγχος διαχωρισιμότητας κλάσεων, 2018

Πίνακας 6 - Αξιολόγηση Ακρίβειας Μεθόδων Κατηγοριοποίησης

| Εικόνα Landsat | Μέθοδος (Στατιστικά Kappa - Overall) | | |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | Maximum Likelihood | Spectral Angle Mapper | Spectral Correlation Mapper |
| 1998 | 86,73% | 62,90% | 35,79% |
| 2008 | 90,08% | 43,71% | 43,38% |
| 2018 | 81,42% | 43,71% | 45,21% |

Οι εικόνες ταξινομήθηκαν σε 6 κατηγορίες, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Οι κλάσεις αυτές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- URBAN: Αστικές περιοχές όπως ο ασυνεχής αστικός ιστός, οι βιομηχανικές ή εμπορικές τοποθεσίες, λιμάνια αεροδρόμια κτλ
- DGREEN – DARK GREEN: Περιοχές με πυκνή βλάστηση όπως ελαιώνες, κωνοφόρα, σκληρόφυλλη βλάστηση
- GREEN: Περιοχές με αραιή βλάστηση, όπως σύνθετες καλλιέργειες και άλλες περιοχές βλάστησης γεωργικές ή μη
- SOIL: Περιοχές ουδέτερης βλάστησης όπως τα φυσικά λιβάδια, οι βοσκότοποι και οι μη αδρευόμενες αρόσιμες εκτάσεις
- BROCK – BARE ROCK: Άγονες περιοχές όπως βραχώδεις και αμμώδεις εκτάσεις
- WATER: Υδάτινες περιοχές, όπως λίμνες.

Πίνακας 7 - Κατηγορίες Ομαδοποίησης και τιμές C

| Κατηγορία | Χαρακτηριστικά | C |
|-----------|---|---------|
| URBAN | Αστικές περιοχές | 0 |
| DGREEN | Περιοχές με πυκνή βλάστηση | 0,26626 |
| GREEN | Περιοχές με αραιή βλάστηση | 0,1308 |
| SOIL | Ουδέτερες φυσικές εκτάσεις | 0,15435 |
| BROCK | Βραχώδεις, άγονες και αμμώδεις εκτάσεις | 0,3427 |
| WATER | Υδάτινες περιοχές | 0 |

Τέλος, ανατέθηκαν οι τιμές του C σε κάθε κλάση (πίνακας 7) σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε το τελικό αρχείο raster με τις τιμές C. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τις δορυφορικές εικόνες της περιοχής μελέτης για τα έτη 1998, 2008 και 2018.

3.1.3 Συντελεστής πρακτικών διαχείρισης P

Ο συντελεστής P είναι μια έκφραση των συνολικών αποτελεσμάτων των υποστηρικτικών πρακτικών διατήρησης της ποσότητας και της ποιότητας του εδάφους που εφαρμόζονται στην εκάστοτε περιοχή. Οι πρακτικές ελέγχου και διαχείρισης του εδάφους είναι σημαντικές, αφού η ύπαρξη ή μη των πρακτικών αυτών, επηρεάζει το σύστημα αποστράγγισης, τη συγκέντρωση απορροής, ταχύτητα απορροής και το μέγεθος της επίδρασης των υδραυλικών δυνάμεων που ασκούνται από την απορροή στην επιφάνεια του εδάφους. Οι πρακτικές αυτές είναι κυρίως η περιφραγμένη καλλιέργεια (terracing), κατά την οποία περιφράσσονται μικρές διαδοχικές περιοχές ώστε να διατηρείται το ανώτερο στρώμα του εδάφους σε κάποια πλαίσια και να μη μετατοπίζεται έντονα, καθώς και η διαστρωματική καλλιέργεια (contouring), κατά την οποία δημιουργούνται τεχνητά σκαλοπάτια στο έδαφος, αποτρέποντας κομμάτια εδαφικού στρώματος από το να κυλούν και να μετατοπίζονται. Οι τιμές του συντελεστή P κυμαίνονται από 0 έως 1, με τις βέλτιστες πρακτικές να προσεγγίζουν το 0 και την απουσία πρακτικών να παίρνει τιμή 1.

Στη παρούσα μελέτη, έγινε συλλογή δεδομένων για τις μεθόδους διατήρησης terracing και contouring, με οπτική παρατήρηση της περιοχής μελέτης στο περιβάλλον του Google Earth. Οι περιοχές όπου υπήρχε εφαρμογή πρακτικών διατήρησης, οριοθετήθηκαν με πολύγωνα σε περιβάλλον GIS και στη συνέχεια έγινε αναγωγή τους στο περιβάλλον του ArcMap, όπου και ανατέθηκε στα πολύγωνα πρακτικής terracing τιμή ίση με 0,9676 και στα πολύγωνα πρακτικής contouring τιμή ίση με 0,9939. Σε όλη την υπόλοιπη περιοχή ανατέθηκε η τιμή 1 δημιουργώντας το raster αρχείο με τις τιμές του συντελεστή πρακτικών διαχείρισης P.

3.1.4 Συντελεστής διαβρωσιμότητας K

Ο συντελεστής K, αντιπροσωπεύει το ποσοστό της απώλειας εδάφους ανά μονάδα δείκτη διάβρωσης βροχόπτωσης για ένα συγκεκριμένο έδαφος. Ο K, αναφέρεται στη μέση μακροπρόθεσμη απόκριση του εδάφους σε σχέση με τη διαβρωτική ισχύ των βροχοπτώσεων και της απορροής.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιβλιογραφίας χωρικής διακριτικής ικανότητας 500*500 m (Panagos et al., 2014) για την εκτίμηση του συντελεστή K για τις τέσσερις λεκάνες της περιοχής μελέτης. Για την περιοχή του Ακρωτηρίου, υπολογίστηκε ακόμα ένας συντελεστής K (KH), σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας. Με τη χρήση της γραμμικής παρεμβολής δημιουργήθηκε ένα νέο ψηφιδωτό αρχείο με τιμές K για την περιοχή αυτή. Συνολικά συλλέχθηκαν δείγματα από 30 σημεία σε όλο το Ακρωτήρι και στάλθηκαν στο Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων για ανάλυση κοκκομετρικής σύστασης (ποσοστό άμμου, αργίλου και ιλύος) και εκτίμησης ποσοστού οργανικής ύλης. Για την εκτίμηση του συντελεστή K, συνήθως χρησιμοποιείται το νομόγραμμα διάβρωσης εδάφους (Wischmeier et al., 1971). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε την αλγεβρική προσέγγιση του νομογράμματος αυτού που περιλαμβάνει πέντε εδαφικές

παραμέτρους, την υφή, την οργανική ύλη, τα χονδροειδή θραύσματα, τη δομή και τη διαπερατότητα (Wischmeier and Smith, 1978) (Renard et al., 1997) και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης

$$K = \left[\frac{2,1 * 10^{-4} M^{1,14} (12 - OM) + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3)}{100} \right] * 0,1317 \quad (5)$$

Όπου:

M : ο συντελεστής υφής με $M = (m_{silt} + m_{vfs}) * (100 - m_c)$

m_c : η περιεκτικότητα σε αργίλο ($< 0,002 \text{ mm}$)

m_{silt} : η περιεκτικότητα σε λάσπη ($0,002 - 0,05 \text{ mm}$)

m_{vfs} : η περιεκτικότητα σε λεπτή άμμο ($0,05-0,1 \text{ mm}$)

OM : η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη

s : η κλάση της δομής του εδάφους ($s = 1$ πολύ λεπτές κοκκώδεις, $s = 2$ λεπτές κοκκώδεις, $s = 3$ μεσαίες ή χονδροειδείς κοκκώδεις, $s = 4$ χονδροειδείς, όγκοδεις)

Αφού υπολογίστηκε η τιμή του K για κάθε σημείο της δειγματοληψίας, στη συνέχεια προέκυψε ο τελικός χάρτης με χρήση της μεθόδου παρεμβολής spline σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, για την περιοχή του Ακρωτηρίου. Συνεπώς προέκυψαν δύο χάρτες συντελεστή διαπερατότητας K για την περιοχή του Ακρωτηρίου, ο ένας από τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Panagos et al., 2014), και ο άλλος από τα δεδομένα δειγματοληψίας. Για τις λεκάνες των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη οι χάρτες του συντελεστή K εξάχθηκαν από τα δεδομένα της βιβλιογραφίας, όπως προαναφέρεται.

3.1.5 Συντελεστές κλίσης LS

Ο τοπογραφικός συντελεστής LS σχετίζεται με τον παράγοντα βάθους κλίσης (S) και παράγοντα μήκους κλίσης (L) και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της διάβρωσης εξαιτίας της άμεσης σχέσης του με την επιφανειακή απορροή. Το μήκος κλίσης (L) ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση από το σημείο προέλευσης της οριζόντιας ροής μέχρι το σημείο όπου το βάθος κλίσης μειώνεται και η εναπόθεση απορροής μπορεί να ξεκινήσει. Το βάθος κλίσης (S) ουσιαστικά είναι η γωνία κλίσης, δηλαδή εκφράζει το πόσο απότομα αλλάζει η υψομετρική διαφορά. Το βάθος, καθώς και το μήκος κλίσης, παίζουν σημαντικό ρόλο στα ποσοστά της διάβρωσης του εδάφους, καθώς όσο αυξάνεται η γωνία, τόσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής, αυξάνοντας έτσι τις τάσεις που ασκούνται στα σωματίδια του εδάφους.

Για τον υπολογισμό των παραγόντων LS , χρησιμοποιήθηκε αρχείο Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους / DEM (Digital Elevation Model) της περιοχής μελέτης, με χωρική ανάλυση $30*30 \mu$, το οποίο εισάχθηκε και αναλύθηκε στο περιβάλλον GIS. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το

εργαλείο fill, για να ομαλοποιηθεί το αρχείο και να γεμίσουν τυχόν κενά ή μικρά σφάλματα. Στη συνέχεια, με το εργαλείο flow direction, εξάχθηκε αρχείο με τη κατεύθυνση της ροής, το οποίο στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το ως αρχείο εισαγωγής (input) στο εργαλείο flow accumulation, μας έδωσε αρχείο με τη συσσώρευση της ροής σε κάθε σημείο. Το εργαλείο slope, με τη χρήση του αρχείου DEM, υπολόγισε την κλίση της περιοχής μελέτης σε μοίρες (DEGREES). Τα αρχεία κατεύθυνσης και συσσώρευσης της ροής καθώς και αυτό με τις κλίσεις, χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με την εξίσωση 6, στο εργαλείο του raster calculator σε περιβάλλον ArcMap για τον υπολογισμό του τελικού επιπέδου LS της περιοχής μελέτης.

$$LS = \frac{Flow\ Accumulation * 30^{0,4}}{22,13} * \frac{\sin(Slope * 0,0174533)^{1,3}}{0,0896} \quad (6)$$

3.2 Μοντέλο Land Use Land Cover

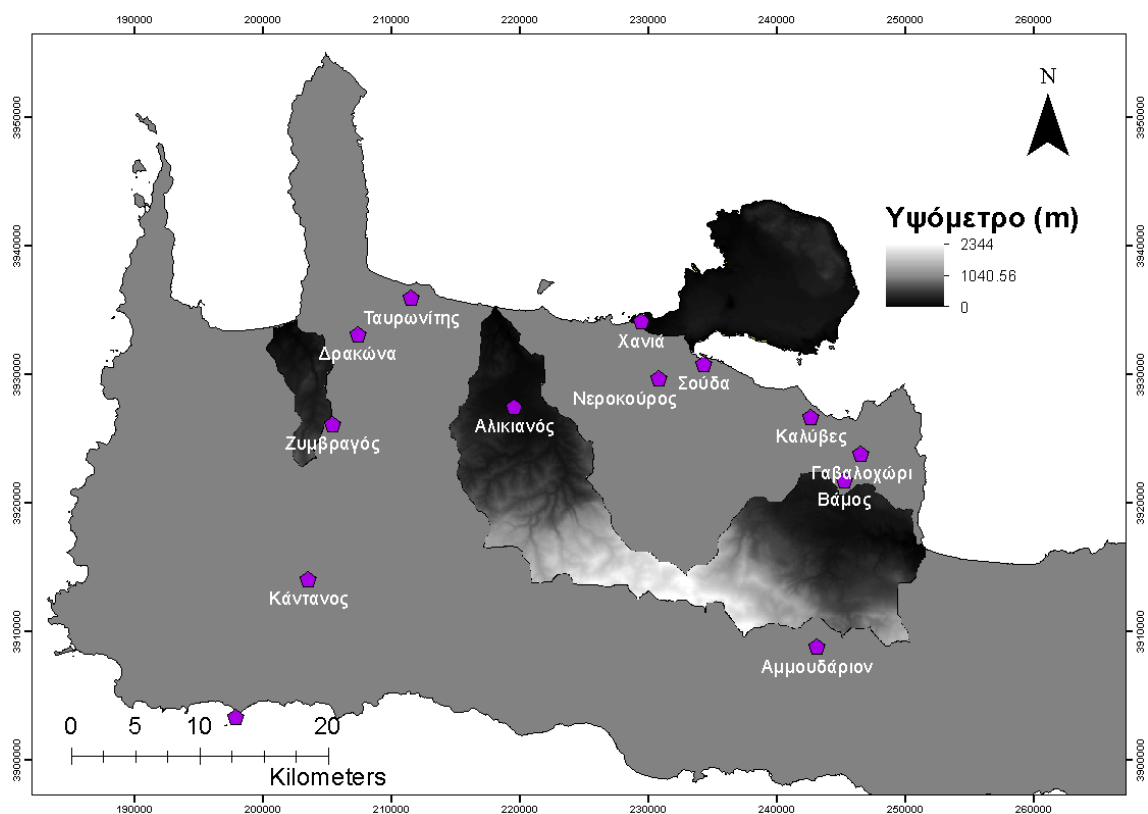
Η ανάλυση του μοντέλου LULC (Land Use Land Cover), έγινε με χρήση της Μαρκοβιανής διαδικασίας (Markov και ca_Markov) και πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον του λογισμικού IDRISI TerrSet 18.31. Αρχικά εισάγονται στο πρόγραμμα οι ομαδοποιημένες εικόνες χρήσεων γης της περιοχής μελέτης, όπως εξάχθηκαν από τη διαδικασία στο περιβάλλον ERDAS, που περιγράφεται στον παράγοντα C της Μεθοδολογίας, των οποίων η ομαδοποίηση έγινε σε 6 όμοιες ονομαστικά κλάσεις και με τα ίδια οπτικά κριτήρια, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6. Στη συνέχεια έγινε μορφοποίηση των εισαχθέντων δεδομένων για να είναι σύμφωνα με το περιβάλλον του προγράμματος. Ξεκινώντας τη Μαρκοβιανή διαδικασία, για την εκτίμηση των μεταβολών από μία κλάση κάλυψης γης σε άλλη, χρησιμοποιείται ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης (probability transition matrix), ο οποίος υπολογίζει για κάθε κάλυψη γης την πιθανότητα ύπαρξής της μετά από καθορισμένο αριθμό χρονικών μονάδων. Ο πίνακας αυτός είναι τετραγωνικός με διάσταση 6, όσες και οι καλύψεις γης που έχουμε ορίσει. Οι τιμές των πιθανοτήτων μετάβασης του πίνακα που δίνουν την πιθανότητα κάθε κάλυψης της γης της αρχικής εικόνας (οι αρχικές καλύψεις εκφράζονται με τις γραμμές του πίνακα) να μετασχηματιστεί σε κάποια κάλυψη γης της τελικής εικόνας (οι τελικές καλύψεις γης εκφράζονται με τις στήλες του πίνακα), υπολογίζονται από το λόγο των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στην κάλυψη αυτή στην τελική εικόνα (μετά από ορισμένο αριθμό χρονικών περιόδων) προς τον αριθμό των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στην αρχική εικόνα. Από τον πολλαπλασιασμό κάθε στήλης του πίνακα μετάβασης πιθανοτήτων με τον αριθμό των pixels της αντίστοιχης κατηγορίας κάλυψης γης στην μεταγενέστερη χρονικά εικόνα, προκύπτει ο πίνακας μεταβολών των περιοχών για κάθε κάλυψη γης, που δίνει τον συνολικό αριθμό των pixels που αναμένεται να αλλάξουν από κάθε κατηγορία σε κάθε άλλη κατηγορία κάλυψης, για τον αριθμό των χρονικών περιόδων που ορίστηκε. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται ως είσοδος στην εφαρμογή των κυτταρικών αυτόματων (cellular

automata Markov ή ca_Markov) στην συνέχεια, για να προσδώσει στη μέθοδο Markov χωρική ομογένεια. Η έξοδος της εφαρμογής ca_Markov, δημιουργεί μία πιθανοτική εικόνα για κάθε κάλυψη γης που υπάρχει στην προγενέστερη και τη μεταγενέστερη εικόνα που έχουν χρησιμοποιηθεί (ο αριθμός των κλάσεων κάλυψης γης στην προγενέστερη και μεταγενέστερη εικόνα πρέπει να συμπίπτουν). Για τη δημιουργία του μοντέλου έγινε αφαίρεση από την ανάλυση των περιοχών με υδατική κάλυψη καθώς και των περιοχών σε υψηλό υψόμετρο (> 500 m). Η τελική πιθανοτική εικόνα-αποτέλεσμα της εφαρμογής προσδίδει σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας την πιθανότητα να ανήκει στη συγκεκριμένη κάλυψη γης που εκφράζει η εικόνα αυτή. Η διαδικασία αυτή αρχικά πραγματοποιήθηκε με είσοδο τις ομαδοποιημένες εικόνες του 1998 και 2008 για την εξαγωγή πιθανοτικής εικόνας του 2018, όπου τα αποτελέσματα αποδείχθηκαν αξιόπιστα σύμφωνα με τη διασταύρωση της πιθανοτικής με την πραγματική ομαδοποιημένη εικόνα του 2018. Στη συνέχεια η διαδικασία εφαρμόστηκε με είσοδο των εικόνων του 2008 και 2018, για την εξαγωγή της πιθανοτικής εικόνας χρήσεων γης του 2050.

3.3 Κλιματικό μοντέλο

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ανεπτυγμένο μοντέλο RCM (Regional Climate Model), το οποίο διορθώθηκε, με τη χρήση προσομοιωμένων δεδομένων για θερμοκρασίες και ύψος βροχοπτώσεων για περίοδο 30 χρόνων (1980-2009) και τη διασταύρωση τους με τα πραγματικά ιστορικά ημερήσια δεδομένα, από 69 σταθμούς μέτρησης κατακρημνήσεων και 19 σταθμούς μέτρησης θερμοκρασίας. Για την κατακρήμνιση, η ποσοτική μεθοδολογία χαρτογράφησης Multi-segment Statistical Bias (MSBC) χρησιμοποιήθηκε για διόρθωση των δεδομένων (Grillakis et al., 2013). Η συγκεκριμένη μέθοδος εξετάζει τα διακριτά τμήματα του χώρου της συσσωρευτικής συνάρτησης πυκνότητας και εφαρμόζει τη διόρθωση ποσοτικής χαρτογράφησης ανά τμήμα του χώρου μεμονωμένα. Το μοντέλο RCM, βασίστηκε στις αντιπροσωπευτικές πορείες (μονοπάτια) για τις μελλοντικές συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων (Representative Concentration Pathways – RCPs). Στην παρούσα μελέτη λήφθηκε υπόψη το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, το οποίο ουσιαστικά προβλέπει ότι οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου θα αγγίξουν τη μέγιστη τιμή τους το 2040. Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το συγκεκριμένο μετεωρολογικό μοντέλο, για 13 σταθμούς στο Νομό Χανίων, οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 10.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στον παράγοντα κατακρημνήσεων R της μεθοδολογίας, με τον υπολογισμό του συντελεστή MFI και τελικά των τιμών του πιθανοτικού παράγοντα R για το 2050 (Πίνακας 8). Με την ίδια διαδικασία αναλύθηκαν επίσης χωρικά τα δεδομένα τιμών R, με εισαγωγή στο GIS στο σημειακό shape file των σταθμών και με τη χρήση του αλγόριθμου παρεμβολής kriging.



Εικόνα 10 - Μετεωρολογικοί σταθμοί Διορθωμένων Βροχομετρικών Δεδομένων

Πίνακας 8 - Παράγοντας R50

| | Σταθμοί | Γεωγραφικό Μήκος | Γεωγραφικό Πλάτος | Διάρκεια καταγραφής δεδομένων (χρόνια) | Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm) | MFI | R factor (Sicily) | R factor (Morocco) | R factor |
|----|-------------|------------------|-------------------|--|-----------------------------|--------|-------------------|--------------------|----------|
| 1 | Ταυρωνίτης | 211530,53 | 3935938,96 | 5 | 774,80 | 166,26 | 1783,12 | 565,96 | 1174,54 |
| 2 | Χανιά | 229503,18 | 3934095,86 | 5 | 998,86 | 236,38 | 3087,34 | 959,45 | 2023,39 |
| 3 | Δρακώνα | 207388,72 | 3933106,64 | 5 | 1498,50 | 338,78 | 5412,90 | 1646,22 | 3529,56 |
| 4 | Σούδα | 234342,97 | 3930784,31 | 5 | 841,47 | 179,89 | 2016,36 | 636,97 | 1326,67 |
| 5 | Νεροκούρος | 230790,22 | 3929665,73 | 5 | 1330,46 | 301,69 | 4517,27 | 1383,42 | 2950,34 |
| 6 | Αλικιανός | 219530,71 | 3927467,55 | 5 | 1506,89 | 323,67 | 5040,83 | 1537,26 | 3289,05 |
| 7 | Καλύβες | 242622,94 | 3926687,53 | 5 | 1316,26 | 283,20 | 4092,85 | 1258,21 | 2675,53 |
| 8 | Ζυμβραγός | 205380,05 | 3926141,06 | 5 | 954,92 | 216,05 | 2683,26 | 838,38 | 1760,82 |
| 9 | Γαβαλοχώρι | 246531,74 | 3923813,29 | 5 | 1577,74 | 344,41 | 5553,69 | 1687,37 | 3620,53 |
| 10 | Βάμος | 245275,99 | 3921742,78 | 5 | 2509,18 | 546,21 | 11403,42 | 3370,12 | 7386,77 |
| 11 | Κάντανος | 203479,64 | 3914070,19 | 5 | 630,75 | 160,45 | 1686,83 | 536,54 | 1111,69 |
| 13 | Αμμουδάριον | 243124,97 | 3908763,54 | 5 | 1742,88 | 415,84 | 7452,11 | 2238,70 | 4845,41 |
| 14 | Παλαιόχωρα | 197894,52 | 3903315,31 | 5 | 855,31 | 205,63 | 2484,08 | 778,45 | 1631,26 |

3.4 Σενάρια Ανάλυσης

Η εφαρμογή της εξίσωσης RUSLE πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου raster calculator σε περιβάλλον GIS για τα παρακάτω τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

- Για τη συνολική περιοχή μελέτης, δηλαδή για τις υδρολογικές λεκάνες του Ακρωτηρίου, των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη για το έτος 2018. Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.1 του Παραρτήματος.
- Για τη συνολική περιοχή μελέτης, δηλαδή για τις υδρολογικές λεκάνες του Ακρωτηρίου, των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή C (C50) που εξάχθηκε από την πιθανοτική εικόνα χρήσεων γης του 2050 και του συντελεστή R (R50) που εξάχθηκε από το κλιματικό μοντέλο για το 2050 (**Κίτρινο Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.2 του Παραρτήματος.
- Για τη συνολική περιοχή μελέτης, δηλαδή για τις υδρολογικές λεκάνες του Ακρωτηρίου, των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή C (C50) που εξάχθηκε από την πιθανοτική εικόνα χρήσεων γης του 2050 και του συντελεστή R που εξάχθηκε από τα μετεωρολογικά δεδομένα, κάνοντας υπόθεση ότι η κλιματική κατάσταση παραμένει σταθερή από το 2018 (**Πράσινο Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.4 του Παραρτήματος.
- Για τη συνολική περιοχή μελέτης, δηλαδή για τις υδρολογικές λεκάνες του Ακρωτηρίου, των Βρυσών, των Δελιανών και του Κερίτη για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή R (R50) που εξάχθηκε από το κλιματικό μοντέλο για το 2050 και του συντελεστή C που εξάχθηκε από την ομαδοποιημένη εικόνα του 2018, κάνοντας υπόθεση ότι οι χρήσεις γης παραμένουν σταθερές από το 2018 (**Μοβ Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.3 του Παραρτήματος.

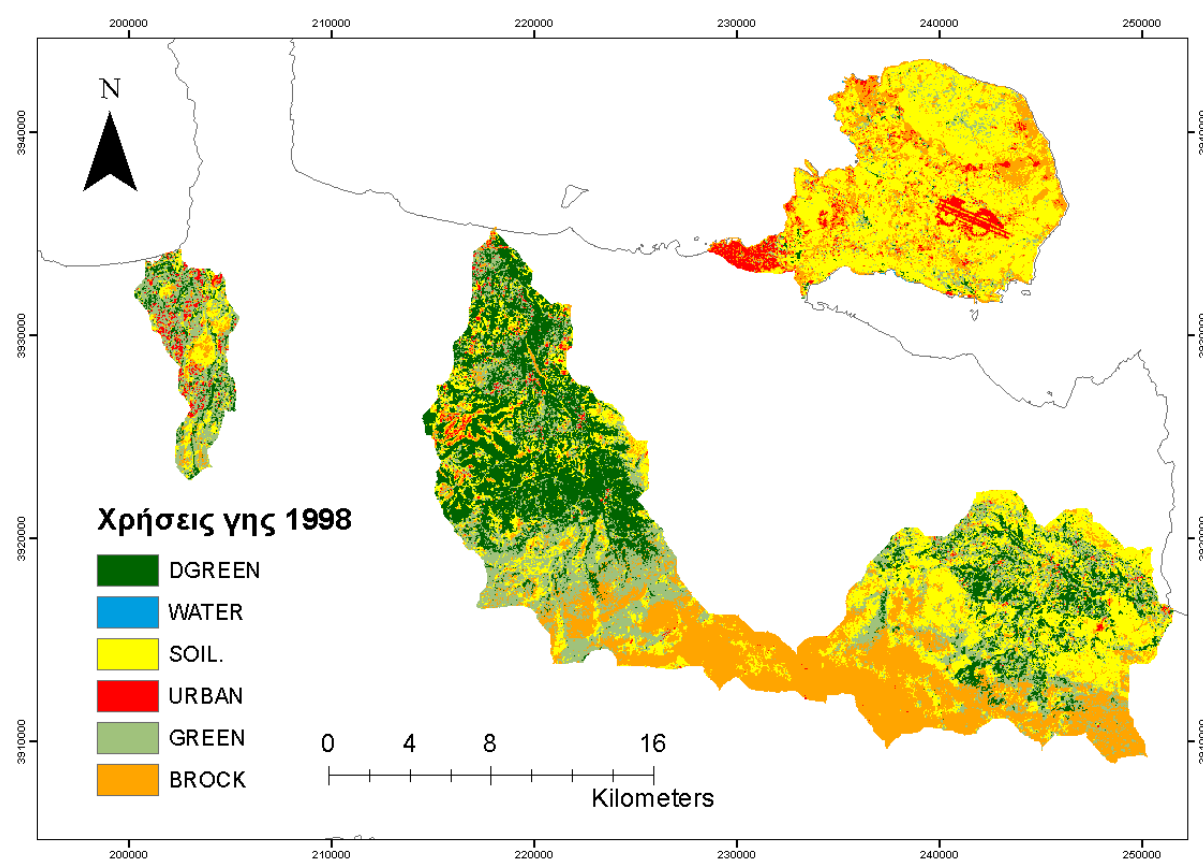
Οι παραπάνω διαδικασίες εφαρμόστηκαν με τον συντελεστή διαβρωσιμότητας K (K_H) όπως υπολογίστηκε από τη δειγματοληψία, για την περιοχή του Ακρωτηρίου και εναλλάσσοντας τις παραμέτρους C και R, όμοια με τις διαδικασίες-σενάρια που εφαρμόσαμε στη συνολική περιοχή μελέτης, δηλαδή:

- Για την περιοχή του Ακρωτηρίου, με χρήση του συντελεστή ΚΗ για το έτος 2018. Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.5 του Παραρτήματος.
- Για την περιοχή του Ακρωτηρίου, με χρήση του συντελεστή ΚΗ, για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή C που εξάχθηκε από την πιθανοτική εικόνα χρήσεων γης του 2050 και του συντελεστή R που εξάχθηκε από το κλιματικό μοντέλο για το 2050. (**Κίτρινο Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.6 του Παραρτήματος.
- Για την περιοχή του Ακρωτηρίου, με χρήση του συντελεστή ΚΗ, για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή C που εξάχθηκε από την πιθανοτική εικόνα χρήσεων γης του 2050 και του συντελεστή R που εξάχθηκε από τα μετεωρολογικά δεδομένα, κάνοντας υπόθεση ότι η κλιματική κατάσταση παραμένει σταθερή από το 2018 (**Πράσινο Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.8 του Παραρτήματος.
- Για την περιοχή του Ακρωτηρίου, με χρήση του συντελεστή ΚΗ, για το έτος 2050, με χρήση του συντελεστή R που εξάχθηκε από το κλιματικό μοντέλο για το 2050 και του συντελεστή C που εξάχθηκε από την ομαδοποιημένη εικόνα του 2018, κάνοντας υπόθεση ότι οι χρήσεις γης παραμένουν σταθερές από το 2018 (**Μοβ Σενάριο**). Το Διάγραμμα Ροής του σεναρίου αυτού παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.7 του Παραρτήματος.

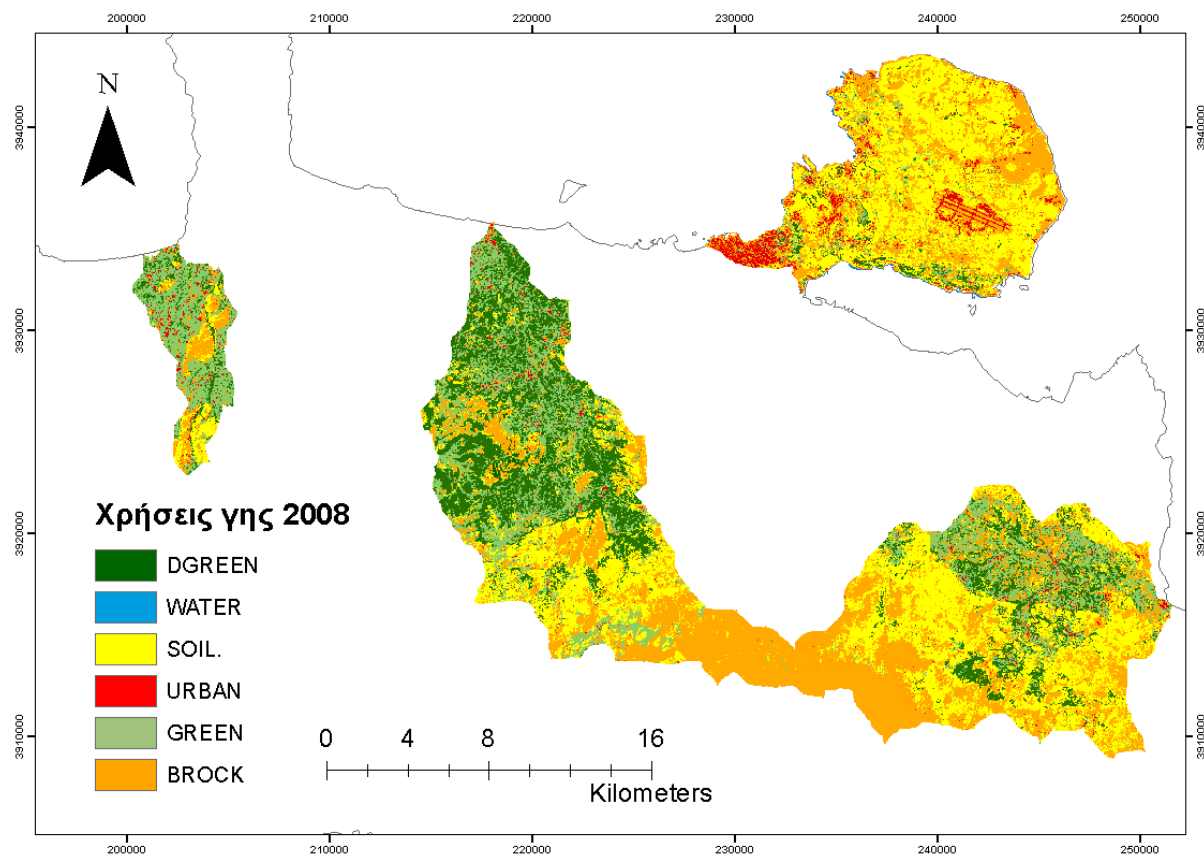
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Φασματική Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων – Supervised Classification

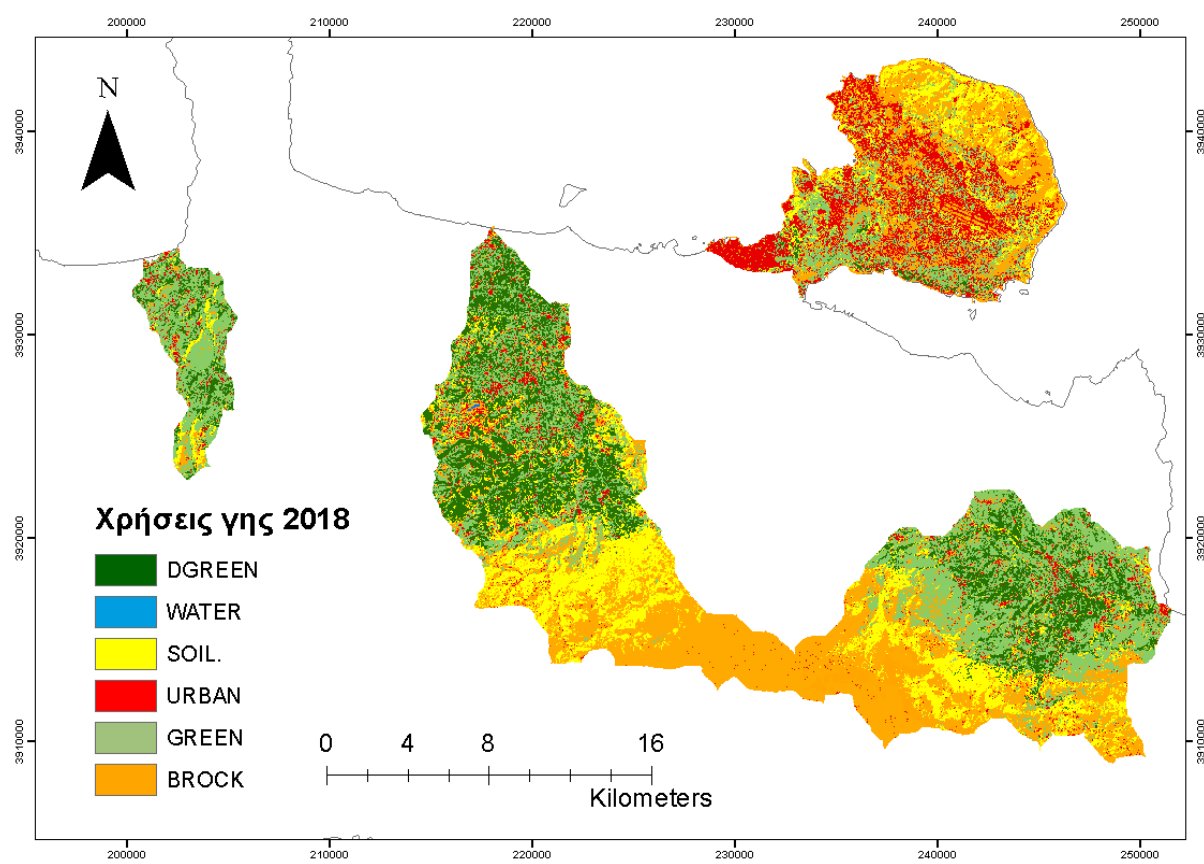
Η διαδικασία εξαγωγής ταξινομημένου χάρτη, για τις δορυφορικές εικόνες του 1998, 2008 και 2018 σύμφωνα με τις χρήσεις γης, πραγματοποιήθηκε μέσω Επιβλεπόμενης Φασματικής Ταξινόμησης, και παρουσιάζονται οι ομαδοποιημένες εικόνες για τα έτη 1998, 2008 και 2018 στις Εικόνες 11,12 και 13 αντίστοιχα. Οι εικόνες ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τις κλάσεις που φαίνονται στον Πίνακα 7, όπως περιγράφεται και στη Μεθοδολογία.



Εικόνα 11 - Χρήσεις Γης 1998



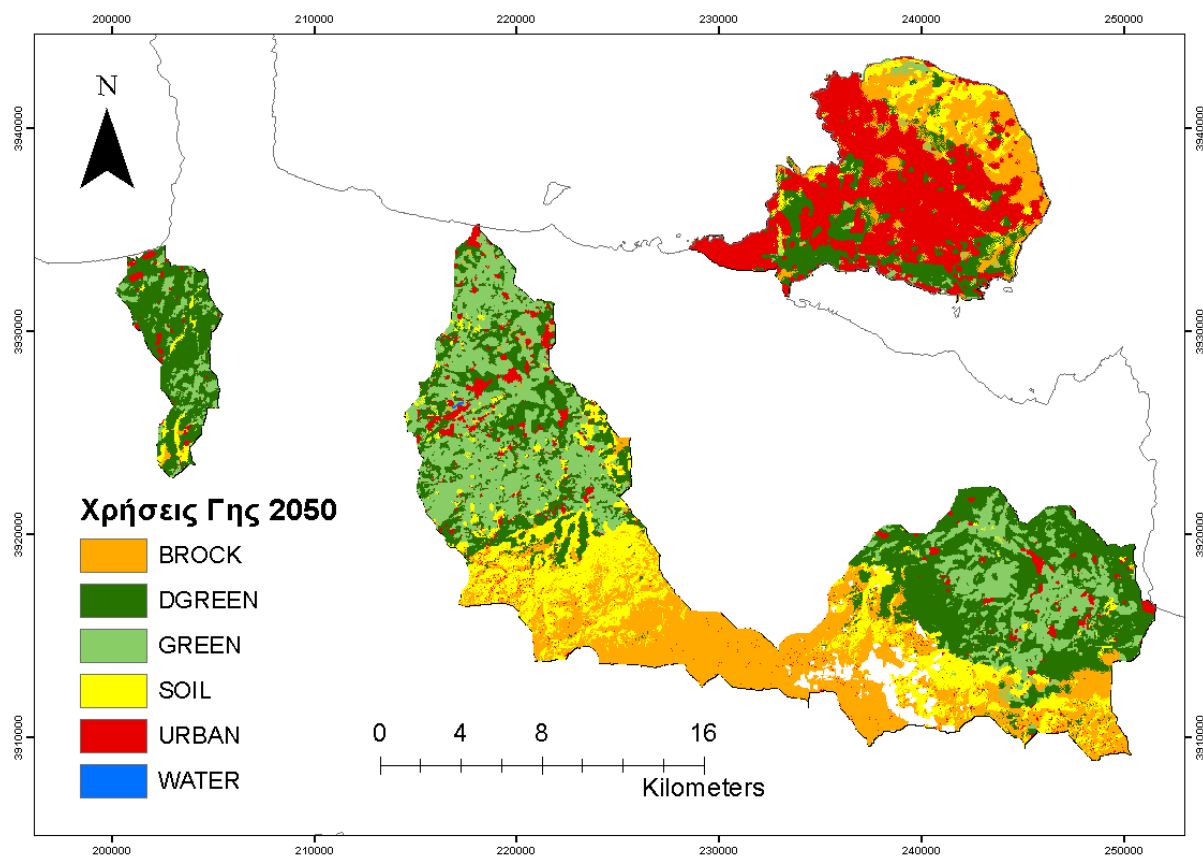
Εικόνα 12 - Χρήσεις Γης 2008



Εικόνα 13 - Χρήσεις Γης 2018

4.2 Μοντέλο Land Use Land Change

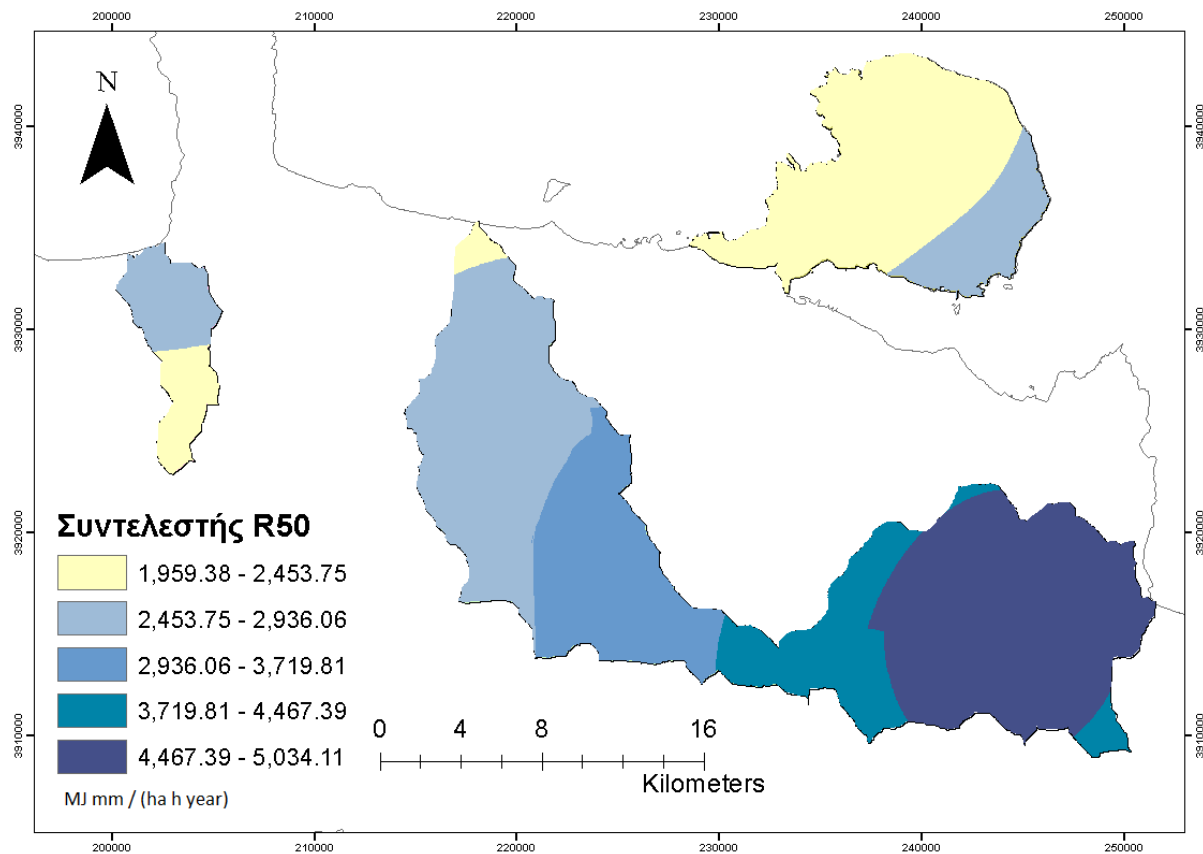
Ο πιθανοτικός χάρτης χρήσεων γης για το έτος 2050, που εξάχθηκε από το μοντέλο LULC με τη χρήση των φασματικά ταξινομημένων εικόνων του 2008 και του 2018 (Εικόνες 12 και 13 αντίστοιχα), παρουσιάζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14 - Πιθανοτικός Χάρτης Χρήσεων Γης 2050

4.3 Κλιματικό μοντέλο

Τα πιθανοτικά βροχομετρικά δεδομένα για το έτος 2050 που εξάχθηκαν από το Διορθωμένο Κλιματικό μοντέλο, μετά από επεξεργασία για τον υπολογισμό του συντελεστή R50, δηλαδή του συντελεστή R του μοντέλου RUSLE για το Κίτρινο και το Μοβ σενάριο, παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.

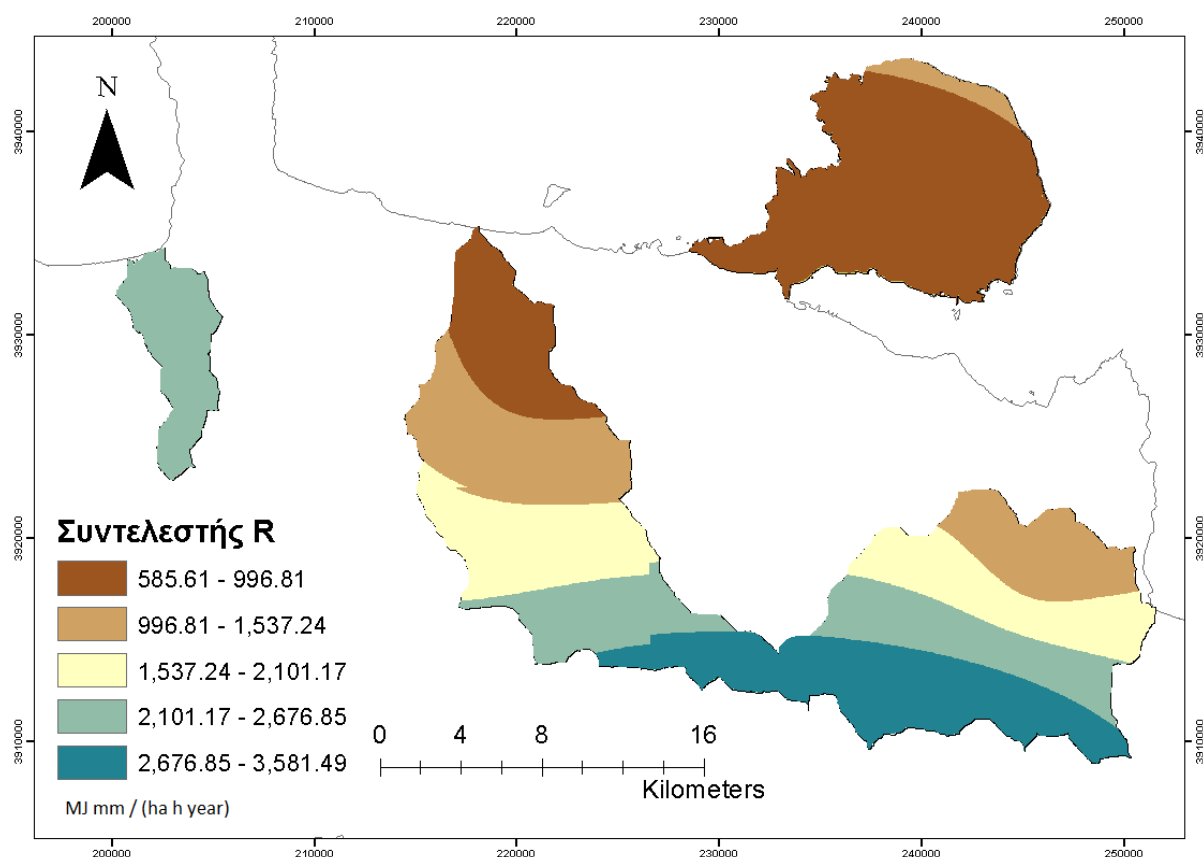


Εικόνα 15 - Συντελεστής R50

4.4 Μοντέλο RUSLE

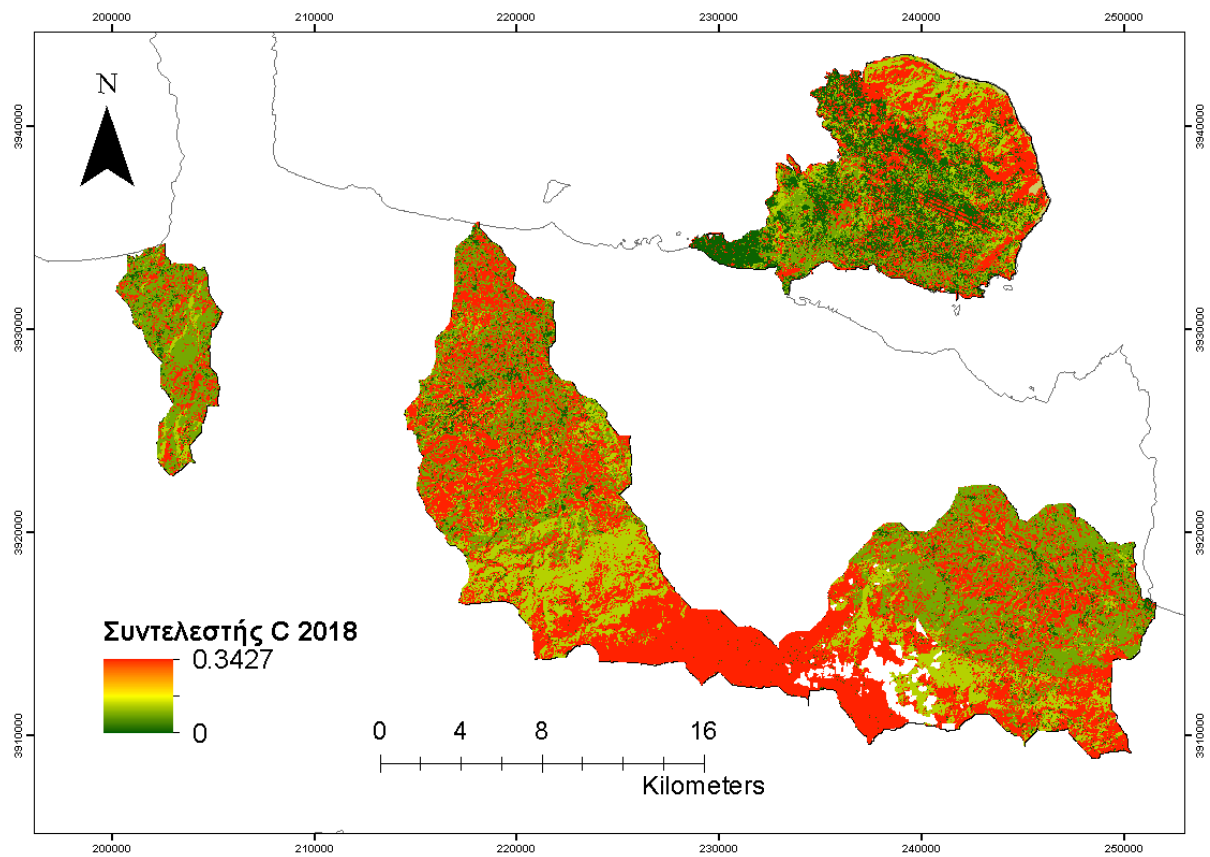
4.4.1 Συντελεστής R

Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων του μοντέλου RUSLE, για τις εδαφικές απώλειες του 2018 και για τα μελλοντικά σενάρια που αξιολογήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν ο συντελεστής R που εξάχθηκε από τα βροχομετρικά δεδομένα του ιστοτόπου meteo, για το 2018 (Εικόνα 16) και ο συντελεστής R50, από το διορθωμένο κλιματικό μοντέλο (Εικόνα 14).

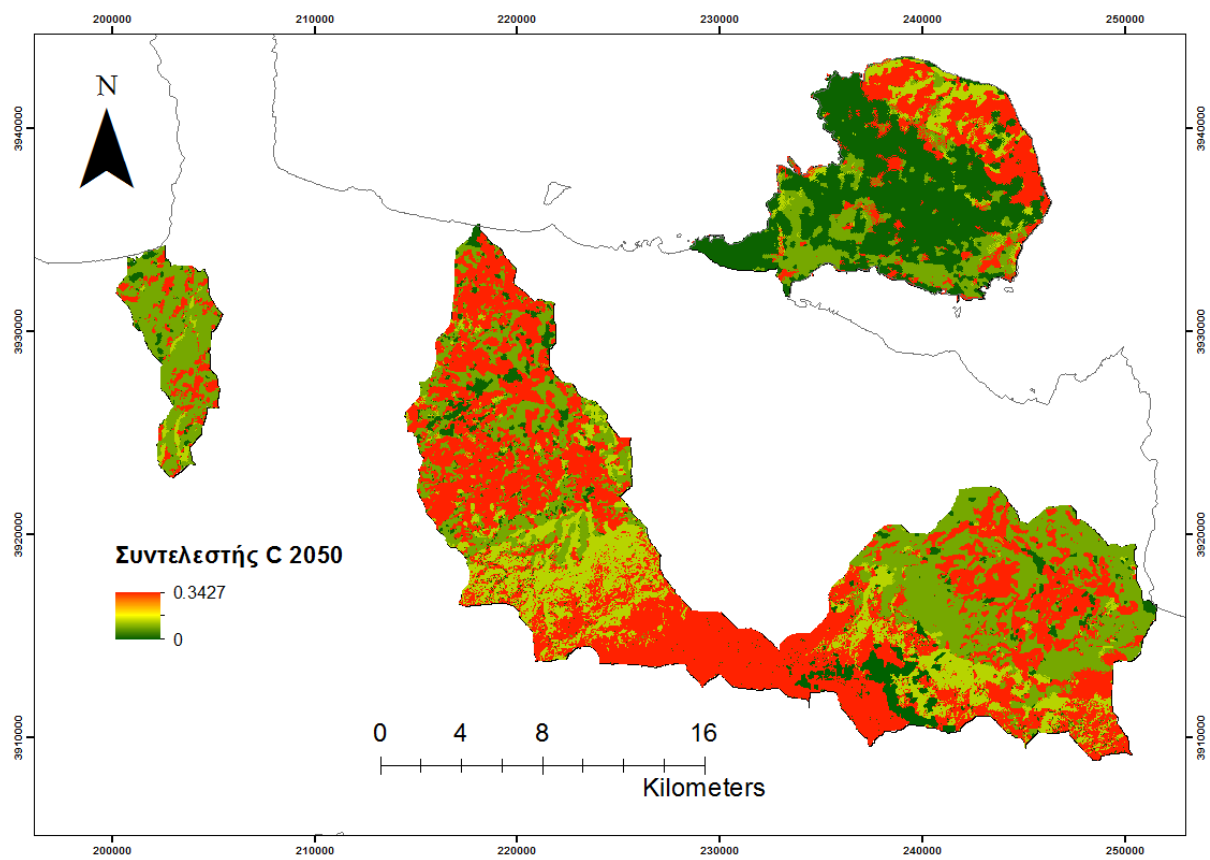


4.4.2 Συντελεστής C

Ο χάρτης του συντελεστή C του μοντέλου για το 2018, εκπονήθηκε από τη φασματικά ταξινομημένη εικόνα χρήσεων γης του 2018, ενώ ο χάρτης του συντελεστή C για το 2050 εξάχθηκε από τον πιθανοτικό χάρτη χρήσεων γης του 2050, που προέκυψε από το μοντέλο LULC, και παρουσιάζονται στις Εικόνες 17 και 18 αντίστοιχα.



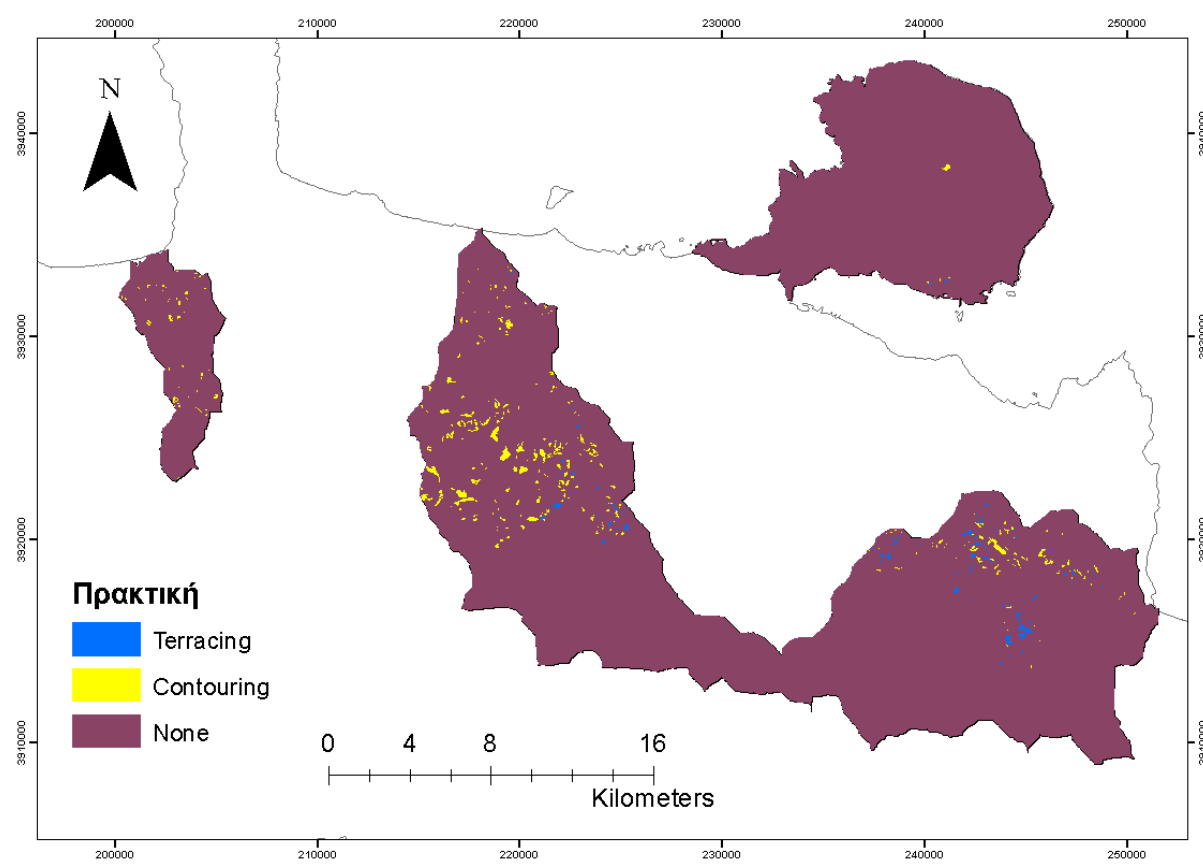
Εικόνα 67 - Συντελεστής C 2018



Εικόνα 78 - Συντελεστής C 2050

4.4.3 Συντελεστής P

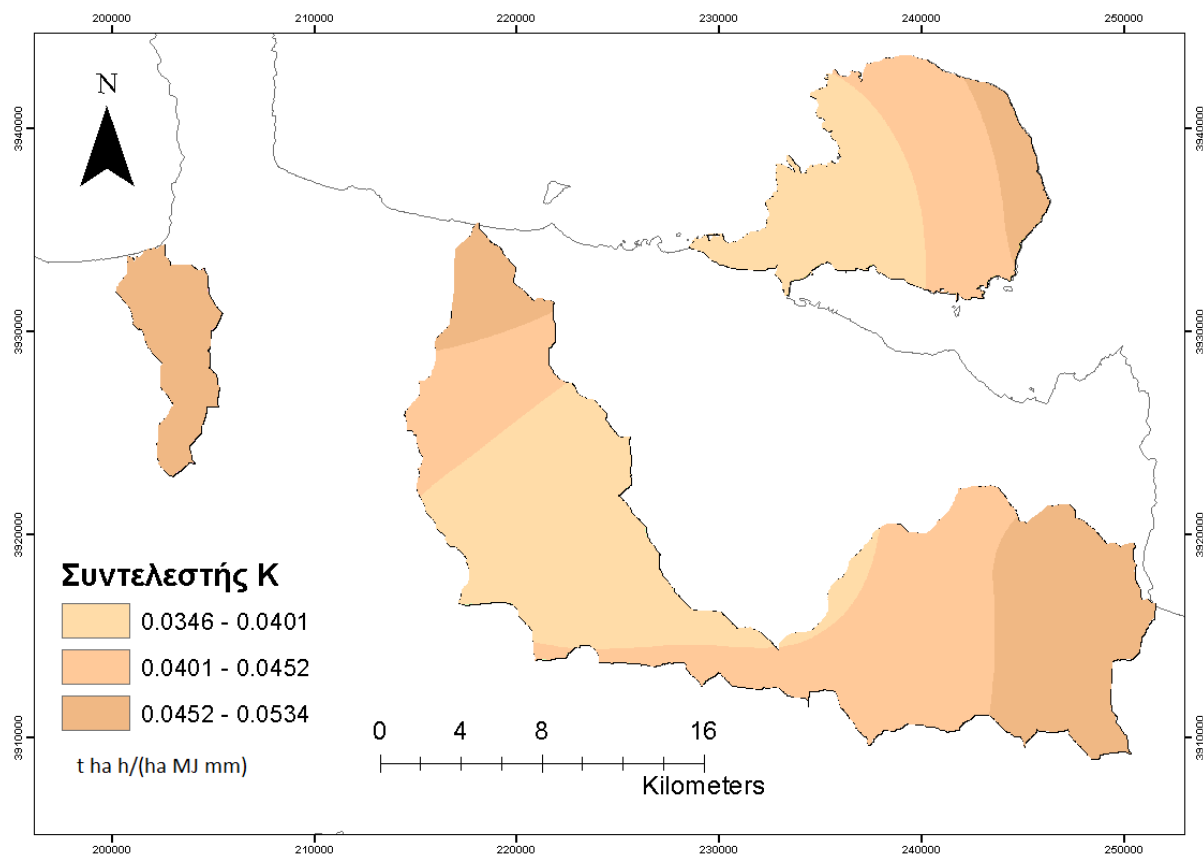
Ο χάρτης που αφορά τις πρακτικές προστασίας του εδάφους εκπονήθηκε με οπτική παρατήρηση όπου σκιαγραφήθηκαν οι περιοχές με πολύγωνα για κάθε πρακτική (περιφραγμένη καλλιέργεια – **Terracing** με τιμή **0,9676**, διαστρωματική καλλιέργεια – **Contouring** με τιμή **0,9939**) και στη συνέχεια τους ανατέθηκαν οι τιμές P, όπως περιγράφεται στη μεθοδολογία. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ο χάρτης με τις οριοθετημένες περιοχές που εφαρμόζονται πρακτικές προστασίας.



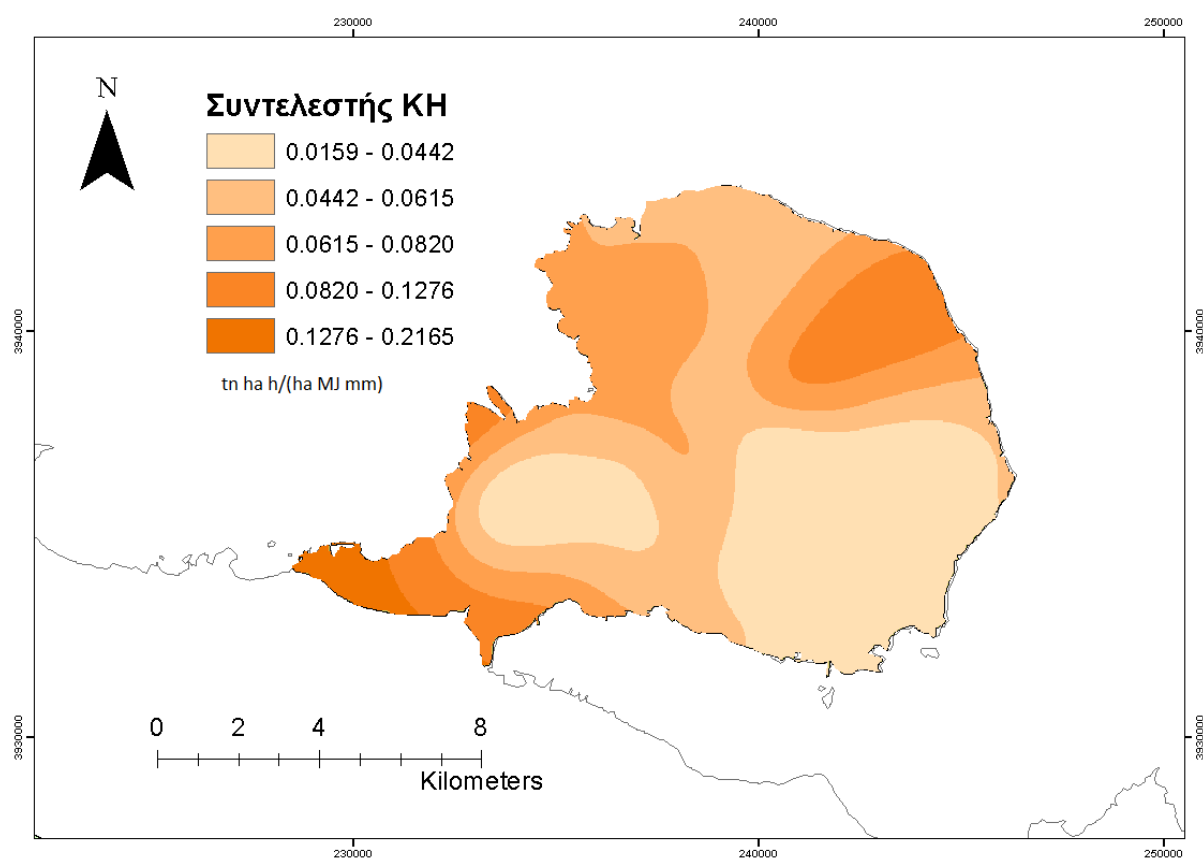
Εικόνα 89 - Συντελεστής P

4.4.4 Συντελεστής K

Ο συντελεστής K για τη συνολική περιοχή μελέτης φαίνεται στην Εικόνα 20, όπως εξάχθηκε από τα δεδομένα της βιβλιογραφίας (Μεθοδολογία). Για την περιοχή του Ακρωτηρίου εξάχθηκε ακόμα ένας χάρτης συντελεστή K_H, από τα δεδομένα δειγματοληψίας (Εικόνα 21).



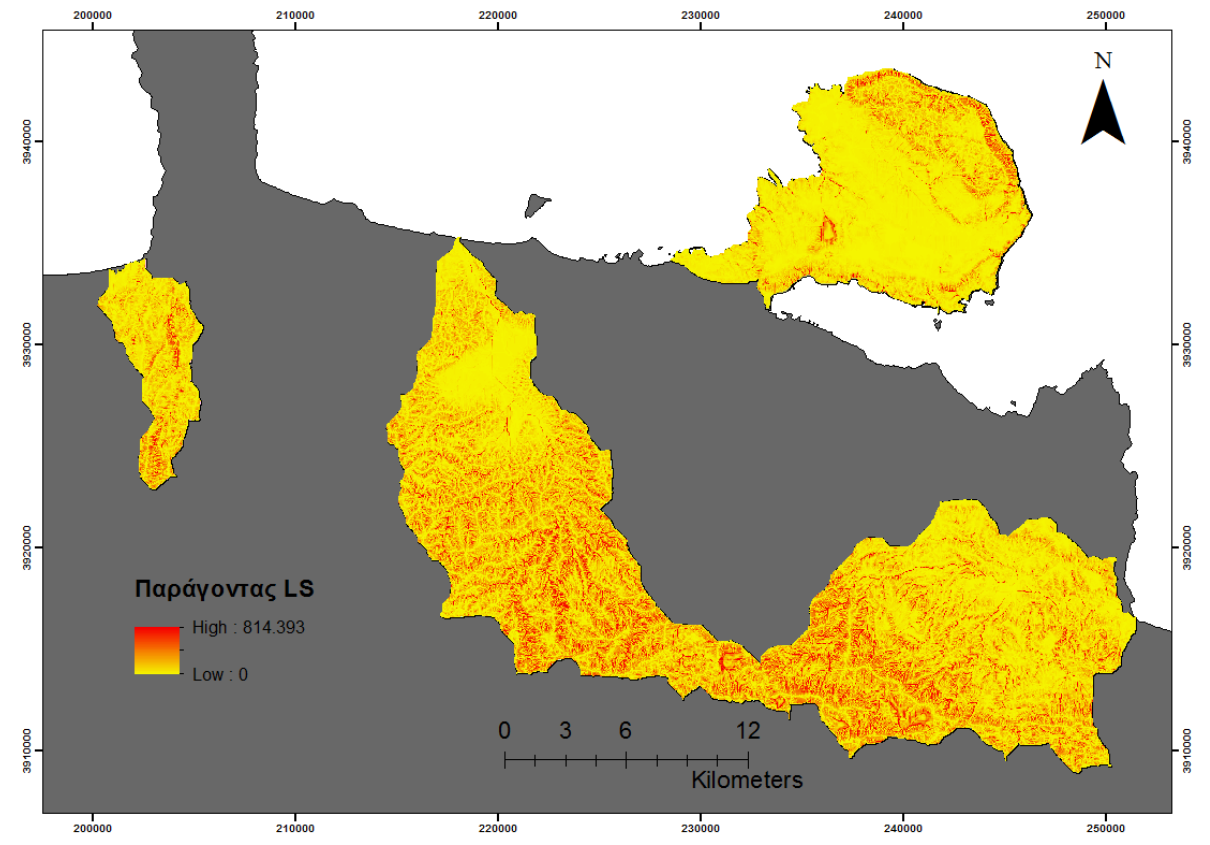
Εικόνα 209 - Συντελεστής K, Συνολική Περιοχή Μελέτης



Εικόνα 21 - Συντελεστής KH, Λεκάνη Ακρωτηρίου

4.4.5 Συντελεστής LS

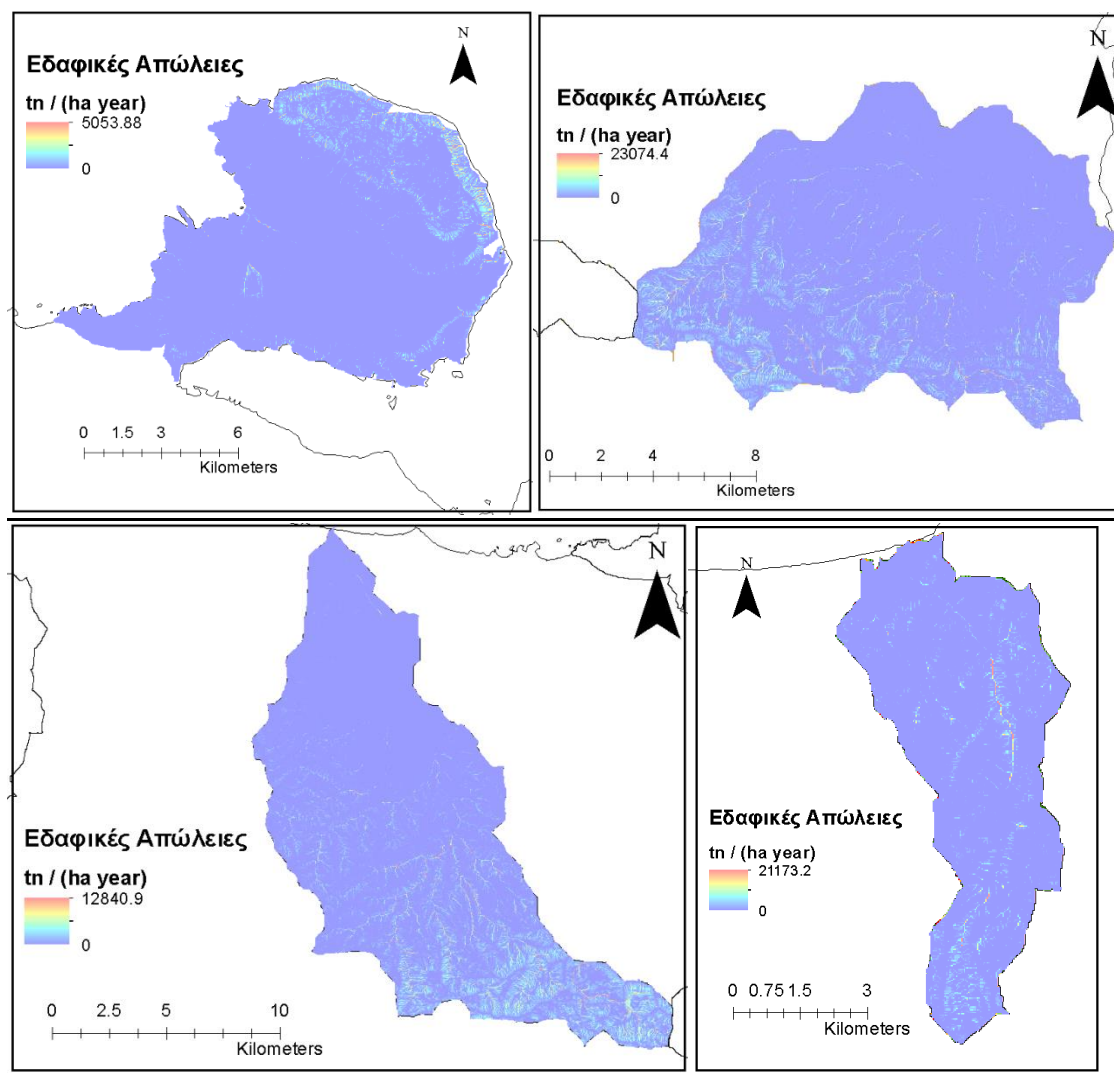
Ο χάρτης συντελεστή LS του μοντέλου RUSLE, παρουσιάζεται στην Εικόνα 22, όπως εξάχθηκε μετά από επεξεργασία που περιγράφεται στη Μεθοδολογία, από το αρχείο DEM.



Εικόνα 22 - Συντελεστής LS

4.4.6 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2018

Τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE για το 2018, για τις 4 υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 23. Οι υψηλότερες τιμές απωλειών που αναγράφονται στους χάρτες δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και οφείλονται σε σφάλματα στη διαδικασία. Στον Πίνακα 9, αναγράφονται οι μέσες εδαφικές απώλειες για κάθε λεκάνη.



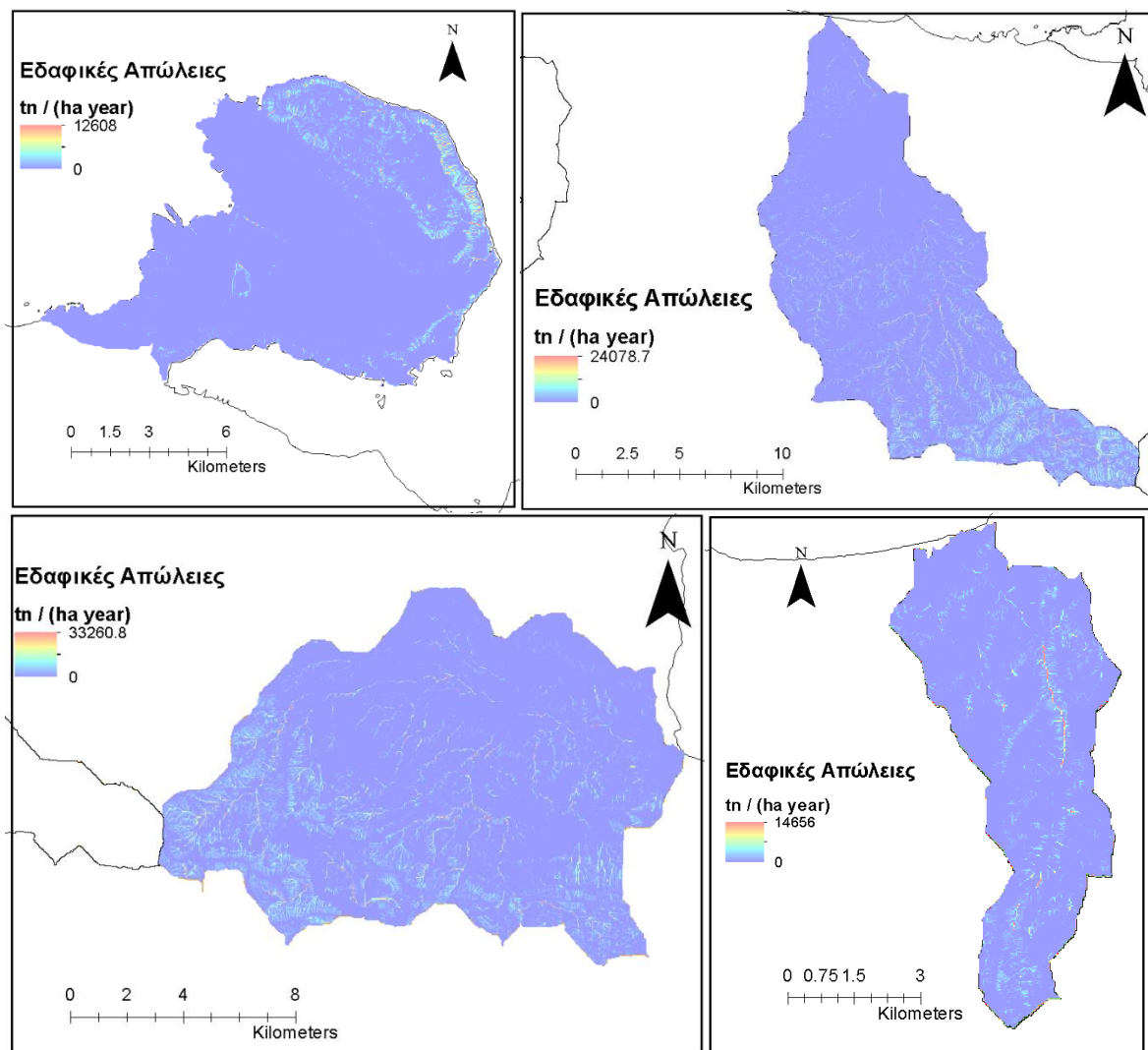
Εικόνα 23 - RUSLE 2018

Πίνακας 9 - RUSLE 2018, Μέσες Εδαφικές Απώλειες

| RUSLE 2018 | |
|--------------------------|--|
| Λεκάνη | Μέσες Εδαφικές Απώλειες tn/ (ha year) |
| Ακρωτήρι | 163.982 |
| Δελιανά | 969.923 |
| Κερίτης | 834.217 |
| Βρύσες | 1126.880 |
| Συνολική Περιοχή Μελέτης | 803.495 |

4.4.7 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Κίτρινο Σενάριο)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE για το 2050 – Κίτρινο Σενάριο, όπου συνδυάστηκαν οι μελλοντικοί συντελεστές C (C50) και R (R50) για την εκπόνηση του πιθανοτικού χάρτη εδαφικών απωλειών, παρουσιάζονται στην Εικόνα 24. Οι υψηλότερες τιμές απωλειών που αναγράφονται στους χάρτες δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και οφείλονται σε σφάλματα στη διαδικασία. Στον Πίνακα 10, παρουσιάζονται οι μέσες εδαφικές απώλειες της περιοχής μελέτης για το σενάριο αυτό.



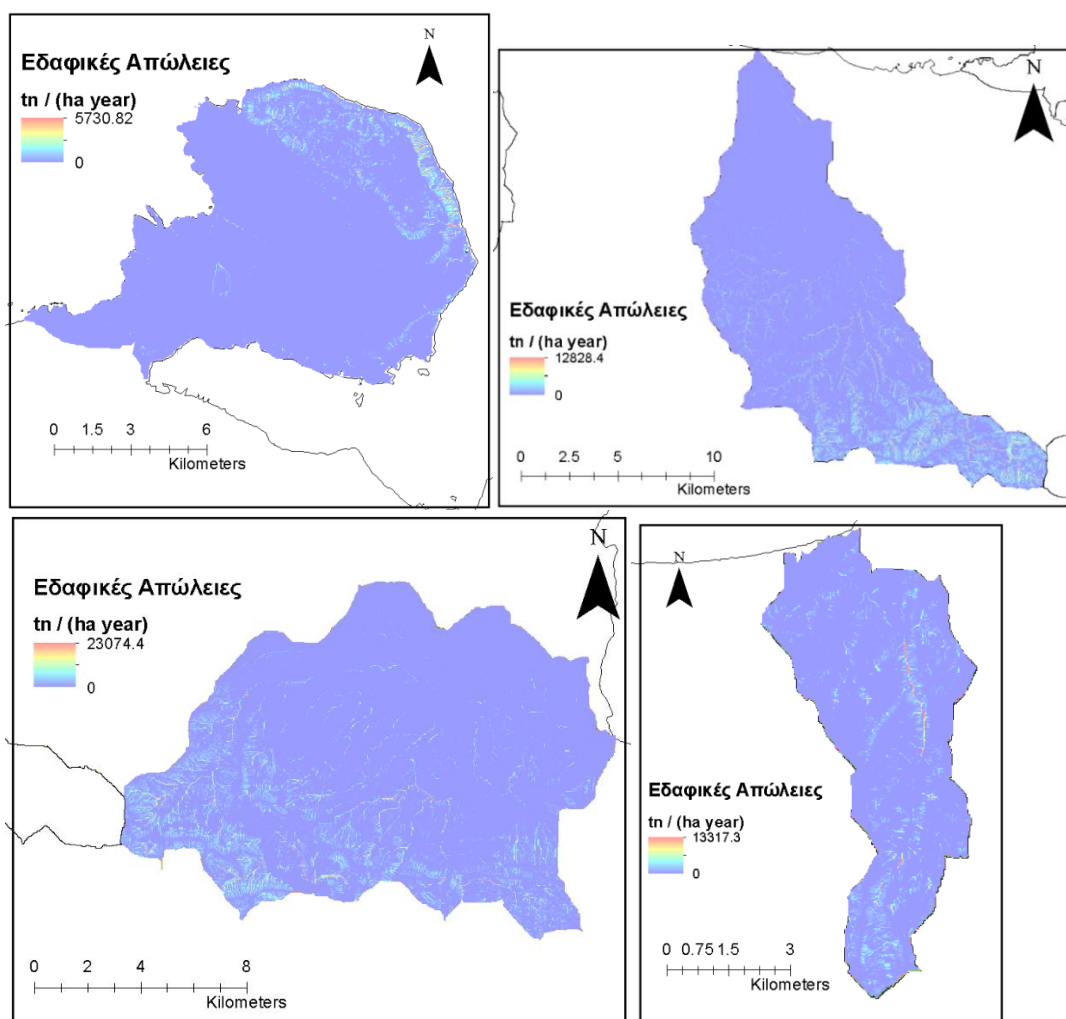
Εικόνα 24 - RUSLE 2050 - Κίτρινο Σενάριο

Πίνακας 10 - RUSLE 2050 (Κίτρινο), Μέσες Εδαφικές Απώλειες

| RUSLE 2050 - Κίτρινο Σενάριο | |
|------------------------------|--|
| Λεκάνη | Μέσες Εδαφικές Απώλειες tn/ (ha year) |
| Ακρωτήριο | 637.016 |
| Δελιανά | 918.687 |
| Κερίτης | 1340.501 |
| Βρύσες | 2082.999 |
| Συνολική Περιοχή Μελέτης | 1428.925 |

4.4.8 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Πράσινο Σενάριο)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE για το 2050 (Πράσινο Σενάριο), παρουσιάζονται ως χάρτης εδαφικών απωλειών για τις υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης στην Εικόνα 25. Οι υψηλότερες τιμές απωλειών που αναγράφονται στους χάρτες δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και οφείλονται σε σφάλματα στη διαδικασία. Στο μελλοντικό σενάριο αυτό, λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής C 2050 και ο συντελεστής R του 2018. Οι μέσες εδαφικές απώλειες παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.



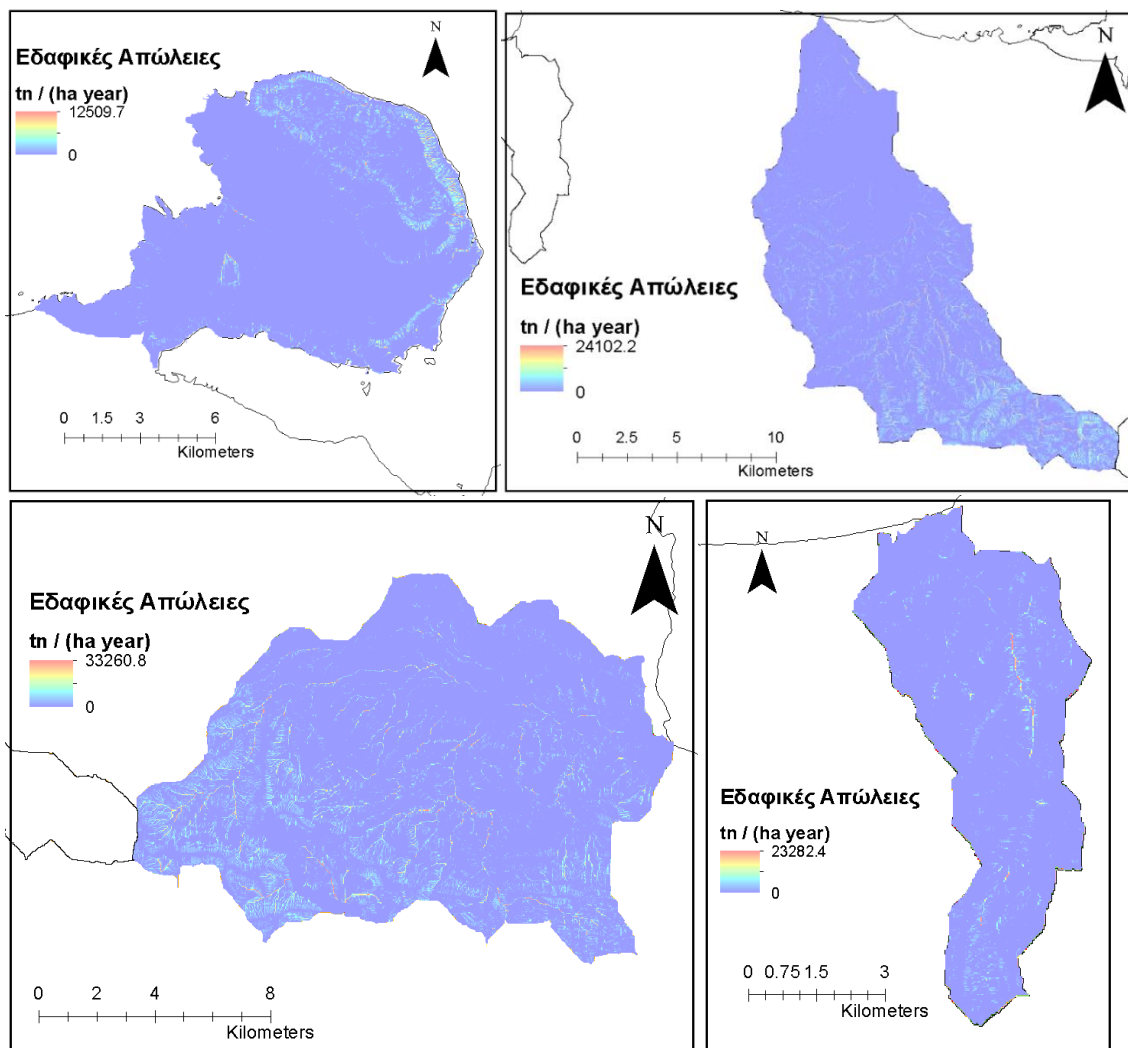
Εικόνα 105 - RUSLE 2050 - Πράσινο Σενάριο

Πίνακας 11 - RUSLE 2050 (Πράσινο), Μέσες Εδαφικές Απώλειες

| RUSLE 2050 - Πράσινο Σενάριο | |
|------------------------------|--|
| Λεκάνη | Μέσες Εδαφικές Απώλειες tn/ (ha year) |
| Ακρωτήρι | 488.879 |
| Δελιανά | 952.408 |
| Κερίτης | 1338.655 |
| Βρύσες | 2024.363 |
| Συνολική Περιοχή Μελέτης | 1401.297 |

4.4.9 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE 2050 (Μοβ Σενάριο)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE για το Μοβ Σενάριο του 2050, όπου χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής βροχοπτώσεων R50 και ο συντελεστής χρήσεων γης C του 2018, παρουσιάζονται στην Εικόνα 26. Οι υψηλότερες τιμές απωλειών που αναγράφονται στους χάρτες δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και οφείλονται σε σφάλματα στη διαδικασία. Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται οι μέσες εδαφικές απώλειες ανά λεκάνη.



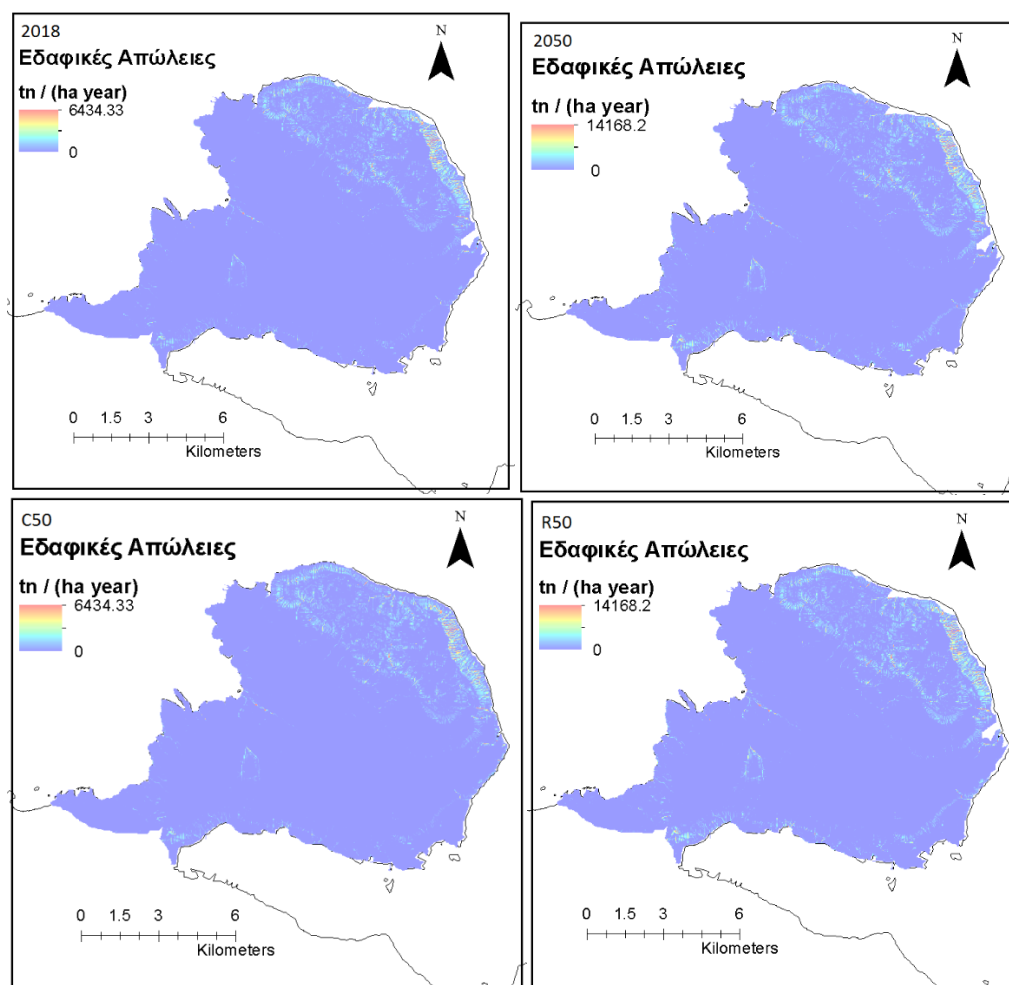
Εικόνα 11 - RUSLE 2050 - Μοβ Σενάριο

Πίνακας 12 - RUSLE 2050 (Μοβ), Μέσες Εδαφικές Απώλειες

| RUSLE 2050 - Μοβ Σενάριο | |
|--------------------------|---|
| Λεκάνη | Μέσες Εδαφικές Απώλειες tn / (ha year) |
| Ακρωτήρι | 231.855 |
| Δελιανά | 963.380 |
| Κερίτης | 848.322 |
| Βρύσες | 1168.334 |
| Συνολική Περιοχή Μελέτης | 840.129 |

4.4.10 Αποτελέσματα μοντέλου RUSLE – Λεκάνη Ακρωτηρίου, ΚΗ

Τα αποτελέσματα του μοντέλου RUSLE για τη λεκάνη του Ακρωτηρίου, με χρήση του συντελεστή ΚΗ (Κ Δειγματοληψίας), για το 2018 και το Κίτρινο (στην εικόνα αναγράφεται ως 2050), το Πράσινο (στην εικόνα αναγράφεται ως C50) και το Μοβ Σενάριο (στην εικόνα παρουσιάζεται ως R50), παρουσιάζονται στην Εικόνα 27. Οι υψηλότερες τιμές απωλειών που αναγράφονται στους χάρτες δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και οφείλονται σε σφάλματα στη διαδικασία. Στον Πίνακα 13, φαίνονται οι μέσες εδαφικές απώλειες της περιοχής για κάθε σενάριο.



Εικόνα 12 - RUSLE, Ακρωτήρι με ΚΗ

Πίνακας 13 - RUSLE ΚΗ, Λεκάνη Ακρωτηρίου, Μέσες Εδαφικές Απώλειες

| Ακρωτήρι με ΚΗ | |
|----------------|---------------------------------------|
| Σενάρια | Μέσες Εδαφικές Απώλειες tn/ (ha year) |
| 2018 | 232.259 |
| Κίτρινο | 958.264 |
| Μοβ | 357.768 |
| Πράσινο | 683.635 |

4.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα μοντέλων LULC και RUSLE

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των μοντέλων LULC και RUSLE ανά υδρολογική λεκάνη της περιοχής μελέτης ανά χρήση γης. Στο αριστερό σκέλος του Πίνακα, φαίνονται οι μεταβολές χρήσεων γης, από το 1998 (LU98), μέχρι και το 2050 πιθανοτικά (LU50) για κάθε λεκάνη. Σε κάθε στήλη περιγράφεται ο καταμερισμός της περιοχής, σε km², ανά χρήση γης. Στο δεξί σκέλος του πίνακα παρουσιάζονται οι εδαφικές απώλειες, σε tn / ha year⁻¹, ανά χρήση γης για κάθε λεκάνη, σύμφωνα με το ανάλογο σενάριο που εξετάστηκε.

Πίνακας 13 - Αριθμητικά Αποτελέσματα LULC και RUSLE

| LULC - Μεταβολές χρήσεων γης | | | | | | RUSLE - Εδαφικές Απώλειες | | | | | |
|------------------------------|----------|-----------------|--------|--------|--------|---------------------------|----------|----------------------------|---------|---------|---------|
| L | Ακρωτήρι | km ² | | | | R | Ακρωτήρι | tn / ha year ⁻¹ | | | |
| | | LU98 | LU08 | LU18 | LU50 | | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 1 | URBAN | 9,493 | 9,595 | 38,108 | 65,070 | 1 | URBAN | 6,578 | 17,925 | 5,650 | 20,842 |
| 2 | DGREEN | 1,177 | 3,387 | 1,891 | 2,548 | 2 | DGREEN | 39,679 | 171,203 | 56,971 | 147,795 |
| 3 | GREEN | 6,234 | 4,951 | 23,861 | 21,519 | 3 | GREEN | 12,151 | 50,911 | 14,758 | 41,518 |
| 4 | SOIL | 74,961 | 64,309 | 19,976 | 10,215 | 4 | SOIL | 41,312 | 148,398 | 61,355 | 104,337 |
| 5 | BROCK | 30,095 | 39,291 | 36,920 | 22,721 | 5 | BROCK | 64,262 | 248,580 | 93,120 | 174,387 |
| | | | | | | | | | | | |
| Δελιανά | | | | | | Δελιανά | | | | | |
| | | LU98 | LU08 | LU18 | LU50 | | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 6 | URBAN | 9,493 | 1,588 | 1,976 | 1,340 | 6 | URBAN | 48,862 | 60,813 | 59,192 | 80,939 |
| 7 | DGREEN | 4,897 | 3,609 | 5,850 | 5,582 | 7 | DGREEN | 229,475 | 225,049 | 217,811 | 193,575 |
| 8 | GREEN | 14,267 | 15,970 | 18,568 | 21,831 | 8 | GREEN | 115,353 | 125,878 | 122,146 | 193,919 |
| 9 | SOIL | 6,106 | 4,095 | 2,487 | 1,524 | 9 | SOIL | 186,378 | 185,748 | 196,917 | 184,954 |
| 10 | BROCK | 2,684 | 5,304 | 1,689 | 0,297 | 10 | BROCK | 389,855 | 321,200 | 367,315 | 299,021 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κερίτης | | | | | | Κερίτης | | | | | |
| | | LU98 | LU08 | LU18 | LU50 | | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 11 | URBAN | 2,535 | 1,805 | 8,650 | 8,419 | 11 | URBAN | 31,658 | 56,823 | 28,018 | 62,679 |
| 12 | DGREEN | 63,544 | 49,978 | 43,876 | 57,257 | 12 | DGREEN | 126,755 | 245,055 | 116,236 | 263,738 |
| 13 | GREEN | 45,352 | 41,218 | 36,813 | 34,956 | 13 | GREEN | 60,588 | 129,884 | 65,566 | 124,622 |
| 14 | SOIL | 27,399 | 33,827 | 37,600 | 33,050 | 14 | SOIL | 160,647 | 268,499 | 175,535 | 249,728 |
| 15 | BROCK | 34,856 | 43,646 | 46,673 | 39,935 | 15 | BROCK | 423,093 | 582,333 | 436,720 | 568,879 |
| | | | | | | | | | | | |
| Βρύσες | | | | | | Βρύσες | | | | | |
| | | LU98 | LU08 | LU18 | LU50 | | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 16 | URBAN | 1,031 | 1,987 | 6,327 | 4,446 | 16 | URBAN | 67,975 | 150,730 | 73,924 | 139,832 |
| 17 | DGREEN | 21,883 | 18,295 | 24,804 | 29,141 | 17 | DGREEN | 165,815 | 427,851 | 165,224 | 425,616 |
| 18 | GREEN | 30,793 | 21,444 | 52,574 | 59,363 | 18 | GREEN | 76,941 | 175,371 | 73,843 | 185,470 |
| 19 | SOIL | 55,943 | 57,365 | 23,746 | 20,812 | 19 | SOIL | 284,883 | 492,727 | 304,086 | 471,742 |
| 20 | BROCK | 50,683 | 54,127 | 45,113 | 38,809 | 20 | BROCK | 531,268 | 836,319 | 551,258 | 801,703 |
| | | | | | | | | | | | |

| | Περιοχή Μελέτης | km ² | | | | | Περιοχή Μελέτης | tn / ha year ⁻¹ | | | |
|----|--------------------|-----------------|---------|---------|---------|----|--------------------|----------------------------|---------|---------|---------|
| | | LU98 | LU08 | LU18 | LU50 | | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 21 | URBAN | 15,702 | 15,009 | 55,147 | 79,427 | 21 | URBAN | 17,671 | 30,214 | 12,808 | 42,003 |
| 22 | DGREEN | 91,616 | 75,360 | 76,511 | 94,647 | 22 | DGREEN | 146,903 | 301,292 | 137,956 | 313,963 |
| 23 | GREEN | 96,803 | 83,730 | 132,009 | 137,912 | 23 | GREEN | 65,001 | 134,209 | 68,464 | 132,054 |
| 24 | SOIL | 164,593 | 159,768 | 83,901 | 65,677 | 24 | SOIL | 169,369 | 316,350 | 197,174 | 274,500 |
| 25 | BROCK | 118,682 | 142,733 | 102,753 | 102,037 | 25 | BROCK | 400,332 | 606,227 | 405,070 | 581,638 |

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει τις εδαφικές απώλειες στη λεκάνη του Ακρωτηρίου σύμφωνα με το αποτέλεσμα του μοντέλου RUSLE με χρήση του συντελεστή διαβρωσιμότητας ΚΗ (Κ Δειγματοληψίας), ανά χρήση γης για τα σενάρια που εξετάστηκαν.

Πίνακας 14 - Αριθμητικά Αποτελέσματα RUSLE με ΚΗ - Λεκάνη Ακρωτηρίου

| | RUSLE - Εδαφικές Απώλειες με ΚΗ | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|
| Η | Ακρωτήρι | tn / ha year ⁻¹ | | | |
| | | 18 | Κίτρινο | Μοβ | Πράσινο |
| 1 | URBAN | 9.955 | 41.432 | 13.186 | 31.095 |
| 2 | DGREEN | 54.588 | 215.716 | 73.310 | 200.513 |
| 3 | GREEN | 17.163 | 93.899 | 27.749 | 57.907 |
| 4 | SOIL | 59.773 | 231.648 | 95.458 | 150.590 |
| 5 | BROCK | 90.779 | 305.079 | 116.444 | 243.530 |

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

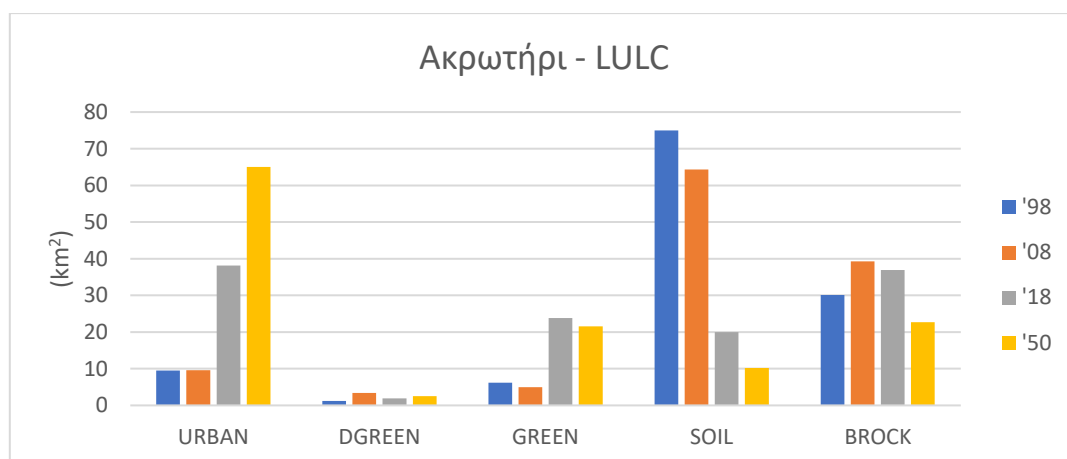
Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναλύονται σε μορφή διαγραμμάτων, όπου εξετάζονται οι μεταβολές των εδαφικών καλύψεων της περιοχής μελέτης, η ποσότητα εδαφικών απωλειών, καθώς και η συσχέτιση του κινδύνου διάβρωσης με τις χρήσεις γης που επικρατούν στην περιοχή. Η κάθε υδρολογική λεκάνη μελετάται ξεχωριστά και στο τέλος παρουσιάζονται κάθε φορά και τα συνολικά αποτελέσματα για όλες τις περιοχές μελέτης. Οι κατηγορίες χρήσεων γης ανά τις οποίες αναλύθηκαν τα μοντέλα, είναι οι εξής:

- URBAN: Αστικές περιοχές όπως ο ασυνεχής αστικός ιστός, οι βιομηχανικές ή εμπορικές τοποθεσίες, λιμάνια αεροδρόμια κτλ
- DGREEN – DARK GREEN: Περιοχές με πυκνή βλάστηση όπως ελαιώνες, κωνοφόρα, σκληρόφυλλη βλάστηση
- GREEN: Περιοχές με αραιή βλάστηση, όπως σύνθετες καλλιέργειες και άλλες περιοχές βλάστησης γεωργικές ή μη
- SOIL: Περιοχές ουδέτερης βλάστησης όπως τα φυσικά λιβάδια και οι βοσκότοποι και οι μη αδρευόμενες αρόσιμες εκτάσεις
- BROCK – BARE ROCK: Άγονες περιοχές όπως βραχώδεις και αμμώδεις εκτάσεις

5.1 Μοντέλο Land Use Land Cover

5.1.1 Ακρωτήρι

Το Διάγραμμα 3 αναπαριστά τη μεταβολή των χρήσεων γης της περιοχής του Ακρωτηρίου από το 1998 μέχρι το 2018 και την πιθανοτική κατάσταση χρήσεων γης για το 2050, όπως εξάχθηκε από τα αποτελέσματα του μοντέλου LULC.



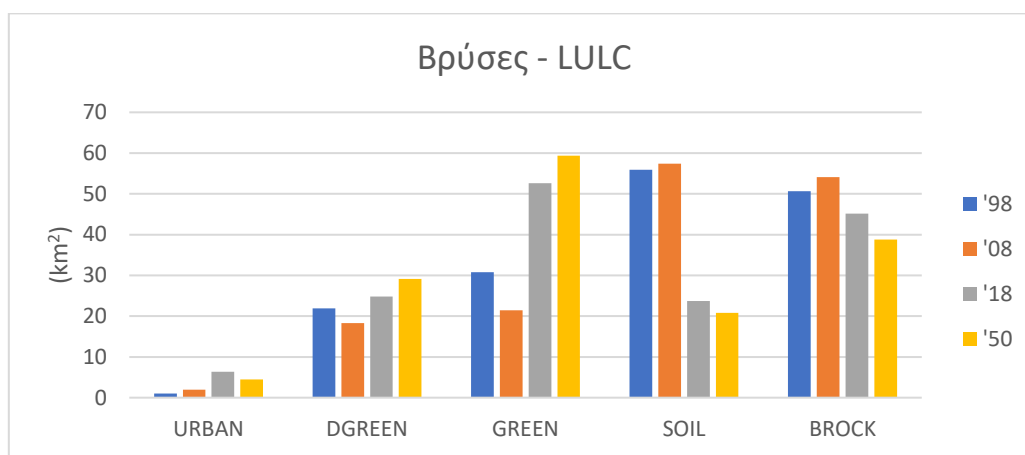
Διάγραμμα 3 - Ακρωτήρι LULC

Αρχικά, οι αστικές περιοχές (URBAN) φαίνονται να αυξάνονται έντονα με την πάροδο των χρόνων, από 38,1 km² το 2018 σε 65,1 km² το 2050, ενώ αντίθετα βλέπουμε έντονη μείωση στις ουδέτερες φυσικές περιοχές (SOIL), με την έκτασή τους να αγγίζουν το 1998 τα 75 km² γεγονός λογικό σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, αφού η αστικοποίηση είναι έντονα

αυξανόμενη τις τελευταίες δεκαετίες και ο χώρος που καταλαμβάνεται για την επέκταση των αστικών περιοχών είναι ως επί των πλείστων ανεκμετάλλευτες ουδέτερες φυσικές εκτάσεις (SOIL), συνήθως κοντά στις ήδη υπάρχουσες αστικές περιοχές. Μικρό μέρος της περιοχής αποτελεί η πυκνή βλάστηση (DGREEN), όπου δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή ενώ οι περιοχές με αραιή βλάστηση (GREEN) καταλαμβάνουν λίγο μεγαλύτερη έκταση η οποία φαίνεται να αυξάνεται με την πάροδο των χρόνων. Η βραχώδης έκταση (BROCK) της περιοχής φαίνεται να αυξήθηκε από το 1998 μέχρι το 2008.

5.1.2 Βρύσες

Το Διάγραμμα 4 αναπαριστά τη μεταβολή των χρήσεων γης της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης των Βρυσών από το 1998 μέχρι το 2018 και πιθανοτικά για το 2050.

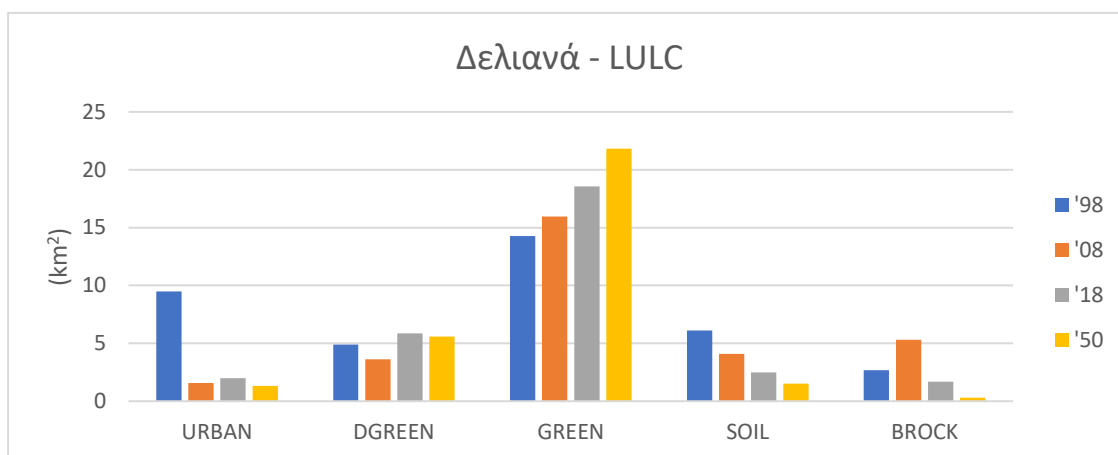


Διάγραμμα 4 - Βρύσες LULC

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η περιοχή καταλαμβάνεται κυρίως από φυσικές, ουδέτερης (SOIL), αραιής (GREEN) και πυκνής βλάστησης (DGREEN) καθώς και βραχώδεις εκτάσεις (BROCK). Αξιοσημείωτες μεταβολές ανά την πάροδο των χρόνων βλέπουμε στις κατηγορίες των ουδέτερων φυσικών εκτάσεων (SOIL), καθώς και στις περιοχές με αραιή βλάστηση (GREEN), όπου έχουμε μείωση και αύξηση της καταλαμβανόμενης έκτασης, αντίστοιχα, από το 2008 μέχρι το 2018. Οι κατηγορίες αυτές συγχέονται εύκολα, καθώς ουδέτερες φυσικές εκτάσεις (SOIL) μπορούν να εξελιχθούν σε εκτάσεις με αραιή βλάστηση (GREEN), καθώς και αντίστροφα.

5.1.3 Δελιανά

Το Διάγραμμα 5 αναπαριστά τη μεταβολή των χρήσεων γης της περιοχής λεκάνης απορροής των Δελιανών, από το 1998 μέχρι το 2050.

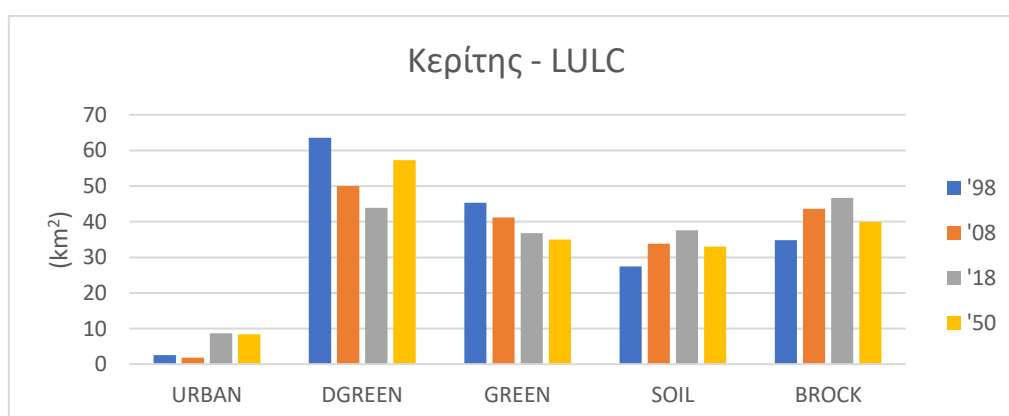


Διάγραμμα 5 - Δελιανά LULC

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η περιοχή κυριαρχείται από εκτάσεις με αραιή βλάστηση (GREEN), η οποία αυξάνεται σταθερά με την πάροδο του χρόνου, από 14,3 km² το 1998 σε 18,6 km² το 2018 και πιθανοτικά θα αγγίξει τα 21,8 km² το 2050. Η ουδέτερη φυσική βλάστηση (SOIL) καθώς και οι βραχώδεις περιοχές (BROCK) φαίνονται να μειώνονται, ενώ η πυκνή βλάστηση (DGREEN) παραμένει σχετικά σταθερή. Στην κατηγορία των αστικών περιοχών (URBAN) η έκταση τους το 1998 φαίνεται να είναι εξαιρετικά μεγάλη σε σχέση με του 2008 και του 2018, γεγονός που αποδίδουμε σε υπερκτίμηση στη διαδικασία κατηγοριοποίησης της δορυφορικής εικόνας και στη χαμηλότερη ποιότητα εικόνας λόγω σύγχυσης της φασματικής υπογραφής.

5.1.4 Κερίτης

Το Διάγραμμα 6 αναπαριστά τις μεταβολές στις χρήσεις γης της περιοχής του Κερίτη το χρονικό διάστημα από το 1998 μέχρι το 2018 και πιθανοτικά μέχρι το 2050.



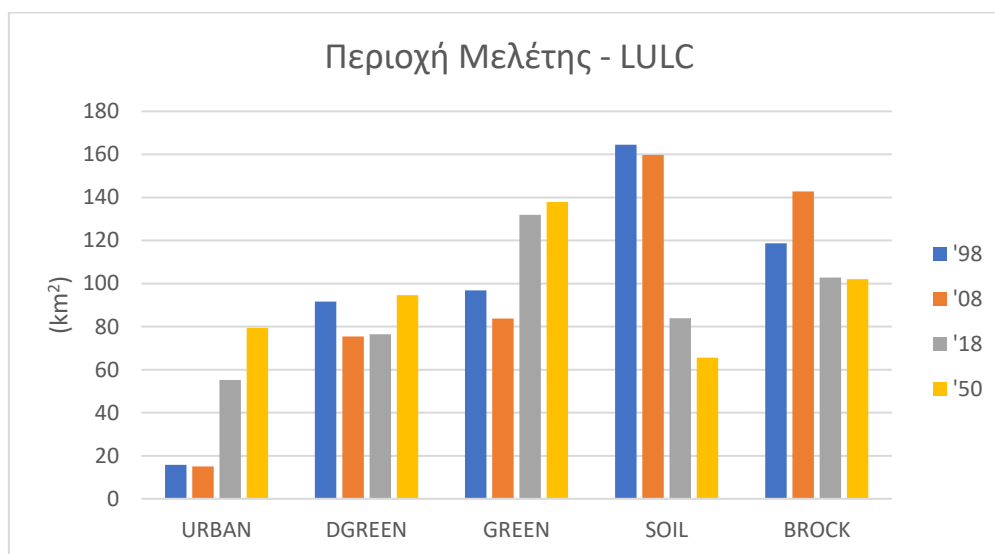
Διάγραμμα 6 - Κερίτης LULC

Η περιοχή κυριαρχείται από φυσικές εκτάσεις (DGREEN, GREEN, SOIL, BROCK), με πολύ μικρό ποσοστό να καταλαμβάνεται από αστικές περιοχές (URBAN), η έκταση των οποίων

αυξήθηκε τα τελευταία χρόνια. Οι φυσικές εκτάσεις μεταβάλλονται σχετικά ήπια, με τις εκτάσεις με πυκνή και αραιή βλάστηση να μειώνονται, και τις ουδέτερες και βραχώδεις φυσικές εκτάσεις να αυξάνονται.

5.1.5 Συνολική Περιοχή Μελέτης

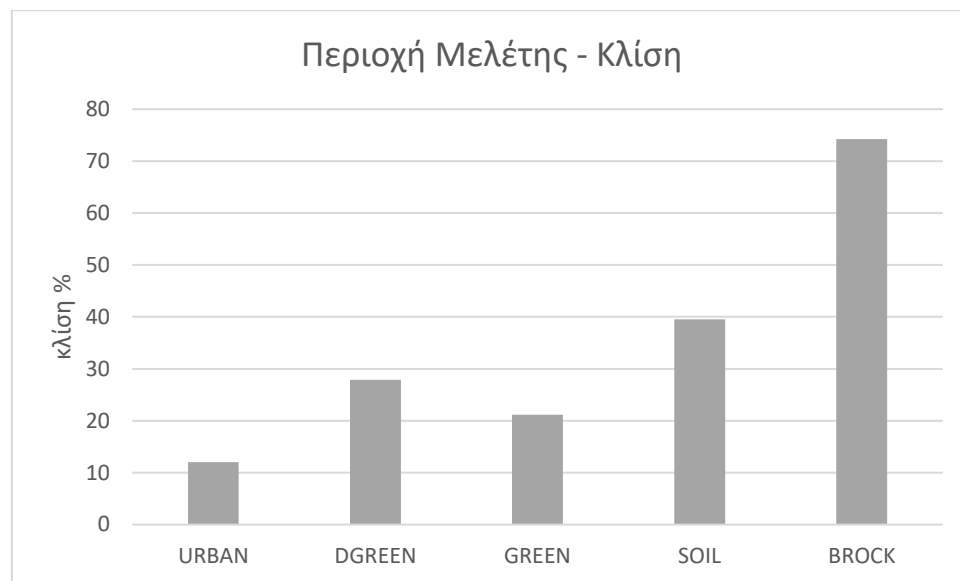
Συνολικά, για τις τέσσερις υδρολογικές λεκάνες που περικλείει η περιοχή μελέτης, παρουσιάζονται οι μεταβολές χρήσεων γης από το 1998 μέχρι και το 2008 και πιθανοτικά για το 2050, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 7.



Διάγραμμα 7 - Περιοχή Μελέτης LULC

Η έκταση που πιθανοτικά θα καλύπτουν οι αστικές περιοχές (URBAN) το 2050 προβλέπεται να είναι τετραπλάσια της αστικής έκτασης του 1998 και του 2008, υπολογιζόμενη κοντά στα 80 km², ενώ βλέπουμε τις ουδέτερες φυσικές εκτάσεις (SOIL) να μειώνονται στο μισό, από το 1998 με τιμή 164,6 km² μέχρι το 2050 που αγγίζουν τα 65,7 km². Οι φυσικές εκτάσεις με αραιή βλάστηση (GREEN), που αυξήθηκαν από το 1998 μέχρι το 2018, από 96,8 km² σε 132 km² αναμένονται να αυξηθούν με ήπιους ρυθμούς μέχρι το 2050, καταλαμβάνοντας 138 km². Οι εκτάσεις με πυκνή βλάστηση (DGREEN) προβλέπεται το 2050 να ξεπεράσουν τα επίπεδα που βρίσκονταν το 1998, αγγίζοντας τα 94,6 km², οι οποίες τις τελευταίες 2 δεκαετίες έχουν παρουσιάσει μείωση.

Το Διάγραμμα 8 αναπαριστά τη μέση κλίση που παρατηρείται ανά χρήση γης της περιοχής μελέτης για τα τωρινά δεδομένα, εν έτη 2018.



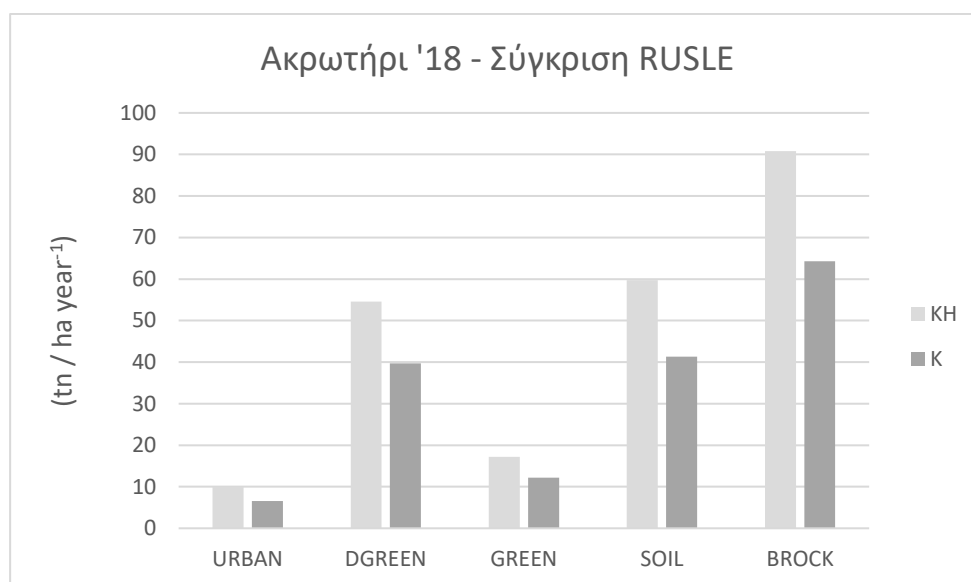
Διάγραμμα 8 - Κλίση ανά χρήση γης

Οι μεγαλύτερες κλίσεις παρατηρούνται σε εμφανώς μεγαλύτερο βαθμό σε βραχώδεις εκτάσεις (BROCK), όπως βουνά και όρη, όπου η κλίση αγγίζει το 70% ενώ ακολουθούν οι ουδέτερες φυσικές εκτάσεις (SOIL) καθώς και οι περιοχές με πυκνή βλάστηση (DGREEN), ενώ οι μικρότερες κλίσεις παρατηρούνται στις αστικές περιοχές (URBAN) και στις περιοχές με αραιή βλάστηση (GREEN).

5.2 Μοντέλο RUSLE

5.2.1 Ακρωτήριο

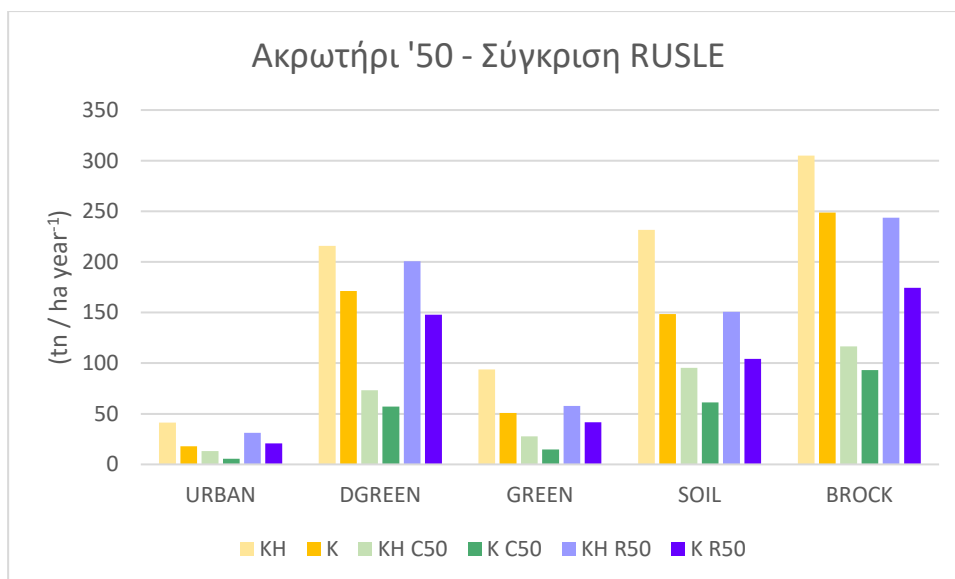
Στην περιοχή του Ακρωτηρίου έγινε εφαρμογή της εξίσωσης RUSLE με δύο διαφορετικούς συντελεστές διαβρωσιμότητας K, όπως αναφέρεται στη Μεθοδολογία. Ο συντελεστής KH εκπονήθηκε από τη δειγματοληψία, ενώ ο συντελεστής K εξάχθηκε από τη βιβλιογραφία (Panagos et al., 2014).



Διάγραμμα 9 - Ακρωτήριο '18 RUSLE με K, KH

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 9, το οποίο αναπαριστά τις τιμές της εξίσωσης RUSLE ανά χρήση γης για τους δύο συντελεστές, ο κίνδυνος εδαφικής διάβρωσης προσίεται αναλογικά μεγαλύτερος σύμφωνα με τα δειγματοληπτικά δεδομένα σε σχέση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Το γεγονός της αναλογικής ομοιότητας που παρουσιάζεται ανάμεσα στις χρήσεις γης για τα διαφορετικά K, είναι ενδεικτικό της σχετικής συμφωνίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, όσο αφορά την κατανομή της πιθανότητας του κινδύνου διάβρωσης ανά χρήση γης, αλλά ο κίνδυνος παρουσιάζεται συνολικά μεγαλύτερος σύμφωνα με τα δεδομένα της δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε.

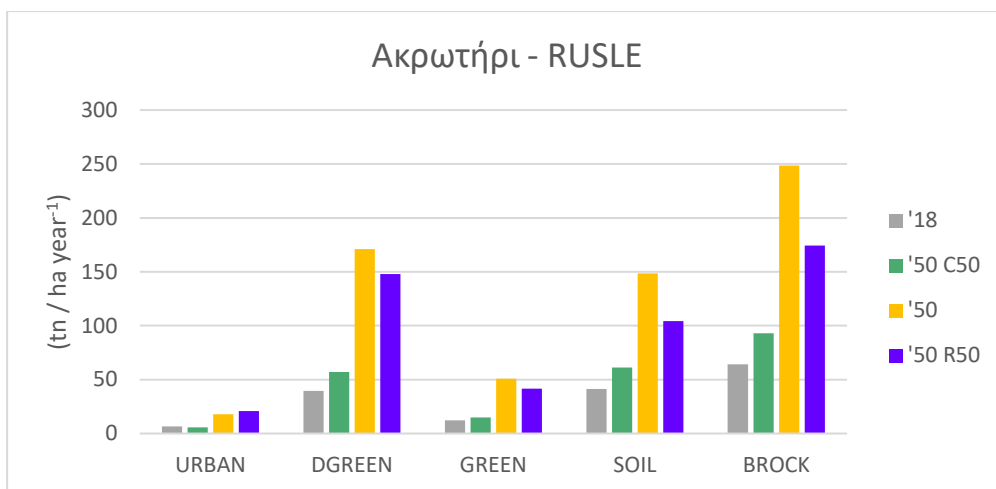
Το Διάγραμμα 10 αναπαριστά τις τιμές της εξίσωσης RUSLE, ανά χρήση γης για τα σενάρια που έγιναν για το έτος 2050 για την περιοχή του Ακρωτηρίου, εναλλάσσοντας τους συντελεστές χρήσεων γης C και τους συντελεστές διαβρωτικότητας βροχόπτωσης R, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο τμήμα της Μεθοδολογίας.



Διάγραμμα 10 - Ακρωτήριο '50 RUSLE

Αρχικά, η επιρροή του διαφορετικού συντελεστή K, είναι εμφανής και ομαλή ανά τα αποτελέσματα της εξίσωσης RUSLE, όπως στο Διάγραμμα 9. Τις μεγαλύτερες τιμές κινδύνου παρουσιάζουν οι δοκιμές που λήφθηκε υπόψη ο συνδυασμός των μελλοντικών κλιματικών και χωροταξικών σεναρίων (R50 και C50 – Κίτρινο). Μικρότερες τιμές κινδύνου βλέπουμε στις δοκιμές που λαμβάνουν υπόψη τον μελλοντικό συντελεστή χρήσεων γης C (C50 - πράσινο), ο οποίος δημιουργήθηκε από τον πιθανοτικό χάρτη χρήσεων γης για το 2050, που εξάχθηκε από το μοντέλο LULC.

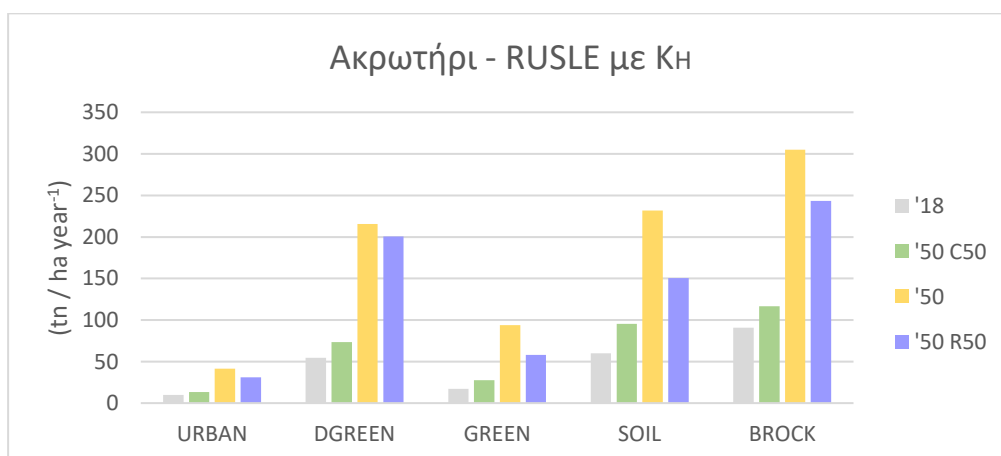
Το Διάγραμμα 11 αναπαριστά την πιθανότητα κινδύνου διάβρωσης για την περιοχή του Ακρωτηρίου, σύμφωνα με τις τέσσερις εφαρμογές της εξίσωσης RUSLE που πραγματοποιήθηκαν με τον συντελεστή διαβρωτικότητας K της βιβλιογραφίας, ανά χρήση γης.



Διάγραμμα 11 - Ακρωτήριο RUSLE, K

Πολύ χαμηλές τιμές κινδύνου παρατηρούνται στις αστικές περιοχές (URBAN) ενώ οι υψηλότερες σε βραχώδεις και άγονες περιοχές (BROCK), που τείνουν να παρουσιάζουν και τις μεγαλύτερες κλίσεις. Για τις ουδέτερες φυσικές εκτάσεις (SOIL) και τις εκτάσεις με αραιή (GREEN) και πυκνή βλάστηση (DGREEN), μεγαλύτερη πιθανότητα διάβρωσης παρουσιάζει το σενάριο όπου χρησιμοποιήθηκαν ο συντελεστής R50 σε συνδυασμό με τον C50 (Κίτρινο σενάριο), όπου οι απώλειες αγγίζουν τους 148,4, 50,9 και 248,6 tn/(ha year) αντίστοιχα και ακολουθεί το σενάριο με τη χρήση του R50 (Μοβ).

Το Διάγραμμα 12, που αναπαριστά την πιθανότητα κινδύνου διάβρωσης στην περιοχή του Ακρωτηρίου λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή διαπερατότητας KH δειγματοληψίας, έχει όμοια δομή με το Διάγραμμα 11, σε διαφορετική αναλογία τιμών.

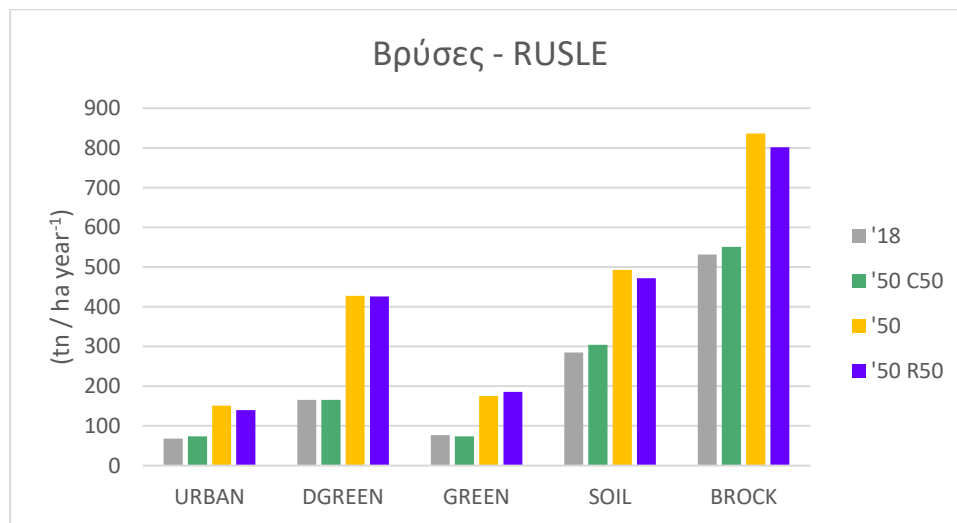


Διάγραμμα 12 - Ακρωτήριο RUSLE, KH

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 9, τα αποτελέσματα από τα δειγματοληπτικά δεδομένα για τον συντελεστή Κ (KH), προσδίδουν συνολικά μεγαλύτερο κίνδυνο διάβρωσης της περιοχής, εξηγώντας τη σχέση των Διαγραμμάτων 11 και 12. Μέγιστες τιμές εμφανίζει το Κίτρινο σενάριο στις άγονες περιοχές (BROCK), όπου οι απώλειες αγγίζουν τους 307 tn/(ha year), ενώ στην περίπτωση με τον συντελεστή Κ βιβλιογραφίας (Διάγραμμα 11), οι απώλειες αγγίζουν τους 248 tn/(ha year).

5.2.2 Βρύσες

Το Διάγραμμα 13 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εξίσωσης RUSLE στις τέσσερις δοκιμές που έγιναν, για τη λεκάνη των Βρυσών.

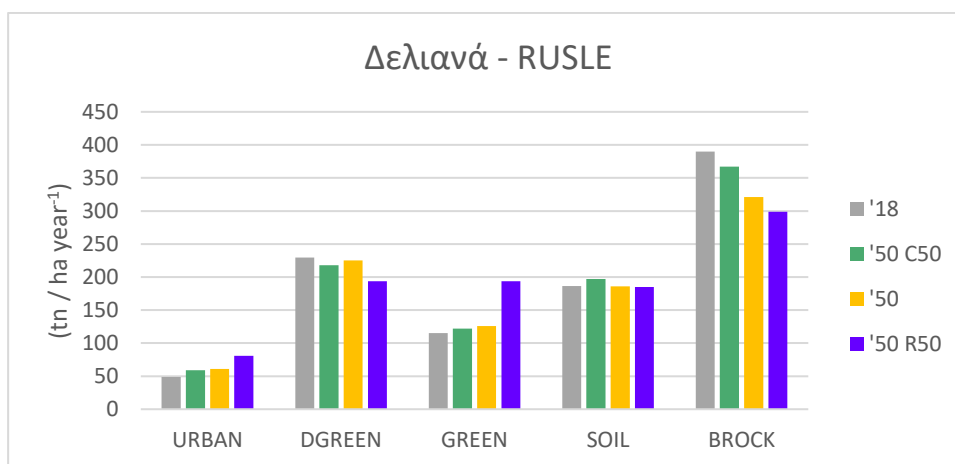


Διάγραμμα 13 - Βρύσες RUSLE

Το Μοβ σενάριο, όπου λήφθηκε υπόψη το μελλοντικό R (R50), καθώς και το Κίτρινο σενάριο που χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός των R50 και C50, παρουσιάζουν τιμές περίπου στα ίδια επίπεδα, και τις υψηλότερες τιμές κινδύνου από τα άλλα δύο σενάρια. Οι τιμές για τις αστικές περιοχές (URBAN) κυμαίνονται στους 145 tn/(ha year), για τις περιοχές με πυκνή βλάστηση στους 425 tn/(ha year), για τις περιοχές με αραιή βλάστηση (GREEN) στους 180 tn/(ha year), για τις περιοχές με ουδέτερη βλάστηση (SOIL) στους 480 tn/(ha year), ενώ για τις άγονες περιοχές (BROCK) οι τιμές κυμαίνονται στους 820 tn/(ha year) για το Κίτρινο και το Μοβ σενάριο.

5.2.3 Δελιανά

Το Διάγραμμα 14 αναπαριστά την πιθανότητα κινδύνου διάβρωσης για την λεκάνη απορροής των Δελιανών σύμφωνα με τις τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

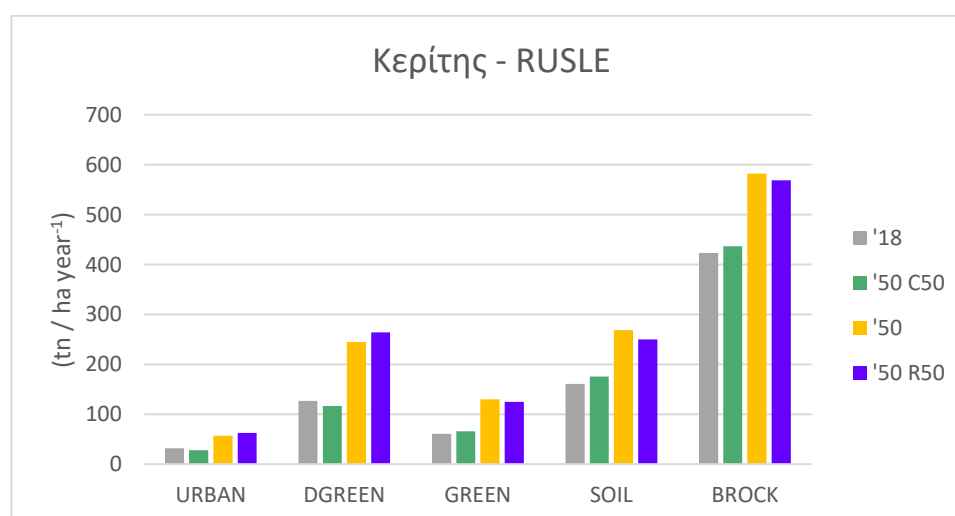


Διάγραμμα 14 - Δελιανά RUSLE

Για κάθε κατηγορία χρήσεων γης, τα αποτελέσματα κινδύνου φαίνονται να είναι πολύ κοντά μεταξύ τους για τα σενάρια που εξετάστηκαν, εκτός από τις περιοχές με αραιή φυσική βλάστηση (GREEN), όπου το Κίτρινο και το Πράσινο σενάριο κυμαίνονται περίπου στο ίδιο επίπεδο με το 2018, στους 125 tn/(ha year), ενώ το Μοβ σενάριο προβλέπει απώλειες ύψους σχεδόν 200 tn/(ha year), και εκτός από τις βραχώδεις περιοχές (BROCK), όπου το Πράσινο σενάριο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές, ύψους 367 tn/(ha year), ακολουθεί το Κίτρινο σενάριο με 321 tn/(ha year) και τέλος το Μοβ σενάριο με 299 tn/(ha year), τιμές απώλειων μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν για το 2018.

5.2.4 Κερίτης

Το Διάγραμμα 15 αναπαριστά τον κίνδυνο διάβρωσης ανά χρήση γης στην υδρολογική λεκάνη του Κερίτη.

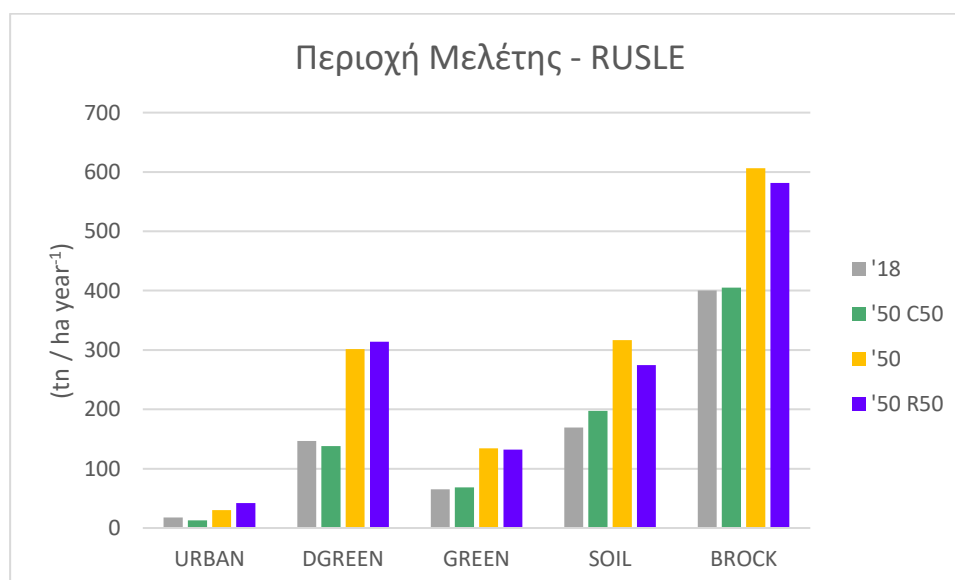


Διάγραμμα 15 - Κερίτης RUSLE

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τις μεγαλύτερες απώλειες παρουσιάζει το Κίτρινο Σενάριο, όπου συνδυάστηκαν οι προβλεπόμενες μελλοντικές χωροταξικές (C50) και κλιματικές συνθήκες (R50), εκτός από τις περιοχές με πυκνή βλάστηση (DGREEN) και τις αστικές περιοχές (URBAN), όπου το Μοβ σενάριο παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές. Οι τιμές για τις αστικές περιοχές (URBAN) κυμαίνονται στους 60 tn/(ha year), για τις περιοχές με πυκνή βλάστηση στους 250 tn/(ha year), για τις περιοχές με αραιή βλάστηση (GREEN) στους 125 tn/(ha year), για τις περιοχές με ουδέτερη βλάστηση (SOIL) στους 255 tn/(ha year), ενώ για τις άγονες περιοχές (BROCK) οι τιμές κυμαίνονται στους 570 tn/(ha year) για το Κίτρινο και το Μοβ σενάριο.

5.2.5 Συνολική Περιοχή Μελέτης

Το Διάγραμμα 16 παρουσιάζει τον κίνδυνο εδαφικής διάβρωσης για κάθε χρήση γης, της συνολικής περιοχής μελέτης.



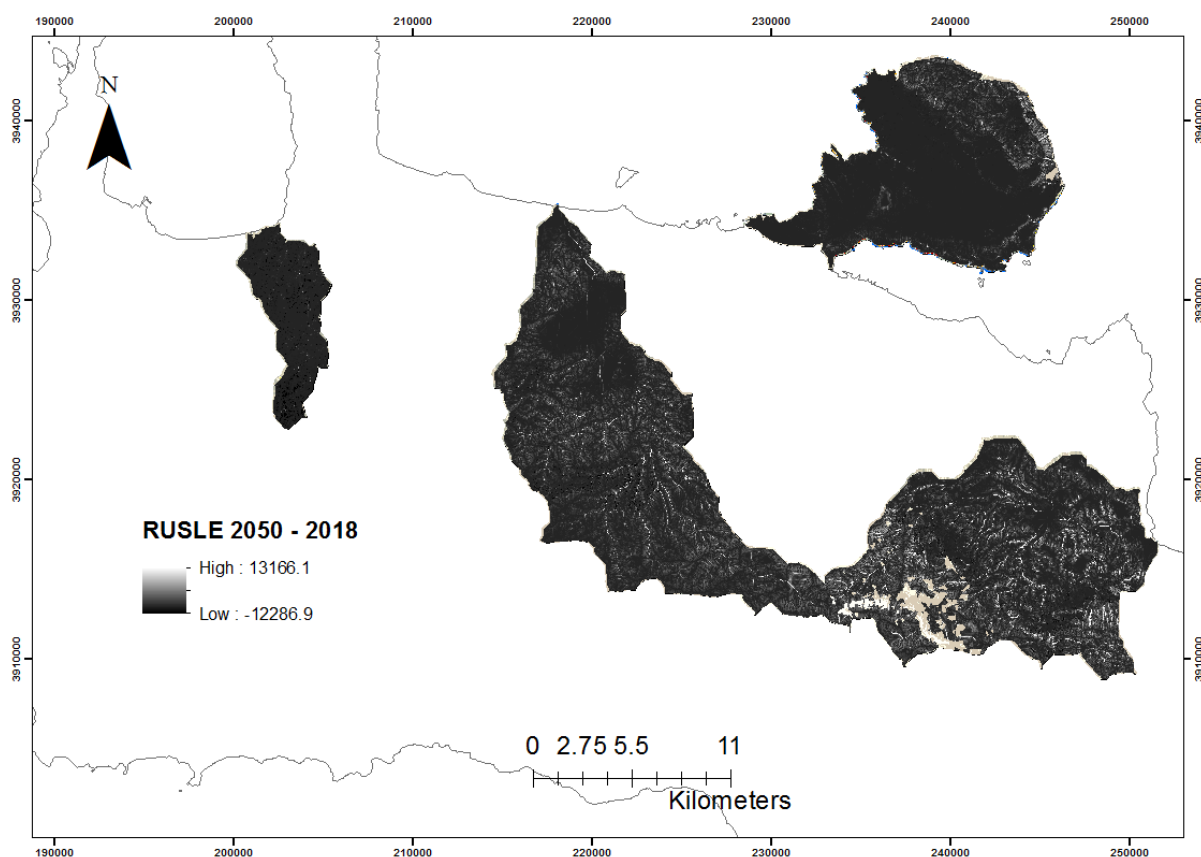
Διάγραμμα 16 - Περιοχή Μελέτης RUSLE

Ο υψηλότερος κίνδυνος αναπαρίσταται από το Κίτρινο Σενάριο, με τη χρήση συνδυασμού των χωροταξικών και κλιματικών προβλέψεων, και του Μοβ Σεναρίου, με χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου (R50). Ο κίνδυνος διάβρωσης για τη συνολική περιοχή μελέτης αφορά κατά κύριο λόγο τις φυσικές εκτάσεις (DGREEN, GREEN, SOIL, BROCK), ειδικότερα τις περιοχές με μεγαλύτερες κλίσεις όπως οι βραχώδεις (BROCK) και δασώδεις (DGREEN) περιοχές και όχι τόσο τις αστικές περιοχές (URBAN). Οι μέγιστες απώλειες ανά χρήση γης στην περιοχή μελέτης παρατηρούνται στις άγονες περιοχές (BROCK), με 606 tn/(ha year), και στις περιοχές με ουδέτερη και πυκνή βλάστηση, όπου οι απώλειες 316 και 313 tn/(ha year) αντίστοιχα. Στις περιοχές με αραιή βλάστηση οι μέγιστες απώλειες είναι στους 134 tn/(ha year), ενώ στις αστικές περιοχές στους 42 tn/(ha year).

5.3 Τελικά Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου LULC για το 2050, προβλέπεται μεγάλη αύξηση της έκτασης των αστικών περιοχών, γεγονός που αποδίδουμε στην εκτεταμένη αστικοποίηση που αναμένεται στο απώτερο μέλλον, και αντίστοιχη αθροιστικά μείωση των ουδέτερων και βραχυνών εκτάσεων που πιθανότατα θα καταληφθεί από το άστυ. Όσο αφορά τις φυσικές εκτάσεις, οι μεταβολές τους εναλλάσσονται, με μικρότερη όμως ένταση από τις αστικές περιοχές.

Από τα αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου RUSLE και τα διαγράμματα που εκπονήθηκαν για την ανάλυση αυτών, αρχικά βλέπουμε, σύμφωνα με όλα τα μελλοντικά σενάρια που εφαρμόστηκαν, ότι συνολικά ο κίνδυνος εδαφικής διάβρωσης με την πάροδο των ετών αυξάνεται στην περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 28, η οποία απεικονίζει την αφαίρεση του ψηφιδωτού αρχείου (raster) του μοντέλου RUSLE για το 2018 από το ψηφιδωτό αρχείο του μοντέλου RUSLE για το 2050, μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διαφορά στο ρυθμό διάβρωσης, από το 2018 μέχρι το 2050, όπου οι υψηλές τιμές (Highs), δηλαδή οι τιμές κινδύνου, παρουσιάζουν μεγάλη τάξη μεγέθους.



Εικόνα 13 - Αφαίρεση χάρτη, RUSLE 2050-RUSLE 2018

Το μοντέλο όπου χρησιμοποιήθηκαν οι μελλοντικοί συντελεστές χρήσεων γης (C50) και βροχοπτώσεων (R50), δηλαδή το Κίτρινο σενάριο, φαίνεται να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές κινδύνου για τις φυσικές περιοχές με ουδέτερη, αραιή και πυκνή βλάστηση, αλλά και στις αστικές περιοχές που όμως εκεί ο κίνδυνος είναι σχετικά αμελητέος, λόγω αστικού

χαρακτήρα και λειτουργιών, καθώς και λόγω κλίσης, αφού οι μεγάλες αστικές περιοχές βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε περιοχές με μικρή κλίση. Για τις περιοχές που είναι άγονες ή βραχώδεις, τον μεγαλύτερο κίνδυνο διάβρωσης εμφανίζει και πάλι το Κίτρινο σενάριο, όπου συνδυάστηκαν οι χωρικοί και βροχομετρικοί συντελεστές. Το Μοβ σενάριο, όπου λήφθηκε υπόψη ο μελλοντικός συντελεστής R (R50) και ο συντελεστής χρήσεων γης C θεωρήθηκε σταθερός από το 2018, εμφανίζει εξίσου μεγάλες τιμές με το Κίτρινο σενάριο, γεγονός που προδίδει το μέγεθος της επιρροής της κλιματικής αλλαγής στο φαινόμενο της εδαφικής διάβρωσης. Αντίστοιχα, το σενάριο όπου λαμβάνονται υπόψη οι χρήσεις γης του 2050, όπου δεν λαμβάνονται υπόψη τα προβλεπόμενα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου (η κλιματική κατάσταση θεωρείται όμοια με του 2018) και λαμβάνεται υπόψη η προβλεπόμενη χωροταξική κατάσταση του 2050, φαίνεται να παρουσιάζει μικρότερες τιμές κινδύνου εδαφικής διάβρωσης σε σχέση με τα άλλα σενάρια, παρόλα αυτά αξιοσημείωτα αυξημένες σε πολλές περιπτώσεις σε σχέση με τις απώλειες του 2018, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημαντικότητα των κατανομών χρήσεων γης στην εξέλιξη της διάβρωσης. Η διαφορά με τα άλλα δύο μελλοντικά σενάρια που εξετάστηκαν (Κίτρινο, Μοβ) οφείλεται στις υπολογιζόμενες εκτάσεις ανά κατηγορία, όπου μελλοντικά προσδίδεται μεγαλύτερη έκταση σε περιοχές με φυσική βλάστηση οι οποίες έχουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης νερού, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψη κανένα σενάριο εξέλιξης των κλιματικών συνθηκών ή αύξησης της έντασης των καιρικών φαινομένων (βροχοπτώσεων), στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής, που αποτελεί και τον κύριο λόγο. Έτσι συνολικά παρουσιάζεται μικρότερη πιθανότητα διάβρωσης στην περιοχή μελέτης για το Πράσινο σενάριο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φαινόμενο της επιταχυμένης εδαφικής διάβρωσης είναι ένα παγκόσμιως αναγνωρισμένο πρόβλημα που τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εντονότερο και αγγίζει τα όρια της μη αναστρεψιμότητας σε κάποιες περιοχές. Η σύνδεση του με την κλιματική αλλαγή αλλά και τις μεταβολές στις χρήσεις γης, οι οποίες είναι συνεχείς τη σύγχρονη εποχή, τείνοντας προς την αστικοποίηση του τοπίου και συνεπώς τη μείωση των περιοχών με βλάστηση, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για τη μελέτη και την παρακολούθηση του, καθώς σύμφωνα με τις προβλέψεις η κατάσταση του κλίματος οδεύει προς την αύξηση της έντασης των καιρικών συνθηκών και της θερμοκρασίας, άρα και του κινδύνου εδαφικής διάβρωσης.

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την εκτίμηση του ποσοστού εδαφικής διάβρωσης της περιοχής μελέτης και τη συσχέτιση αυτής με τις μεταβολές των χρήσεων γης της περιοχής και την κλιματική αλλαγή. Στη μελέτη αυτή, η χωροταξική κατάσταση της περιοχής αναλύθηκε με τεχνικές τηλεπισκόπησης, αφού έγινε ανάλυση και ομαδοποίηση δορυφορικών εικόνων, οι βροχομετρικές συνθήκες μετρήθηκαν σύμφωνα με υπάρχοντα δεδομένα και προβλέφθηκαν για το μέλλον μέσω Διορθωμένου Κλιματικού Μοντέλου, καταγράφηκαν με οπτική παρατήρηση οι περιοχές που εφαρμόζουν κάποια μέθοδο πρόληψης από τη διάβρωση, ενώ για τον παράγοντα διααβρωσιμότητας εκτός από βιβλιογραφικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και εδαφικά δεδομένα από δειγματοληψία. Οι κλίσεις του εδάφους υπολογίστηκαν μέσω ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η ανάλυση τριών δορυφορικών εικόνων της περιοχής μελέτης για τα έτη 1998, 2008 και 2018, επέτρεψαν αρχικά την επαλήθευση της διαδικασίας του μοντέλου LULC, αφού με δεδομένα τις εικόνες 1998 και 2008, εξάχθηκε πιθανοτική εικόνα για το 2018, η οποία συγκρίθηκε με την πραγματική με πολύ καλά αποτελέσματα, και στη συνέχεια την εξαγωγή πιθανοτικής εικόνας χρήσεων γης για το 2050 με χρήση των ομαδοποιημένων εικόνων του 2008 και του 2018. Το διορθωμένο κλιματικό μοντέλο δόμησε τον πιθανοτικό βροχομετρικό συντελεστή R του 2050 και έδωσε την δυνατότητα εξαγωγής αποτελέσματος του μοντέλου RUSLE για το 2050.

Με την εξαγωγή των διαφορετικών μελλοντικών σεναρίων πιθανότητας διάβρωσης του εδάφους και τη σύγκριση αυτών, έγινε εμφανές αρχικά ότι οι χρήσεις γης μεταβάλλονται σύμφωνα με τις συνθήκες της εποχής, δηλαδή παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση των αστικών εκτάσεων τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι βροχοπτώσεις σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο αυξάνονται και αυτό γίνεται εμφανές και αν παρατηρήσουμε το Μοβ σενάριο και τις διακυμάνσεις στα διαγράμματα, μπορούμε να κατανοήσουμε την αρκετά έντονη επίδραση που μπορεί να επιφέρει ένα μέσου επιπέδου κλιματικό σενάριο (RCP 4.5) στη πιθανότητα κινδύνου διάβρωσης. Στο σενάριο όπου συνδυάστηκαν οι πιθανοτικές μελλοντικές κλιματικές συνθήκες και οι προβλεπόμενες μεταβολές χρήσεων γης, είναι το δυσμενέστερο, όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη πιθανότητα διάβρωσης για την περιοχή. Δηλαδή παρατηρείται πιθανοτική αύξηση της εμφάνισης του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης τις επόμενες δεκαετίες, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες βροχομετρικές και

χωροταξικές συνθήκες, γεγονός που πιθανότατα θα επιφέρει δυσμενείς περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να συσχετιστούν με αυτά των (Kouli et al., 2009) και των (Kourgialas et al., 2016), καθώς κάποιες περιοχές των περιοχών μελέτης συμπίπτουν. Καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας παρατηρείται με τα αποτελέσματα της μελέτης των (Kouli et al., 2009) και των (Kourgialas et al., 2016), όπου οι ρυθμοί των εδαφικών απωλειών βρίσκονται σε σχετική συμφωνία, αν και στην παρούσα μελέτη οι απώλειες υπολογίζονται λίγο μεγαλύτερες.

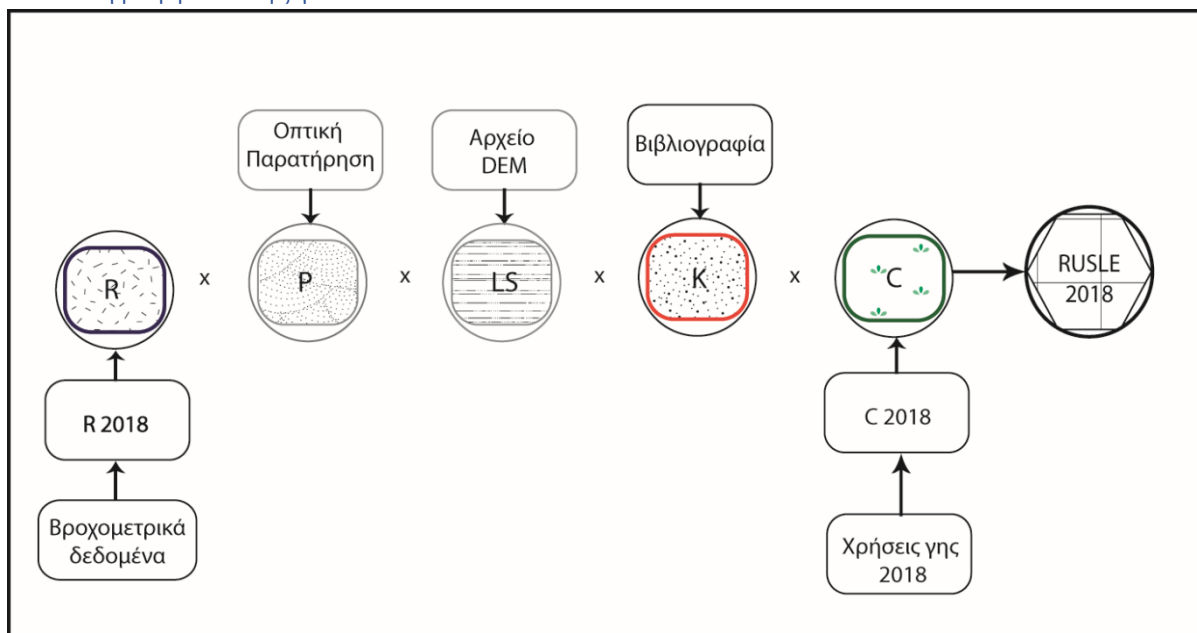
Το μοντέλο RUSLE αποτελεί μία μέθοδο εκτίμησης του ρυθμού εδαφικών απωλειών στα όρια μιας υδρολογικής λεκάνης. Στα πλαίσια της εφαρμογής του μοντέλου παρατηρείται πολλές φορές η εμφάνιση ακραίων τιμών (outliers) οι οποίες δεν είναι χαρακτηριστικές του καθεστώτος εδαφικής διάβρωσης εντός των περιοχών μελέτης. Κατά τη διάρκεια της έρευνας μας στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταλήξαμε ότι το μοντέλο RUSLE : α) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή χαρτών επικινδυνότητας εδαφικής διάβρωσης (water erosion risk maps) β) ως τελικό ποσοτικό αποτέλεσμα είναι πιο αξιόπιστο να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή εδαφικών απωλειών για τις υδρολογικές λεκάνες.

Με τη χρήση τεχνολογιών τηλεσκόπησης, και την ένταξη του πολυδιάστατου φαινομένου της κλιματικής αλλαγής στη μελέτη της εδαφικής διάβρωσης, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη μελέτη για το φαινόμενο και την επίδραση των βασικών παραγόντων που τη διέπουν. Η περιοχή μελέτης περικλύει αρκετά μεγάλο μέρος της βόρειο δυτικής Κρήτης (Περιφερειακή Ενότητα Χανίων) δίνοντας έτσι μια αντιπροσωπευτική εικόνα για την κατάσταση του φαινομένου διάβρωσης αλλά και τις μεταβολές των χρήσεων γης της ευρύτερης περιοχής. Οι μοντελοποιημένες χρήσεις γης, εκτός από την χωροταξική πληροφορία και την πιθανή εξέλιξη της, προσδίδουν νέα διάσταση στο μοντέλο διάβρωσης, αποδίδοντας χρήσιμα και συσχετισμένα αποτελέσματα. Επίσης τα μοντέλα κλιματικής αλλαγής καθίστανται σχεδόν αναγκαία πια για τις επιστημονικές προβλέψεις, καθώς οι αλλαγές που αναμένονται από το πιο ήπιο μέχρι το πιο ακραίο κλιματικό σενάριο είναι αξιοσημείωτες και επηρεάζουν τις συνθήκες των φυσικών διεργασιών.

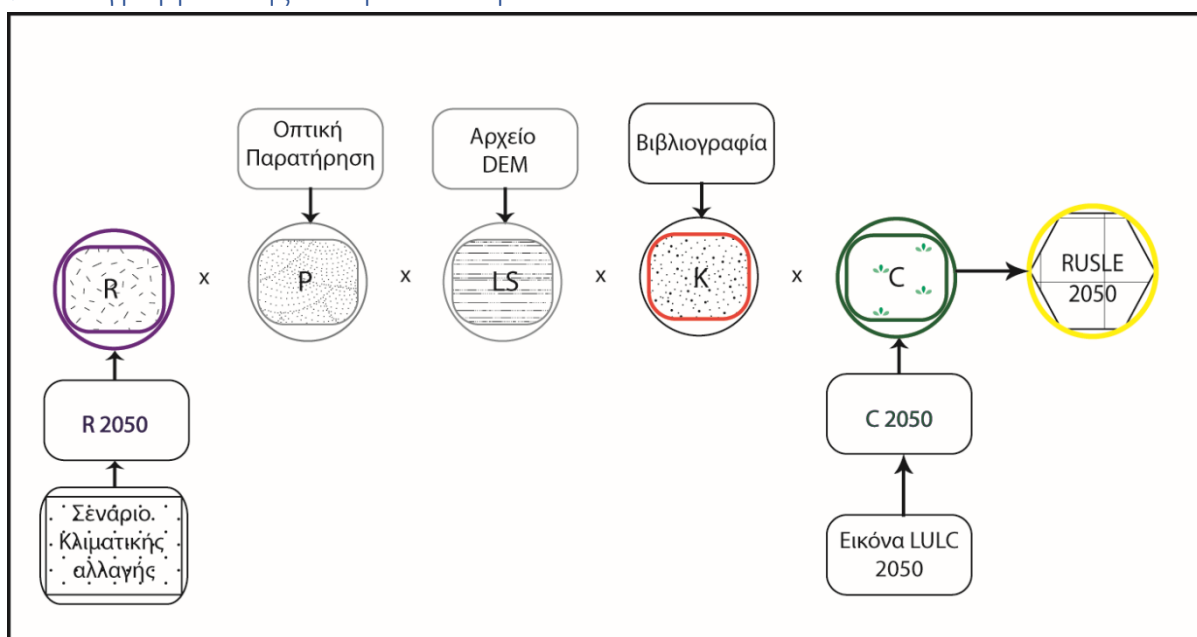
Ο περιορισμός της Μεθοδολογίας που προτείνεται στην παρούσα εργασία έγκειται στην απαίτηση μεγάλου πλήθους δεδομένων, όσο αφορά τα υδρογραφικά, μετεωρολογικά και άλλα δεδομένα, τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυσεύρετα. Παρόλα αυτά, αξιόπιστα και εκτενή δεδομένα αυξάνουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της μελέτης. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να συνεχιστεί με την εφαρμογή του συνδυασμού των μοντέλων αυτών για την εκπόνηση χάρτη εκτίμησης εδαφικής διάβρωσης και στην υπόλοιπη Κρήτη, ή σε κάποια άλλη τοποθεσία με τάση για διάβρωση. Επίσης θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλες μέθοδοι μοντελοποίησης και ενσωμάτωσης των κύριων παραγόντων που συνδέονται με τη διάβρωση ή την κλιματική αλλαγή.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ

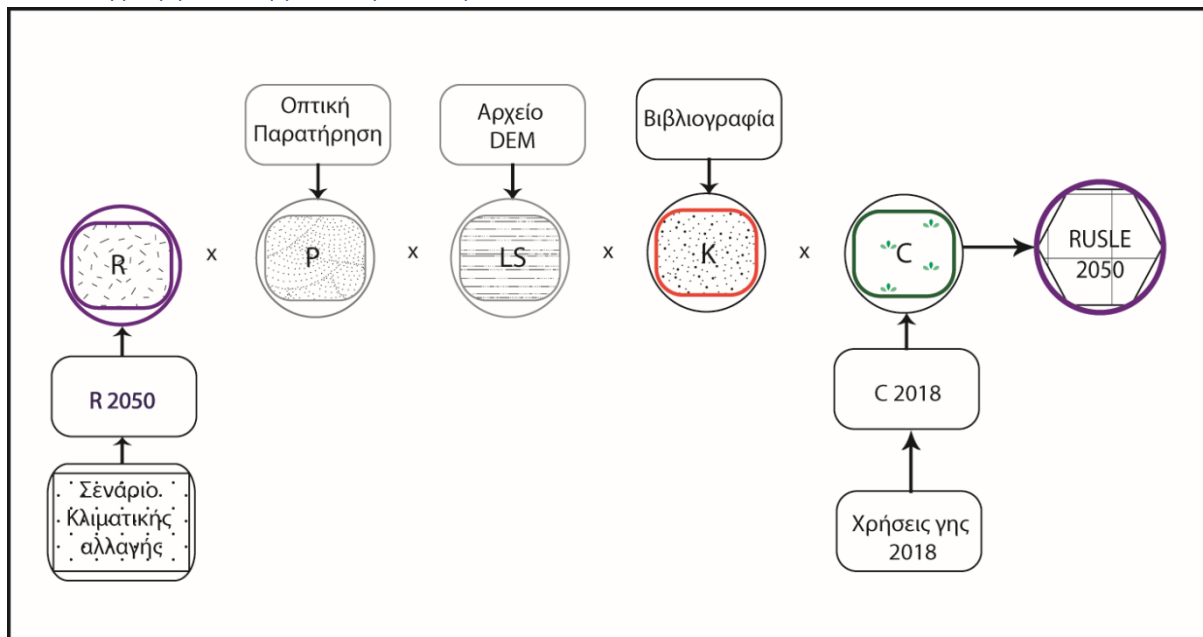
7.1 Διάγραμμα Ροής για το 2018



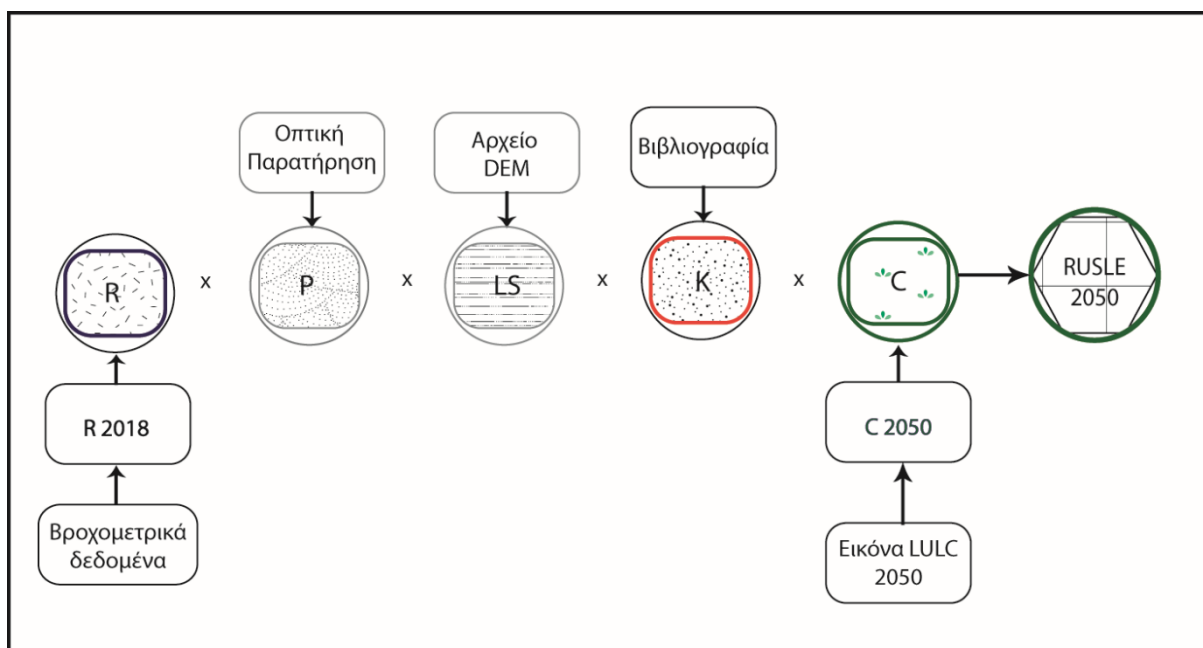
7.2 Διάγραμμα Ροής – Κίτρινο Σενάριο



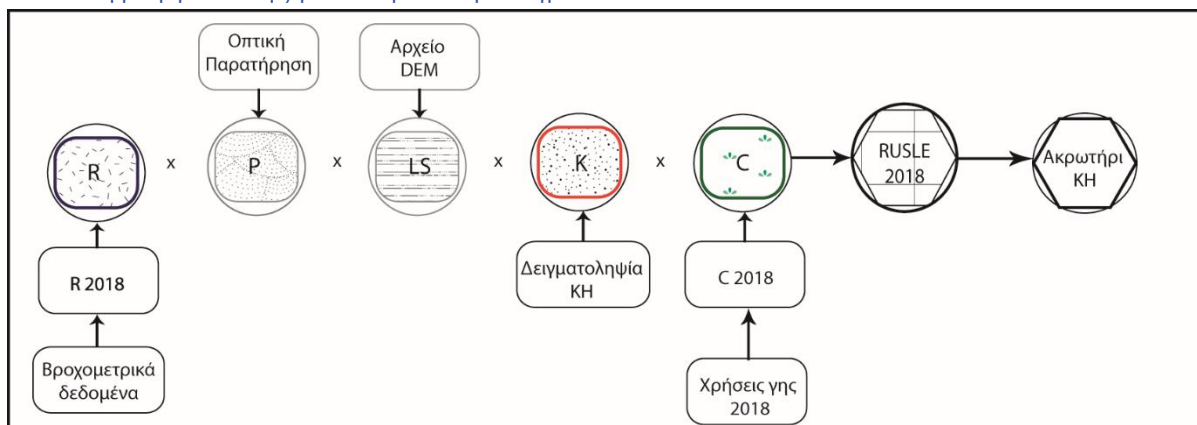
7.3 Διάγραμμα Ροής – Μοβ Σενάριο



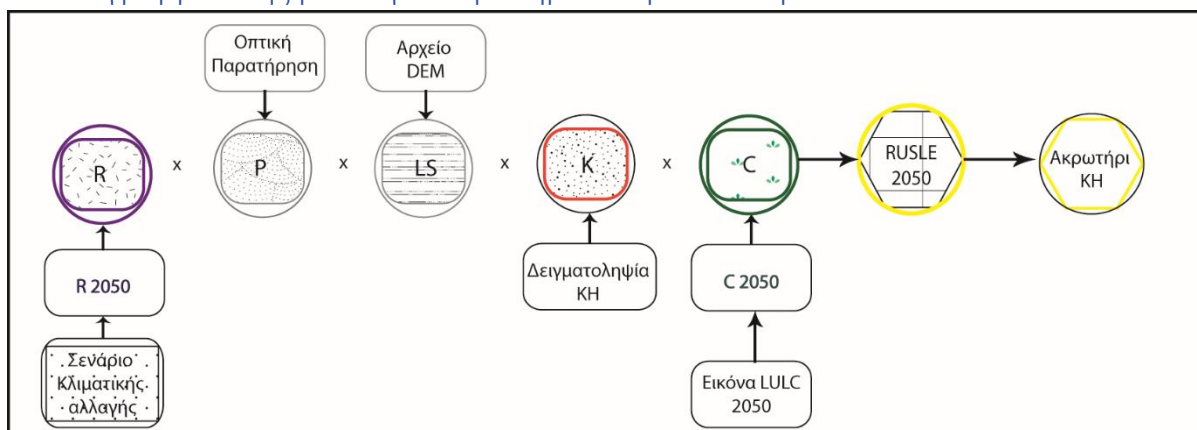
7.4 Διάγραμμα Ροής – Πράσινο Σενάριο



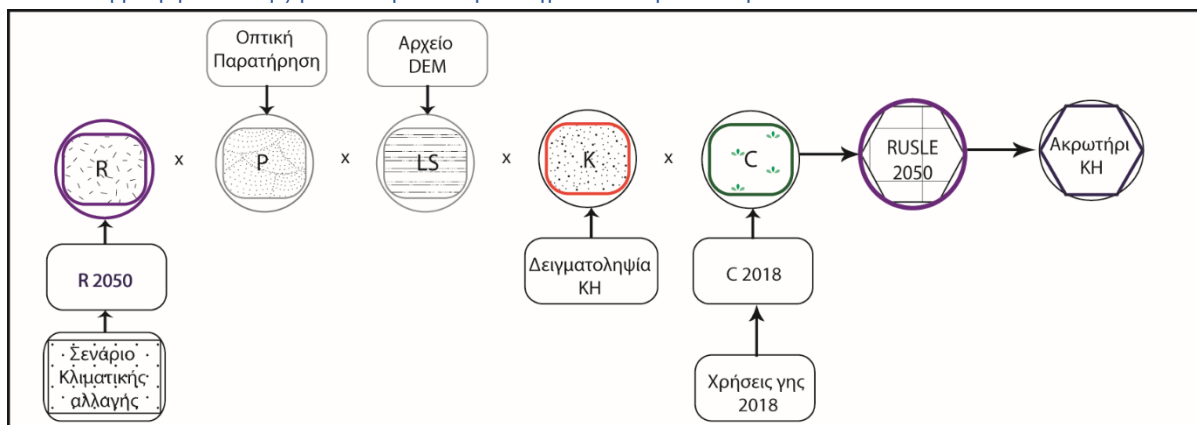
7.5 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – 2018



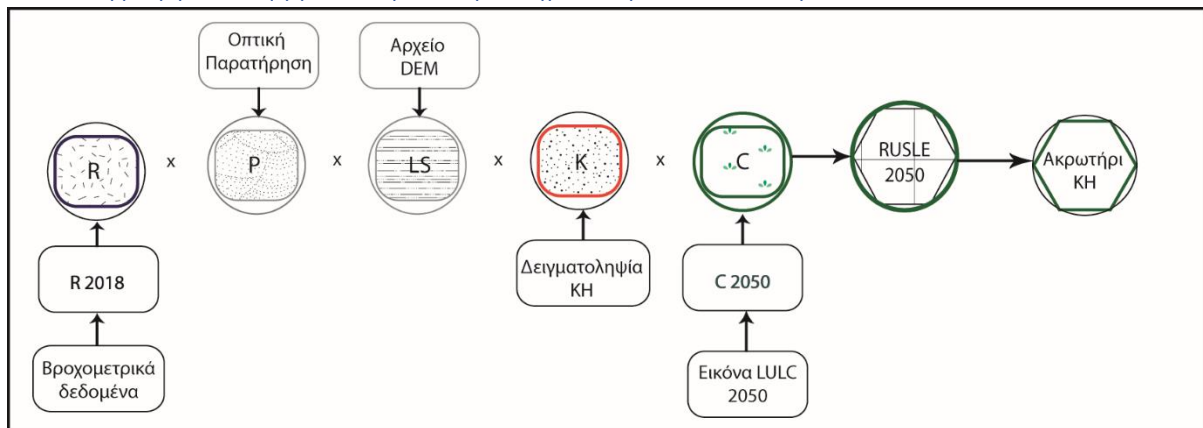
7.6 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Κίτρινο Σενάριο



7.7 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Μοβ Σενάριο



7.8 Διάγραμμα Ροής με ΚΗ για Ακρωτήριο – Πράσινο Σενάριο



8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Antrop M, 2004. Landscape Change and the Urbanization Process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 67, 9-26.
- Banerjee R, Srivastava PK, 2013. Reconstruction of contested landscape: detecting land cover transformation hosting cultural heritage sites from central India using remote sensing. *Land Use Policy* 34, 193–203.
- Behera MD, Borate SN, Panda SN, Behera PR, Roy PS, 2012. Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA) Markov model - A geo-information based approach. *J. Earth Syst. Sci.*
- Boyle M, 2002. Erosion's contribution to greenhouse gases. *Erosion Control* (9), 64–67.
- Brown LR, 1984. Conserving soils. In: Brown LR, *State of the world*. Norton, New York, 53–75.
- Chartzoulakis KS, Paranychanakis NV, Angelakis AN, 2001. Water resources management in the island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. *Water Policy* 3, (3), 193–205.
- Christensen JH, Boberg F, Christensen OB, Lucas-Picher P, 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys. Res. Lett.* 35, L20709.
- Corine 2000, Χάρτης Κάλυψης Εδάφους (CLC2000 100 m, έκδοση 1) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΟΧ, Κοπεγχάγη, 2000, <http://www.eea.europa.eu>).
- Fernandez C, Wu JQ, McCool DK, Stockle CO, 2003. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *J Soil Water Conserv* 58, 128–136
- Grillakis MG, Koutroulis AG, Tsanis IK, 2013. Multisegment statistical bias correction of daily GCM precipitation output. *J Geophys Res Atmos* 118, 3150–3162.
- Gyssels G, Poesen J, Bochet E, Li Y, 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 29, (2), 189–217.
- Haerter JO, Hagemann S, Moseley C, Piani C, 2011. Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1065–1079.
- Hansen, J.W., Challinor, A., Ines, A.V.M., Wheeler, T., Moron, V., 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Clim. Res.* 33, 27–41.
- Harding, R.J., Weedon, G.P., van Lanen, H.A.J., Clark, D.B., 2014. The future for global water assessment. *J. Hydrol.* 518, 186–193.
- Knutti R, Sedlacek J, 2012. Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections.
- Kosmas CN, Danalatos LH, Cammeraat M, Chabart J, Diamantopoulos R, Farand L, Gutierrez A, Jacob H, Marques J, Martinez-Fernandez A, Mizara N, Moustakas JM, Nicolau C, Oliveros G, Pinna R, Puddu J, Puigdefabregas M, Roxo A, Simao G,

StamouMn Tomasi D, Usai D, Vacca A, 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45–59.

- Kouli M, Soupios P, Vallianatos F, 2008. Soil erosion prediction using the revised Universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete. *Greece Environmental Geology* 57, (3), 483–497.
- **Kourgialas NN, Dokou Z, Karatzas GP, 2015a. Statistical analysis and ANN modeling for predicting hydrological extremes under climate change scenarios. The example of a small Mediterranean growatershed. *J Environ Manage* 154, 86–101
- Kourgialas M, Karatzas G, Morianou G, 2015. Water management plan for olive orchards in a semimountainous area of Crete. *Greece Global Nest J* 17, (1), 72–81
- Kourgialas N, Koubouris G, Karatzas G, Metzidakis J, 2016. Assessing water erosion in Mediterranean tree crops using GIS techniques and field measurements: the effect of climate change.
- Koutroulis AG, Grillakis MG, Tsanis IK, Papadimitriou L, 2016. Evaluation of precipitation and temperature simulation performance of the CMIP3 and CMIP5 historical experiments.
- Lal R, 2001. Soil degradation by erosion, *Land Degradation and Development* (12), 519-539.
- Merritt W, Letcher R, Jakeman A, 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environ Model Softw* 18, (8–9), 761–799.
- Niemelä J, Kotze J, Ashworth A, Brandmayr P, Desender K, New T, Penev L, Samways M, Spence J, 2000. The search for common anthropogenic impacts on biodiversity: a global network. *J Insect Conserv* 4, (1), 3–9.
- Onori F, De Bonis P, Grauso S, 2006. Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a catchment of Sicily (southern Italy). *Environ Geol* 50, 1129–1140.
- Panagos P, Meusburger K, Ballabio C, Borrelli P, Alewell C, 2014. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, *Science of the Total Environment* 479–480, 189–200.
- Panagos P, Borrelli P, Meusburgerb K, Alewellb C, Lugatoa E, Montanarellaa L, 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy* 48, 38–50.
- Perakis K, 2011. Scientific Magazine of University of Thessaly, Trace and Prediction of Land Use and Land Changes in the county of Magnesia, using Markov and Cellular Automata Methods in multispectral satellite images.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC, 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook No. 703*, USDA-ARS.
- Tsagarakis KP, Dialynas GE, Angelakis AN, 2004. Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria. *Agric Water Manage* 66, 35–47.

- United States Geological Survey, USGS, Landsat Satellite images (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)
- Volk M, Moller M, Wurbs D, 2010. A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies. Land Use Policy 27, (4), 997–1009
- Yagoub, M. M., Al Bizreh, A. A. (2014): Prediction of land cover change using Markov and cellular automata models: case of Al-Ain, UAE, 1992-2030. – Journal of the Indian Society of Remote Sensing,42(3): 665-671.