



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Μελέτη της εδαφικής διάβρωσης και των πλημμυρών στο νησί της Σάμου με την εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (Νευρωνικά Δίκτυα, Ασαφής Λογική) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κοτίνας Βασίλειος

ΑΘΗΝΑ, 2020



HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF GEOLOGY AND GEOENVIRONMENT

Study of Soil Erosion and Flash Flooding with the use of Artificial Intelligence (fuzzy logic, artificial neural networks) and Geographic Information Systems. A study case in the island of Samos, Greece.

PhD Thesis

Kotinas Vasileios

Athens, 2020



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Μελέτη της εδαφικής διάβρωσης και των πλημμυρών στο νησί της Σάμου με την εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (Νευρωνικά δίκτυα, Ασαφής λογική) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κοτίνας Βασίλειος του Αναστασίου (Α.Μ: 200)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΚΟΥΡΝΕΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ, Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γκουρνέλος Θεόδωρος, Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α.)

Ευελπίδου Νικολέττα-Νίκη, Καθηγήτρια (Ε.Κ.Π.Α)

Πούλος Σεραφείμ , Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α)

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γκουρνέλος Θεόδωρος, Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α.)

Ευελπίδου Νικολέττα-Νίκη, Καθηγήτρια (Ε.Κ.Π.Α)

Πούλος Σεραφείμ , Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α)

Καρυμπαλης Ευθύμιος, Καθηγητής (ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ)

Νάστος Παναγιώτης, Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α.)

Χαλκιάς Χρήστος, Καθηγητής (ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ)

Βασιλάκης Εμμανουήλ , Επίκουρος Καθηγητής (Ε.Κ.Π.Α)

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα φαινόμενα των ξαφνικών πλημμυρών και της διάβρωσης αποτελούν δυο πολύ σημαντικές φυσικές καταστροφές, με συχνή εμφάνιση στην Ελληνική επικράτεια αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Τις επόμενες δεκαετίες το κλίμα στην περιοχή της Μεσογείου, η οποία θεωρείται ως “hot spot”, αναμένεται να μεταβληθεί σημαντικά και τα προβλήματα τα οποία προκαλούνται από τα δυο αυτά φαινόμενα στο περιβάλλον και τον άνθρωπο θα ενταθούν. Έτσι η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την γρήγορη και αποτελεσματική εκτίμηση της επικινδυνότητας αυτών των φαινομένων ακόμα και όταν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι λίγα κρίνεται επιτακτική για την καλύτερη διαχείριση αυτών των φυσικών καταστροφών. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσονται μεθοδολογίες βασιζόμενες σε -state of the art- συστήματα τεχνητής νοημοσύνης όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα αλλά και η ασαφής λογική. Με τη χρήση αυτών των μεθοδολογιών μπορούμε να προσεγγίσουμε αποτελεσματικά αυτά τα φαινόμενα συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία καλύτερων διαχειριστικών σχεδίων από τους αρμόδιους φορείς για το μετριασμό των προβλημάτων τα οποία αναμένεται να είναι έντονα τις επόμενες δεκαετίες σε ολόκληρο το Μεσογειακό χώρο.

Η διατριβή αυτή βασίζεται κυρίως στη γεωμορφολογική ανάλυση μιας περιοχής, η οποία συνδυαζόμενη με άλλους παράγοντες όπως η γεωλογία, η κλιματολογία και οι χρήσεις γης, μέσω κλασσικών ή -state of the art- μεθόδων (τεχνητή νοημοσύνη), μπορεί να παράξει τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Η διατριβή δομείται ως εξής:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στην Εισαγωγή περιγράφεται το περίγραμμα των μελετώμενων προβλημάτων καθώς και των μεθοδολογιών, εστιάζοντας κυρίως στη τεχνητή νοημοσύνη.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφονται με λεπτομέρεια τα μελετώμενα προβλήματα και οι παράγοντες που τα επηρεάζουν. Επιπλέον παρατίθενται οι τρόποι προσέγγισης τους από άλλους ερευνητές είτε αυτοί εφαρμόζουν κλασσικές μεθόδους είτε μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης.

Κεφάλαιο 3: Περιοχή Μελέτης

Στο Κεφάλαιο 3 συγκεντρώνεται η βιβλιογραφία η οποία αφορά το νησί της Σάμου και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

Η Μεθοδολογία χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες: Συλλογή δεδομένων, παραγωγή δευτερογενών δεδομένων, κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων και τέλος μέθοδοι -state of the art- τεχνητής νοημοσύνης. Αρχικά παρουσιάζονται τα πρωτογενή δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν, και έπειτα αναλύονται όλες οι μεθοδολογίες οι οποίες εφαρμόστηκαν για την παραγωγή των δευτερογενών δεδομένων μέσω Γ.Σ.Π, την ανάλυση τους μέσω κλασσικών μεθόδων (π.χ. RUSLE) και τέλος την εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (ασαφής λογική και νευρωνικά δίκτυα).

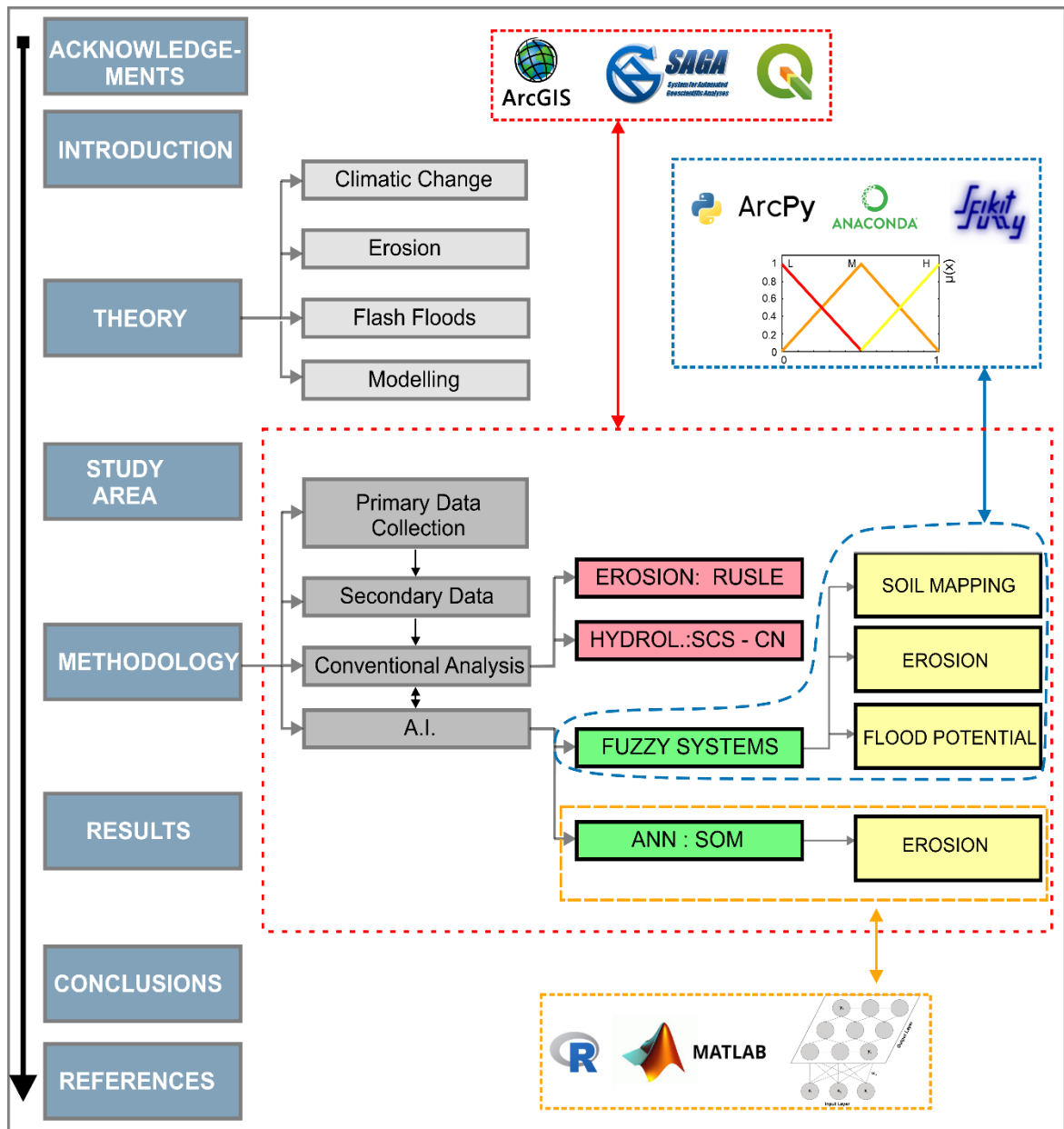
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα & Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν μετά από την εφαρμογή της μεθοδολογίας η οποία αναπτύχθηκε προηγουμένως. Το κεφάλαιο χωρίζεται σε τρεις μεγάλες υπο-ενότητες στις οποίες παρουσιάζονται : δευτερογενείς παράμετροι, τα αποτελέσματα των κλασσικών μεθοδολογιών και τέλος τα αποτελέσματα των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Επιπλέον γίνεται σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής, αναπτύσσουμε τα συμπεράσματα, συγκρίνοντας την αποδοτικότητα και την ευκολία εφαρμογής των μεθόδων οι οποίες υλοποιήθηκαν. Επιπλέον αναγνωρίζονται τα τμήματα της περιοχής μελέτης τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά την ανάπτυξη διαχειριστικών σχεδίων. Τέλος αναλύουμε τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε στα πλαίσια της μελλοντικής έρευνας να δημιουργήσουμε ακόμα αποδοτικότερα εργαλεία για την ανάλυση της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου.

Τέλος οι βιβλιογραφικές αναφορές εμφανίζονται στην αντίστοιχη ενότητα στο τέλος της διατριβής ενώ κάποιοι ενδεικτικοί κώδικες οι οποίοι αναπτύχθηκαν κυρίως για την υλοποίηση των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης παρατίθενται στο Παράρτημα.



Σχηματικό Διάγραμμα της γενικότερης δομής της εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η διατριβή δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την βοήθεια της οικογένειας μου στην οποία οφείλω τη μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη και αγάπη μου αλλά και του επιβλέποντα Καθηγητή μου, Θεόδωρο Γκουρνέλο που με βοήθησε να βλέπω να πράγματα μέσα από μια ευρύτερη επιστημονική σκέψη και με βοήθησε με να συγκεράσω την επιστήμη της Γεωλογίας με άλλες επιστήμες όπως η Πληροφορική και η Μηχανική Εκμάθηση. Όλα αυτά τα χρόνια η συνεργασία μας υπήρξε άριστη και εποικοδομητική και δε θα ξεχάσω ποτέ τις ευκαιρίες που μου έδωσε όλα αυτά τα χρόνια, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο να βελτιώσω τις οργανωτικές και ερευνητικές μου δεξιότητες αλλά και να εργαστώ ως ομάδα με άλλους συναδέλφους πάνω στον τομέα της Γεωλογίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Δρ. Δρ. Ευελπίδου Νικολέττα –Νίκη, καθώς ήταν εκείνη που μου έδωσε τις βάσεις για την καλή χρήση των Γ.Σ.Π., παρέχοντας πολύτιμη βοήθεια όπου υπήρξε ανάγκη, αλλά και τη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια και τις ευκαιρίες που μου δόθηκαν μέσω ερευνητικών προγραμμάτων αλλά και διεθνών συνεργασιών. Επίσης τον Καθηγητή Δρ. Πούλο Σεραφείμ, για την παροχή κρίσιμων συμβουλών σχετικά με τις διεργασίες σε ποτάμια περιβάλλοντα και την διάβρωση, για τις επισημάνσεις αλλά και διορθώσεις της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Η συνεχής συνεργασία μας και σε ερευνητικά προγράμματα, επιστημονικές δημοσιεύσεις ή άλλα θέματα έχει διευρύνει τους ορίζοντες μου και έχει βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο βλέπω την επιστήμη μας.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την βοήθεια τους κατά τα τελικά στάδια υλοποίησης της διατριβής και τα ιδιαίτερος χρήσιμα σχόλια τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Καθηγητή Νάστο Παναγιώτη και τον Επίκουρο Καθηγητή Βασιλάκη Εμμανουήλ για την συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια και τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσαν σε θέματα κλιματολογίας, Γ.Σ.Π και τηλεανίχνευσης.

Δε θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω το δύσκολο αυτό εγχείρημα χωρίς τους φίλους μου, που βρίσκονταν εκεί κατά τη διάρκεια όλης της εκπόνησης της, παρέχοντας συμβουλές και βοήθεια αλλά και στιγμές χαλάρωσης και γέλιου, ενώ με βοήθησαν και στις εργασίες υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Σάμου.

Τέλος του Υπαλλήλους της Ε.Μ.Υ., του Ε.Α.Α και της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας Σάμου για την παροχή δεδομένων, αλλά και το κληροδότημα Παπαδάκη του Ε.Κ.Π.Α. για την οικονομική υποστήριξη.

Σας ευχαριστώ όλους θερμά!

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ανάγλυφο του πλανήτη διαμορφώνεται μέσα από αργές γεωλογικές διεργασίες αλλά κάποιες φορές εμφανίζονται ξαφνικά ακραία γεγονότα τα οποία προκαλούν ταχύτατες μεταβολές, γνωστές και ως φυσικές καταστροφές, οι οποίες φαίνεται να αυξάνουν τα τελευταία χρόνια εξαιτίας κυρίως της κλιματικής αλλαγής. Τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές συνιστούν οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι πλημμύρες και οι τυφώνες, ενώ και η διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ως φυσική καταστροφή κατά μια ευρύτερη έννοια.

Το **αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής** είναι η μελέτη της επικινδυνότητας διάβρωσης του εδάφους καθώς και του πλημμυρικού κινδύνου στο νησί της Σάμου με τη χρήση μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης (π.χ. νευρωνικά δίκτυα και ασαφής λογική) για τη διερεύνηση των παραγόντων/διεργασιών που επηρεάζουν τις προαναφερθείσες φυσικές καταστροφές. Η επιλογή της Σάμου βασίζεται στο γεγονός ότι παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία γεωλογικών και γεωμορφολογικών διεργασιών, η δε **πρωτοτυπία της διατριβής** αφορά κυρίως στην εφαρμογή μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης.

Τα κυριότερα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000, ψηφιακά μοντέλα εδάφους με ανάλυση η οποία κυμαίνεται από 30x30m έως 5x5m, γεωλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000, μετεωρολογικά – κλιματολογικά δεδομένα για τα τελευταία 40 έτη, δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 (μέσης διακριτικής ικανότητας) και Worldview 8 καναλιών (υψηλής διακριτικής ικανότητας), και δεδομένα χρήσεων γης (από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα CORINE 2018). Επιπλέον δεδομένα προέκυψαν, μετά από εκτεταμένη εργασία πεδίου, η οποία περιλαμβάνει χαρτογράφηση και μέτρηση διαφόρων τοπογραφικών, γεωμορφολογικών και υδρολογικών μεταβλητών καθώς και τη συγκέντρωση ιστορικών στοιχείων σχετικά με πλημμυρικά γεγονότα.

Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) καθώς και με τη χρήση των λογισμικών-γλωσσών προγραμματισμού MATLAB, R, PYTHON και ANACONDA. Αναλύοντας τα πρωτογενή δεδομένα, μέσω του ArcMap και του SAGA GIS κατά κύριο λόγο, υπολογίζονται διάφορες δευτερογενείς παράμετροι (π.χ. κλίσεις, υδρογραφικό δίκτυο, λιθολογία, δείκτης NDVI, τοπογραφικοί δείκτες), συμπεριλαμβανομένων και κάποιων τοπογραφικών δεικτών νέας γενιάς όπως ο HAND και ο DUNE. Όλα τα δεδομένα συγκεντρώνονται και δημιουργείται μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Μέσω του συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων μεταξύ τους με τη χρήση διαφόρων μοντέλων (είτε κλασσικών είτε τεχνητής νοημοσύνης) μπορεί να γίνει η εκτίμηση της διάβρωσης αλλά και του

πλημμυρικού κινδύνου.

Τα **τελικά αποτελέσματα** περιλαμβάνουν την εφαρμογή κλασσικών μεθόδων εκτίμησης της διάβρωσης και των υδρολογικών συνθηκών (RUSLE και μέθοδο SCS-CN) στην περιοχή μελέτης καθώς και την υλοποίηση μοντέλων προσδιορισμού της επικινδυνότητας του κινδύνου της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου με τη βοήθεια μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Συγκεκριμένα υλοποιείται ένας μεγάλος αριθμός από διαφορετικά συστήματα ασαφούς λογικής τύπου Mamdami και συστήματα νευρωνικών δικτύων τύπου SOM για την εκτίμηση της διάβρωσης στη περιοχή μελέτης. Επιπλέον γίνεται διερεύνηση του πλημμυρικού δυναμικού σε 4 υδρολογικές λεκάνες του νησιού της Σάμου, σε επίπεδο υπο-λεκάνης μέσω της υλοποίησης ασαφών συστημάτων καθώς και η κατασκευή ενός αυτοματοποιημένου ασαφούς συστήματος πρόβλεψης του πάχους του εδάφους συστημάτων.

Μετά από **σύγκριση μεταξύ** των μοντέλων τα οποία υλοποιήθηκαν διαπιστώνουμε ότι τόσο ο αριθμός εισόδων αλλά και ο τύπος του μοντέλου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν, και σχολιάζεται το βέλτιστο μοντέλο ανά περίπτωση εφαρμογής. Μέσω των προτεινόμενων μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης έχουμε τη δυνατότητα να αναγνωρίσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια τη χωρική κατανομή των περιοχών με μεγάλη επικινδυνότητα διάβρωσης και πλημμυρών, χρησιμοποιώντας δεδομένα τα οποία εκ της φύσης τους δεν είναι ιδιαίτερα ακριβή. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο σε **τοπικό, εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο** για τη καλύτερη διαχείριση των φυσικών καταστροφών, το σχεδιασμό καλύτερων διαχειριστικών σχεδίων ή έργων υποδομής από τους εμπλεκόμενους φορείς.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μοντελοποίηση Φυσικών Καταστροφών, Διάβρωση, Πλημμυρικός Κίνδυνος, Γεωμορφολογία, Τεχνητή Νοημοσύνη, Ασαφής Λογική, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

ABSTRACT

Our planet is formed through slow geologic processes, but there are some rare occurrences of extreme events which can change the landscape rapidly. These are also known as natural disasters which are increasing during the last century mainly because of climatic change. The most important natural disasters are earthquakes, volcanic eruptions, typhoons and floods, while soil erosion can also be considered as a natural disaster.

The **aim of this thesis** is to identify erosion and flood risk, by determining the relationships between various factors/processes through the use of artificial intelligence (fuzzy logic and artificial neural networks) and apply this methodology in a study case area (Samos island, Greece). Samos island is selected because of interesting geological and geomorphological characteristics and the occurrence of extended natural hazards.

The **primary data** that are used include 1: 50,000 topographic maps, digital elevation models with a resolution ranging from 30x30m to 5x5m, 1: 50,000 geological maps, meteorological-climatic data for the last 40 years, satellite images SENTINEL-2 (moderate resolution) and Worldview-2 (high resolution), and land use data (from the European Project CORINE 2018). Additional data were obtained after extensive fieldwork, which includes mapping and measurement of various topographic, geomorphological and hydrological variables as well as the collection of historical data of flood events.

For the **data analysis** we use Geographic Information Systems (GIS) as well as MATLAB, R, PYTHON and ANACONDA software - programming languages. By analyzing the primary data, mainly through ArcMap and SAGA GIS, various secondary parameters are calculated (e.g. slope, river network, lithology, NDVI index, topographic indices), including some modern topographic indicators such as HAND and DUNE. All data are collected in a geo-database that is created for the study area. By combining various parameters using different models (either classical or artificial intelligence methods) we can estimate erosion and flood risk for the study area.

The **results** are obtained through the application of classical methods for estimating erosion and hydrological conditions (RUSLE & SCS-CN method) as well as the implementation of models for determining the risk of erosion and flood risk using artificial intelligence methods. In particular, a large number of different Mamdami-type fuzzy logic and SOM-type neural network systems are implemented for the estimation of erosion in the study area. Flood potential

is being investigated in four hydrological basins of the island of Samos, at the sub-basin level through the implementation of fuzzy logic systems and the creation of an automated fuzzy system for predicting the soil thickness of systems.

The **comparison** between the models, shows that both the number of inputs and the model characteristics greatly affect the results obtained, and an optimal model is selected for each application. Through the proposed artificial intelligence methods we have the ability to accurately identify the spatial distribution of areas with high risk of erosion and / or flooding, using data that is not inherently accurate. These methods can prove valuable at local, national, and European level for better planning and management of the environment.

KEYWORDS: Natural Hazards Modelling, Soil Erosion, Flood Risk, Geomorphology, Artificial Intelligence, Fuzzy Logic, Neural Networks

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	18
1.1 Η διάβρωση του εδάφους, μια φυσική καταστροφή.....	19
1.2 Πλημμυρικά φαινόμενα και η κλιματική αλλαγή.....	20
1.3 Εκτίμηση επικινδυνότητας: Ένα σύνθετο πρόβλημα και η συμβολή της παρούσας διατριβής.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο	23
ΕΝΟΤΗΤΑ 2Α: ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	23
2.1 Το κλίμα της Μεσογείου και η κλιματική αλλαγή.....	23
2.2 Το Έδαφος η Διάβρωση και η Αποσάθρωση.....	27
2.2.1 Έδαφος.....	27
2.2.2 Διάβρωση και αποσάθρωση.....	28
2.2.3 Γεωμορφές διάβρωσης.....	30
2.2.4 Παράγοντες ελέγχου της διάβρωσης.....	31
2.2.5 Εκτίμηση της διάβρωσης	33
2.3 Πλημμυρικός κίνδυνος.....	38
2.3.1 Υδρολογική λεκάνη	39
2.3.2 Υδρολογικό ισοζύγιο	40
2.3.3 Επιφανειακή απορροή.....	40
2.3.4 Παράγοντες που προκαλούν και επηρεάζουν τις πλημμύρες	42
2.3.5 Υδρογράφημα	43
ΕΝΟΤΗΤΑ 2Β: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	49
2.4 Τεχνητή Νοημοσύνη	49
2.4.1 Ασαφής Λογική και Ασαφή Συστήματα	50
2.4.2 Νευρωνικά δίκτυα	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιοχή Μελέτης.....	71
3.1 Γεωγραφία.....	71
3.2. Κλίμα.....	72
3.2.1 Θερμοκρασία.....	73
3.2.2 Βροχόπτωση.....	74
3.2.3 Άλλες κλιματικές παράμετροι.....	76
3.3. Γεωλογία	77
3.3.1 Κατηγορίες Πετρωμάτων.....	77

3.3.2 Η δομή της Σάμου	80
3.3.3.Νεογενείς λεκάνες.....	86
3.3.4 Τεκτονική.....	91
3.4 Γεωμορφολογία.....	95
3.4.1 Μορφολογία.....	95
3.4.2 Γεωμορφές	96
3.4.3 Υδρογραφικό δίκτυο	97
3.5.Έδαφος & Χρήσεις γης.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία.....	100
ΕΝΟΤΗΤΑ 4Α: ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	101
4.1. Πρωτογενή Δεδομένα	101
4.1.1 Τοπογραφικά δεδομένα.....	101
4.1.2 Γεωλογία περιοχής.....	103
4.1.3 Χρήσεις γης.....	104
4.1.4 Δορυφορικές εικόνες.....	106
4.1.5 Ιστορικό πλημμυρών.....	107
4.1.6. Κλιματολογικά δεδομένα	108
4.1.7 Ένταση διάβρωσης εξαιτίας της βροχής (Παράγοντας R).....	108
4.1.8 Υδρολογική ομάδα Εδάφους (Hydrologic Soil Groups)	109
ΕΝΟΤΗΤΑ 4Β: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	110
4.2 Τοπογραφικές παράμετροι.....	110
4.2.1 Κλίση.....	110
4.2.2 Παράγοντας κλίσης και μήκους κλίσεως (LS factor)	111
4.2.3 Προσανατολισμός κλίσεων	112
4.2.4 Τοπογραφικός δείκτης TWI (Topographic Wetness Index)	112
4.2.5 Μοντέρνοι τοπογραφικοί δείκτες : HAND, DUNE , lnHAND, rDUNE.....	114
4.3 Υδρολογικές λεκάνες & Υδρογραφικό δίκτυο	117
4.3.1 Μορφομετρική ανάλυση υδρολογικών λεκανών	118
4.4 Λιθολογία.....	122
4.5 Δείκτης NDVI.....	122
ΕΝΟΤΗΤΑ 4Γ: ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	124
4.6 Τάση κλιματικών παραμέτρων	124
4.7 Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE)	125
4.7.1 Παράγοντας R (ένταση διάβρωσης εξαιτίας της βροχής).....	125

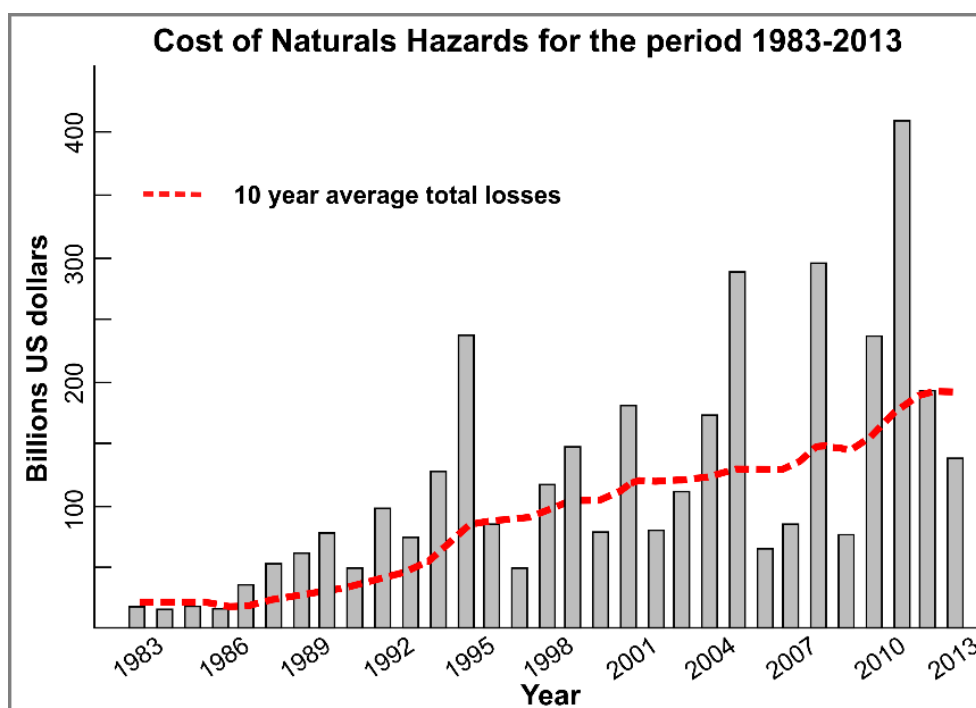
4.7.2 Παράγοντας K (διαβρωσιμότητα του εδάφους).....	126
4.7.3 Παράγοντας C (επίδραση χρήσεων γης).....	127
4.7.4 Παράγοντας LS (τοπογραφικός παράγοντας RUSLE)	128
4.7.5 Παράγοντας P (παράγοντας διαχειριστικών πρακτικών).....	129
4.8 Υδρολογική απόκριση λεκάνης - Μεθόδος SCS-CN	131
4.8.1 Ενεργή βροχόπτωση (Pe).....	132
4.8.2 Ικανότητα κατακράτησης νερού από την υδρολογική λεκάνη (S)	132
4.8.3 Συντελεστής καμπύλης απορροής (CN)	133
4.8.4 Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα της μεθόδου SCS	134
ΕΝΟΤΗΤΑ 4Δ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ	136
4.9 Ασαφής Λογική.....	136
4.9.1 Συστήματα ασαφούς συμπερασματολογίας (FIS) Mamdami.....	136
4.9.2 Αυτοματοποιημένη εκτίμηση του πάχους του εδάφους	140
4.9.3 Εκτίμηση διάβρωσης με την υλοποίηση πέντε διαφορετικών μοντέλων ασαφούς λογικής.....	143
4.9.4 Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας μέσω συστήματος ασαφούς λογικής	146
4.10 Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα – Self Organized Maps (SOM).....	149
4.10.1 Εύρεση βέλτιστου αριθμού συστάδων (clusters).....	151
4.10.2 Ιεραρχική ταξινόμηση.....	152
4.10.3 Εκτίμηση διάβρωσης με τη χρήση νευρωνικών δικτύων	153
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα και Σύζήτηση	154
ΕΝΟΤΗΤΑ 5Α: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	154
5.1 Τοπογραφικές παράμετροι.....	154
5.1.1 Κλίσεις	154
5.1.2 Παράγοντας κλίσης και μήκους κλίσεως (LS factor)	156
5.1.3 Προσανατολισμός κλίσεων.....	158
5.1.4 Τοπογραφικός Δείκτης TWI (Topographic Wetness Index)	159
5.1.5 Τοπογραφικός δείκτης HAND (Height Above the Nearest Drainage) & lnHAND.....	161
5.1.6 Τοπογραφικός δείκτης DUNE (Dissipation per Unit length) & rDUNE.....	163
5.2 Υδρολογικές λεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο	166
5.2.1. Μορφομετρική ανάλυση υδρολογικών λεκανών	167
5.3 Λιθολογία.....	172
5.4 Δείκτης NDVI.....	173

ΕΝΟΤΗΤΑ 5Β: ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	176
5.5 Ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων	176
5.5.1 Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και ύψους βροχής	176
5.5.2 Ημερήσιες τιμές ύψους βροχής.....	177
5.5.3 Τάση Θερμοκρασίας	179
5.5.4 Τάση συνολικού ύψους βροχόπτωσης.....	180
5.5.5 Ανάλυση της συχνότητας εμφάνισης των έντονων βροχοπτώσεων	181
5.5.6 Ανάλυση των μοτίβων εμφάνισης της βροχόπτωσης	183
5.7 Διάβρωση Εδαφών: Μοντέλο RUSLE	185
5.7.1 Παράγοντας R (διάβρωση λόγω της βροχής)	185
5.7.2 Παράγοντας K (διαβρωσιμότητα του εδάφους).....	186
5.7.3 Παράγοντας C (επίδραση χρήσεων γης).....	187
5.7.4 Παράγοντας LS (τοπογραφικός παράγοντας).....	188
5.7.5 Παράγοντας P (παράγοντας διαχειριστικών πρακτικών).....	189
5.7.6 Η εκτιμώμενη διάβρωση του εδάφους μέσω του μοντέλου RUSLE.....	190
5.8. Υδρολογική ανάλυση SCS-CN.....	192
ΕΝΟΤΗΤΑ 5Γ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ.....	196
5.9. Αυτοματοποιημένο ασαφές σύστημα εκτίμησης πάχους του εδάφους	196
5.9.1. ΜΟΝΤΕΛΟ Π1: Εκτίμηση πάχους εδάφους με εισόδους την κλίση και το CLC 2018.....	196
5.9.2. ΜΟΝΤΕΛΟ Π2: Εκτίμηση πάχους εδάφους με εισόδους την κλίση και τον δείκτη NDVI.	199
5.9.3 Σύγκριση των δυο περιπτώσεων	200
5.10 Εκτίμηση διάβρωσης του εδάφους μέσω μοντέλων ασαφούς λογικής	202
5.10.1 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ1: Ασαφές μοντέλο δυο μεταβλητών (LS factor & NDVI). 202	
5.10.2 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ2: Ασαφές μοντέλο δυο μεταβλητών (LS factor & Erodibility)	204
5.10.3 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ3: Ασαφές μοντέλο τριών μεταβλητών (LS, NDVI, Erodibility).....	206
5.10.4 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ4: Ασαφές μοντέλο τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον TWI.	208
5.10.5 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ5: Ασαφές μοντέλο τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον rDUNE.....	210
5.11. Συγκριση μοντέλων ασαφούς λογικής και μοντέλου RUSLE.....	212
5.11.1 Ιστογράμματα.....	212

5.11.2 Κατανομή μέσων τιμών για κάθε τύπο χρήσεων γης και λιθολογίας.....	213
5.11.3 Σύγκριση μέσων τιμών ανά υδρολογική λεκάνη	214
5.12 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου μέσω ασαφούς συστήματος.....	216
5.12.1 Πλημμυρικός κίνδυνος Φουρνιώτικου.....	219
5.12.2 Πλημμυρικός κίνδυνος Μεγάλου Ρέματος	220
5.12.3 Πλημμυρικός κίνδυνος Ίμβρασου ποταμού.....	221
5.12.4 Πλημμυρικός κίνδυνος ρέματος Μελέτη.....	222
5.13 Εκτίμηση διάβρωσης του εδάφους με τη χρήση νευρωνικών δικτύων (SOM) .	223
5.12.1 ΜΟΝΤΕΛΟ N1: Χάρτης SOM τριών μεταβλητών	224
5.12.2 ΜΟΝΤΕΛΟ N2: Χάρτης SOM τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον rDUNE.....	227
5.12.3 ΜΟΝΤΕΛΟ N3 : Χάρτης SOM τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον TWI.	232
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	236
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	243
ΥΠΟΜΝΗΜΑ	274
Α. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΜΟΥ	274
Β. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΜΟΥ	275
.....	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

Οι γεωλογικές διεργασίες, διαμορφώνουν τον πλανήτη μέσα από σταδιακές διεργασίες που εξελίσσονται αργά στο χρόνο, αλλά κάποιες φορές εμφανίζονται ξαφνικά ακραία γεγονότα τα οποία προκαλούν μεγάλες καταστροφές σε μικρό χρόνο. Αυτά ονομάζονται **φυσικές καταστροφές**, οι οποίες πλήττουν συχνά τον πλανήτη μας, προκαλώντας σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις, ενώ κάποια γεγονότα προκαλούν και απώλειες ανθρωπίνων ζώων. Τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές συνιστούν οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι πλημμύρες και οι τυφώνες, ενώ και η διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ως φυσική καταστροφή κατά μια ευρύτερη έννοια. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, οι φυσικές καταστροφές, και συνεπακόλουθα ο αριθμός των ανθρώπων που επηρεάζονται από αυτές, παρουσιάζουν μια σημαντική αυξητική τάση τα τελευταία χρόνια (Hyndman & Hyndman, 2016) καθιστώντας έτσι την μελέτη τους ιδιαίτερα σημαντική για το μετριασμό των επιπτώσεων τους σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και τοπικό επίπεδο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής γίνεται μια διερεύνηση της διάβρωσης από το νερό αλλά και του πλημμυρικού κινδύνου με χρήση **τεχνητής νοημοσύνης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών**.



Σχήμα 1-1: Το οικονομικό κόστος όλων των φυσικών καταστροφών, σε παγκόσμιο επίπεδο, για τη περίοδο 1983-2013 (τροποποιημένο από Hyndman & Hyndman, 2016 – πηγή αρχικών δεδομένων: Swiss Reinsurance)

1.1 Η διάβρωση του εδάφους, μια φυσική καταστροφή.

Το έδαφος είναι ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους υποστηρίζοντας την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη ενώ η απώλεια του, γνωστή ως διάβρωση του εδάφους συνήθως γίνεται με αργό ρυθμό. Η διάβρωση οφείλεται κυρίως στη δράση του νερού, διαδικασία η οποία προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της απομάκρυνσης του εδάφους στην Ευρώπη και άλλες περιοχές του πλανήτη (Boardman & Poesen 2006), ενώ άλλες μορφές διάβρωσης όπως η αιολική και η διάβρωση εξαιτίας παγετώνων επικρατούν σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα του πλανήτη. Η διάβρωση από το νερό προκαλεί σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις, μέσω της μείωσης της παραγωγής αγαθών και της αύξησης του κόστους παραγωγής τους (Crosson, 1995; Garcia-Ruiz, 2010; Telles et al., 2011). Πολλοί ερευνητές θεωρούν τη διάβρωση ως **φυσική καταστροφή** (Mather, 1982; Gares et al., 1994; Berger & Rey, 2004; Rawat et al., 2011) καθώς μέσω της απομάκρυνσης του εδάφους προκαλείτε ερημοποίηση μιας περιοχής, φαινόμενο το οποίο ενισχύεται από την κλιματική αλλαγή ειδικά στις εύκρατες περιοχές συμπεριλαμβανομένης της Μεσογείου (Sheffield et al., 2012).

Επιπλέον η διάβρωση προκαλεί την υποβάθμιση των υδάτινων πόρων μέσω της αλλοίωσης των χημικών χαρακτηριστικών τους, τη πρόσχωση της κοίτης, γεγονός που αυξάνει τον πλημμυρικό κίνδυνο, καθώς και εκτεταμένες ζημιές σε ανθρώπινες κατασκευές όπως το οδικό δίκτυο. Ιδιαίτερα όταν το ισοζύγιο ανάμεσα στη διάβρωση και τη δημιουργία νέου εδάφους είναι αρνητικό τότε προκαλούνται μεγάλα προβλήματα σε ολόκληρο το οικοσύστημα (παροδικά ή μόνιμα) αλλά και στις ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελώντας με αυτό τον τρόπο ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα σε παγκόσμια κλίμακα (Cooke & Doornkamp, 1990; Saadat, 2014; Zakerinejad & Maerker, 2015; Gayen & Saha, 2017).

Η περιοχή της Μεσογείου αναμένεται να δεχτεί μεγάλη περιβαλλοντική πίεση εξαιτίας της **κλιματικής αλλαγής** (IPCC, 2019) η οποία θα προκαλέσει σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας, μείωση της βροχόπτωσης και μεταβολή της έντασης των φαινομένων καταιγίδας. Στην περιοχή αυτή η διάβρωσή, εάν ισχύσουν τα σενάρια της κλιματικής αλλαγής, θα αυξηθεί σημαντικά (Lagacherie et al., 2018) καθώς: (α) η ραγδαιότητα της βροχόπτωσης αναμένεται να αυξηθεί και (β) η βλάστηση να ελαττωθεί εξαιτίας των μειωμένων βροχοπτώσεων. Η αύξηση της διάβρωσης, αν δε ληφθούν μέτρα προστασίας για το μετριασμό της, μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στις δραστηριότητες του ανθρώπου (Guo et al., 2019) όπως η μειωμένη παραγωγή των καλλιεργειών, η διαφοροποίηση της σύστασης των εδαφών και την πρόσχωση της κοίτης των ποταμών από ιζήματα και συνεπακόλουθα της αύξησης των πλημμυρών.

1.2 Πλημμυρικά φαινόμενα και η κλιματική αλλαγή

Η συγκέντρωση του νερού σε περιοχές όπου υπό κανονικές συνθήκες είναι “ξηρές” ονομάζεται **πλημμύρα**, φαινόμενο το οποίο είναι από τις πιο συχνές και καταστρεπτικές φυσικές καταστροφές (Knapp et al. 2005, Hallegate et al. 2013). Τα πλημμυρικά φαινόμενα εμφανίζονται εξαιτίας διαφορετικών αιτιών και με διάφορες μορφές (Berz et al., 2001), όπως οι παραποτάμιες πλημμύρες (river floods), οι ξαφνικές πλημμύρες (flash floods) καθώς και οι παράκτιες πλημμύρες (coastal floods). Οι πλημμύρες στην ενδοχώρα αλλά και οι παράκτιες πλημμύρες συνήθως σχετίζονται με καταιγίδες και ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό όσον αφορά την κλίμακα και τις επιπτώσεις που προκαλούν (Doocy et al., 2013). Η αύξηση του πληθυσμού, τα νέα αστικά κέντρα και τεχνικά έργα που υλοποιούνται κοντά σε ποταμούς, αλλά και η αύξηση του αριθμού των ακραίων βροχοπτώσεων, εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, προκαλούν την αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και τις επιπτώσεις αυτών στον άνθρωπο (Min et al., 2011; Berg et al., 2013; Westra et al., 2014; Kundzewicz et al., 2018).

Η **κλιματική αλλαγή** επηρεάζει τόσο τη διάβρωση (όπως προαναφέρθηκε) όσο και τις υδρολογικές διεργασίες που επηρεάζουν άμεσα την απορροή των ποταμών και την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων σε παγκόσμιο επίπεδο. Αν και σε πολλές περιοχές του κόσμου αναμένεται μια αύξηση της μέσης βροχόπτωσης στο μέλλον, για την περιοχή της Μεσογείου τα κλιματικά μοντέλα δείχνουν μια σταδιακή μείωση της έως τα έτη 2081-2100. Ειδικά κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου η βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί έως και 25-30% ενώ ταυτόχρονα η μέση θερμοκρασία θα ανέβει κατά 4°C -6°C. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι μεταβολές αυτές αναμένεται να είναι μικρότερες, αλλά στο μεγαλύτερο μέρος της Μεσογείου εξακολουθεί να υπάρχει μια μείωση της βροχόπτωσης και αύξηση της μέσης θερμοκρασίας (Giorgi & Lionello, 2008). Ταυτόχρονα σε αυτή την περιοχή αναμένεται μια μείωση του αριθμού των ημερών με σημαντική βροχόπτωση (πάνω από 10mm), αλλά ταυτόχρονα και μια αύξηση των ημερών με ακραία γεγονότα (Giorgi & Lionello, 2008; Sillman et al., 2013). Έτσι οι περισσότερες μελέτες για τη περιοχή της Μεσογείου, αλλά και γενικότερα για την Ευρώπη (Πίνακας 1-1.), προβλέπουν μια αύξηση της έντασης και της συχνότητας των πλημμυρικών γεγονότων εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής (Kundzewicz et al., 2016).

Πίνακας 1-1: Εκτίμηση της μεταβολής της συχνότητας αλλά και της έντασης των πλημμυρών στον Ευρωπαϊκό χώρο, όπως προκύπτει από πρόσφατες μελέτες (τροποποιημένος από Kundzewicz et al., 2016)

Υπόμνημα: ↑ αύξηση, ↓ μείωση, * τοπικά αντίθετη μεταβολή σε σχέση με την κυρίως τάση, ↓ μεικτό μοτίβο μεταβολής

Reference	Central Europe	British Isles	Eastern Europe	Scandinavia-Finland	Iberia	Italy-Greece
Roudier et al. 2016	↑	↑	↓*	↓	↑	↑
Alfieri et al. 2015	↑*	↑*	↑S ↓N	↓	↑N ↓S	↑
Rojas et al. 2012, 2011	↑*	↑	↓*	↕	↕	↑*

1.3 Εκτίμηση επικινδυνότητας: Ένα σύνθετο πρόβλημα και η συμβολή της παρούσας διατριβής

Η ακριβής **πρόβλεψη των φυσικών καταστροφών**, είναι εξαιρετικά δύσκολη και για αυτό το λόγο προσεγγίζονται μέσω μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης που είναι ένα νέο πεδίο έρευνας. Για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου αλλά και της διάβρωσης χρησιμοποιούνται δεδομένα τα οποία δεν είναι συνήθως απολύτως ακριβή (τόσο στη χωρική τους κατανομή όσο και στην τιμή της κάθε μεταβλητής) κάνοντας έτσι την ανάλυση τους μέσω της **τεχνητής νοημοσύνης** πιο αποδοτική σε σχέση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους όπως το απλό λογικό μοντέλο (Boolean model).

Η **ασαφής λογική**, αποτελεί μία από αυτές τις μεθόδους και επεκτείνει το απλό λογικό μοντέλο μέσω της χρήσης γλωσσικών μεταβλητών (linguistic variables), ασαφών συνόλων (fuzzy sets) και λογικών κανόνων (fuzzy logic) για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Έτσι τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε γλωσσικές μεταβλητές (ομάδες), για τις οποίες η επικάλυψη μεταξύ των διαφόρων ομάδων δε μπορεί να αποφευχθεί (Burrough, 1993). Με αυτό το τρόπο προσεγγίζουμε καλύτερα τα προβλήματα τα οποία περιέχουν ασάφεια (Wang et al., 1990), έχοντας μειωμένη απώλεια πληροφορίας σε όλα τα στάδια μιας ανάλυσης σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα τα οποία κατά την εφαρμογή σε τέτοια προβλήματα ενισχύουν την απώλεια πληροφορίας και τις ανακρίβειες στην ανάλυση τους (Burrough et al., 1992). Τα ασαφή συστήματα (fuzzy systems), τα οποία εμπεριέχουν τη θεωρία ασαφών συνόλων και την ασαφή λογική, αποτελούν μια σημαντική βελτίωση, σε σχέση με απλά μοντέλα,

κατά τη μελέτη διαφόρων γεωπεριβαλλοντικών φαινομένων όπως η εδαφική διάβρωση και ο πλημμυρικός κίνδυνος (McBratney & Odeh, 1997; Gourmelos et al., 2001; Nandalal & Ratnayake, 2011; Yang et al., 2014; Kotinas et al., 2015), καθώς έχουν τη δυνατότητα να απεικονίζουν σταδιακές όσο και απότομες χωρικές μεταβολές, επιδεικνύοντας μεγάλη ευελιξία (De Gruijter et al., 1997) στη μελέτη μεγάλου εύρους φαινομένων.

Τα **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα** (ΤΝΔ, Artificial Neural Networks - ANNs), είναι ίσως ο σημαντικότερος πυλώνας της τεχνητής νοημοσύνης με ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Εμπνευσμένα από τις βιολογικές λειτουργίες και τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, περιλαμβάνουν αλληλοσυνδεδεμένους νευρώνες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται σε διαφορετικά δεδομένα εισόδου. Μέσω αυτών μπορούν να αναλυθούν διάφοροι τύπων δεδομένων για τα οποία είτε: (α) γνωρίζουμε το προσδοκώμενο αποτέλεσμα οπότε χρησιμοποιούνται μέθοδοι επιβλεπόμενης μάθησης (supervised learning) ή (β) δε γνωρίζουμε το ακριβές αποτέλεσμα και χρησιμοποιούμε μεθόδους μη επιβλεπόμενης μάθησης (unsupervised learning).

Τα ΤΝΔ μέσω των δυνατοτήτων εκμάθησης και γενίκευσης που έχουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ πλήθος εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων των γεωπεριβαλλοντικών. Ανάλογα με το μελετώμενο πρόβλημα και τα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα εφαρμόζονται πολλές διαφορετικές τεχνικές και τύποι νευρωνικών δικτύων για την καλύτερη προσέγγιση του επιτρέποντας μας να ομαδοποιούμε δεδομένα σε συστάδες βασιζόμενοι σε κοινά χαρακτηριστικά των αντικειμένων (clustering) ή να αναλύσουμε τα δεδομένα πιο αποδοτικά, εκπαιδεύοντας ένα νευρωνικό δίκτυο με κάποια δεδομένα και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το σε διαφορετικά δεδομένα για την πρόβλεψη του αποτελέσματος (Rumelhart & McClelland, 1986; Zhou, 1999, Rokach & Maimon, 2005; Saxena et al., 2017). Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν δώσει πολύ καλά αποτελέσματα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα (όπως η διάβρωση και ο πλημμυρικός κίνδυνος) για τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί τύποι και μέθοδοι νευρωνικών δικτύων (π.χ. Licanar & Nearing, 2003; Liu et al., 2013; Karymbalis et al., 2016; Polykretis & Chalkias, 2018; Gourmelos et al., 2018; Chen et al., 2020).

Σ' αυτό το πλαίσιο θα προσεγγίσουμε τη μελέτη των φαινομένων της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου στη **νήσο Σάμο**, η οποία έχει πλούσιο ιστορικό φυσικών καταστροφών (Gourmelos et al. 2006, Evelpidou et al., 2008; Kotinas et al. 2015), χρησιμοποιώντας ανά περίπτωση την κατάλληλη μέθοδο τεχνητής νοημοσύνης (ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα) αλλά και συνδυασμούς δεδομένων, αξιολογώντας κάθε φορά την απόδοσή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

ΕΝΟΤΗΤΑ 2Α: ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

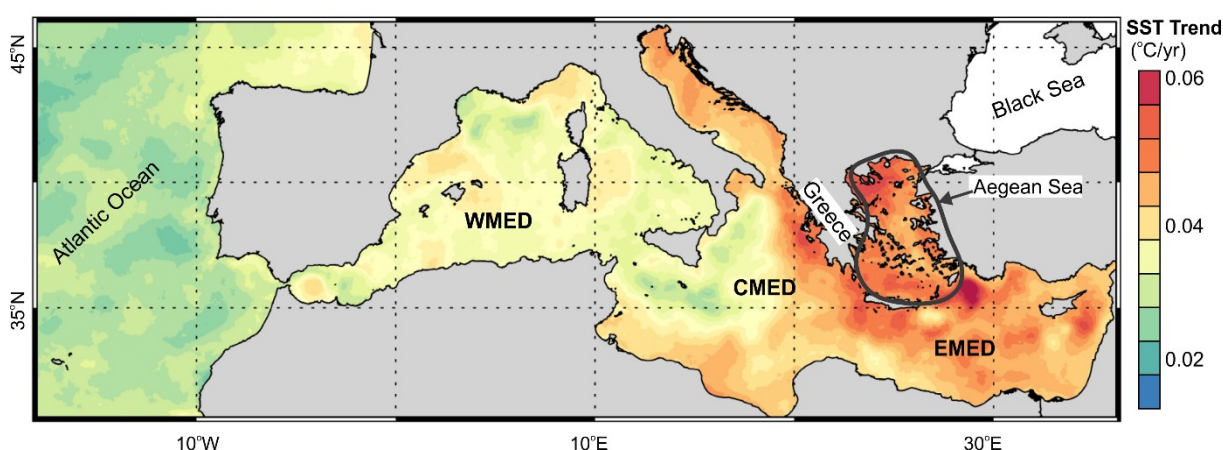
Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε το φυσικό περιβάλλον, το οποίο καθορίζει την ένταση αλλά και τον τόπο εκδήλωσης της διάβρωσης, των πλημμυρικών φαινομένων και άλλων φυσικών καταστροφών. Αρχικά θα εξετάσουμε το κλίμα και την κλιματική αλλαγή στην ευρύτερη περιοχή, και έπειτα θα εξετάσουμε τη θεωρητική πλευρά των φαινομένων της διάβρωσης του εδάφους αλλά και των πλημμυρών καθώς και κάποια βασικά θεωρητικά στοιχεία των κλασσικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης τους.

2.1 Το κλίμα της Μεσογείου και η κλιματική αλλαγή

Η **περιοχή της Μεσογείου** αποτελεί μια μεταβατική ζώνη ανάμεσα στο ερημικό κλίμα της Βόρειας Αφρικής και τα εύκρατα ή ηπειρωτικά υγρά κλίματα που χαρακτηρίζουν την κεντρική Ευρώπη και έτσι επηρεάζεται άμεσα από κλιματικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε αυτές (Giorgi & Lionello, 2008). Μικρές μεταβολές αυτών των φαινομένων (π.χ. μεταβολή της πορείας μιας καταιγίδας μέσου γεωγραφικού πλάτους ή των ξηρών καταβατικών ανέμων της υποτροπικής ζώνης υψηλής πίεσης) μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το κλίμα στη Μεσογείο. Η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται ως μια από τις πιο ευαίσθητες περιοχές (hot-spot) στην κλιματική αλλαγή (Giorgi, 2006; Diffenbaugh & Giorgi, 2012), καθώς αναμένεται μεγαλύτερη άνοδος της θερμοκρασίας και ελάττωση της βροχόπτωσης, σε σχέση με τις παγκόσμιες μεταβολές (IPCC, 2007; IPCC, 2014; Seager et al., 2014; IPCC, 2019). Ως συνεπακόλουθο, σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου γύρω από τη Μεσόγειο θάλασσα, τη βόρειο Αφρική αλλά και τη Μέση ανατολή υπάρχει μια τάση ερημοποίησης (Sheffield et al., 2012; Vincente-Serrano et al., 2014; Spironi et al., 2015; Pascoa et al., 2017). Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να εντείνεται με τον χρόνο (Mariotti et al., 2008), κάτι που επιβεβαιώνεται και από μεταγενέστερους ερευνητές, αλλά με μικρές τοπικές διαφοροποιήσεις εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους (Sanchez-Gomez et al., 2009; Dubois et al., 2012).

Για τη μελέτη της **μεταβολής της θερμοκρασίας** σε παγκόσμιο επίπεδο συνήθως, και καθώς η θερμότητα συσσωρεύεται σε θαλάσσιες μάζες οι οποίες καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση του πλανήτη (Trenberth et al., 2014; IPCC, 2014), χρησιμοποιούμε τη θερμοκρασία της θαλάσσιας επιφάνειας ως έναν δείκτη αυτής της μεταβολής (Sea Surface Temperature, SST). Κατά τη διάρκεια των χρόνων έχουν γίνει πολλές μελέτες σχετικά με της μεταβολές της θερμοκρασίας στη Μεσόγειο (π.χ. Nykjaer, 2009; Shaltout & Omstedt, 2014; Skliris et al., 2012; Pastor et al., 2019; Pisano et al., 2020) οι οποίες δείχνουν μια

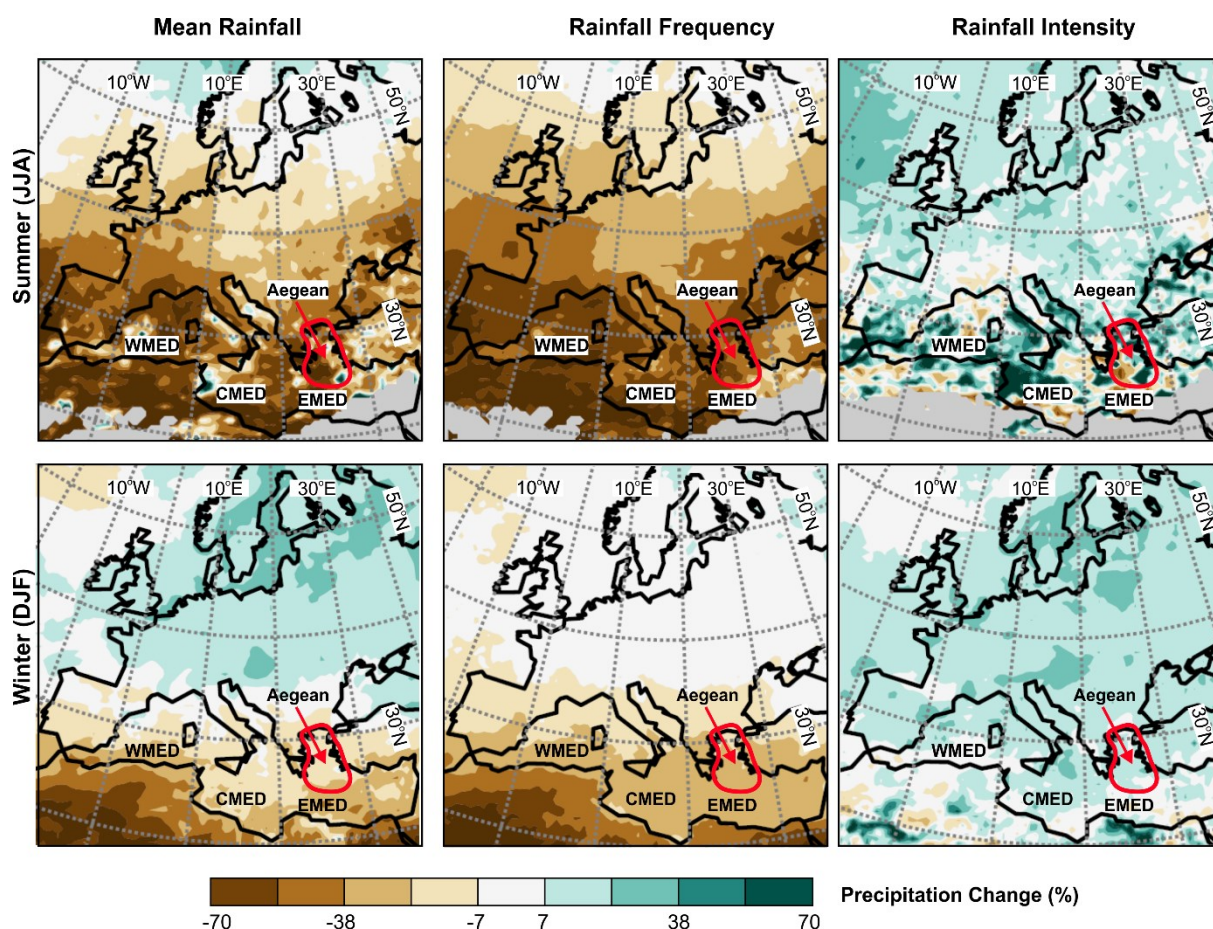
μεταβολή της SST κατά 0.036 έως 0.041 °C ανά έτος. Στην ανατολική Μεσόγειο (EMED) μάλιστα φαίνεται ότι η αύξηση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την δυτική, και πλησιάζει τους 0.05 °C ανά έτος στη λεκάνη της Λεβαντίνης και το Αιγαίο (Nykjaer, 2009; Casey et al., 2010; Skliris et al., 2012; Pisano et al., 2020). Επιπλέον η μέση αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται ότι παρουσιάζει εποχιακή μεταβολή (Skliris et al., 2012; Pisano et al., 2020), με την άνοιξη να έχει τη μεγαλύτερη αύξηση (>0.05 βαθμούς για ολόκληρη τη Μεσόγειο), το καλοκαίρι να ακολουθεί (0.044 °C), ενώ το φθινόπωρο και ο χειμώνας δείχνουν σημαντικά μικρότερη μεταβολή (<0.03 °C ανά έτος για ολόκληρη τη Μεσόγειο). Επιπλέον φαίνεται μια τάση αύξησης των ακραίων γεγονότων καύσωνα σε ολόκληρη την περιοχή (EEA, 2017), ειδικά στην ανατολική Ευρώπη και την Τουρκία.



Σχήμα 2-1: Τάση μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (SST) για την περιοχή της Μεσογείου και το Αιγαίο Πέλαγος. Τροποποιημένο από Pisano et al., 2020), όπου WMED, CMED, EMED: δυτική, κεντρική, ανατολική Μεσόγειος (Poulos & Kotinas, 2020)

Αν και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη θερμοκρασία φαίνεται να είναι σαφής, η επίδραση της στις βροχοπτώσεις έχει μεγάλη αβεβαιότητα (Shepherd, 2014) και φαίνεται να διαφοροποιείται αρκετά για διάφορες περιοχές της Μεσογείου (IPCC, 2019). Εδώ και αρκετά χρόνια, όλες οι προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί δείχνουν μια **ελάττωση των βροχοπτώσεων** στην περιοχή της Μεσογείου κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα (Pal et al., 2004; IPCC, 2007; Zanis et al. 2009), συνεχίζοντας την τάση των τελευταίων έξι δεκαετιών (Piervitali et al., 1997; IPCC, 2007). Επιπλέον η μείωση της βροχόπτωσης συνοδεύεται από αύξηση της εξάτμισης (Orlowsky & Seneviratne, 2012; Mariotti et al., 2015). Πιο πρόσφατες μελέτες (Donnelly et al., 2017; Jacob et al., 2018; Brogli et al., 2019) σχετικά με την Ευρώπη δείχνουν, μια τάση αύξησης της ετήσιας βροχόπτωσης στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη (κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος: DJF), ενώ αντίθετα στις Μεσογειακές περιοχές υπάρχει ένδειξη

μείωσης των βροχοπτώσεων, ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος -Ιούλιος - Αύγουστος : JJA). Παρόλο που οι βροχοπτώσεις μειώνονται, υπάρχει μια σαφής αύξηση των ακραίων γεγονότων (καταιγίδες) σχεδόν σε ολόκληρη τη περιοχή, μεταβολή η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την τοποθεσία αλλά και την εποχή που εξετάζουμε (Jacob et al., 2014; Fischer & Knutti, 2015; EEA, 2017).



Σχήμα 2-2: Ποσοστιαίες μεταβολές της βροχόπτωσης (μέση, συχνότητα, ένταση) για την περιοχή της Μεσογείου και της Κεντρικής – Βόρειας Ευρώπης για την εποχή του χειμώνα και του καλοκαιριού. (Τροποποιημένο από Brogli et al., 2019; Full Climate Change (FCC) simulation).

Για την **περιοχή μελέτης μας** (ανατολικό Αιγαίο) βλέπουμε ότι έχουμε μια μέση αύξηση της τάξης των $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 2-1) για την περίοδο 1982-2018, η οποία για την καλοκαιρινή περίοδο πλησιάζει τους $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ για τη χειμερινή περίοδο είναι λιγότερο από $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Pisano et al., 2020). Για τις άλλες δυο εποχές η μεταβολή είναι παρόμοια και είναι λίγο μικρότερη από το μέσο όρο του έτους. Όσον αφορά τη βροχόπτωση νεότερες έρευνες (Brogli et al., 2019; Σχήμα 2-2) δείχνουν μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης (μέση και συχνότητα βροχερών ημερών) κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, με μεγάλη όμως αύξηση της ραγδαιότητας, τάση που εμφανίζεται και κατά τους χειμερινούς μήνες σε πολύ μικρότερο βαθμό. Παρόλαυτα η βροχόπτωση επηρεάζεται από τοπικούς παράγοντες που

διαμορφώνουν το μικροκλίμα, οι οποίοι πρέπει να εξετάζονται. Για τον ελληνικό χώρο κάποιες μελέτες δείχνουν ότι κατά την υγρή περίοδο (Nastos & Zerefos, 2009) η ηπειρωτική Ελλάδα εμφανίζει μια πολύ μικρή αύξηση των βροχοπτώσεων ενώ στη νότια Ελλάδα μειώνονται. Ο αριθμός των συνεχόμενων βρόχινων ημερών ελαττώνεται, κυρίως στα δυτικά της Πίνδου (Nastos & Zerefos, 2009). Συνολικά έως το τέλος του 21ου αιώνα η βροχή αναμένεται να έχει μειωθεί έως και 20% στον Ελληνικό χώρο, αλλά μέχρι το 2050 αυτή η αλλαγή θα είναι σχετικά μικρή (Kapsomenakis et al., 2011). Η Κρήτη και η Πελοπόννησος αναμένεται να δουν τις μεγαλύτερες αλλαγές (15%) ενώ άλλες περιοχές του ελληνικού χώρου θα έχουν μείωση της βροχόπτωσης κατά 5-10%. Εξαίρεση αποτελεί το **Βόρειο Αιγαίο** για το οποίο υπάρχει η εκτίμηση ότι οι βροχοπτώσεις θα έχουν μια μικρή αύξηση. Παρόμοια τάση αναμένεται για την χειμερινή περίοδο (DJF) για όλο τον ελληνικό χώρο, ενώ για την άνοιξη αλλά και ιδιαίτερα για το καλοκαίρι η μείωση αναμένεται να είναι σημαντική σε ολόκληρο τον ελληνικό χώρο (10% κατά μέσο όρο για την άνοιξη και πάνω από 20% για το καλοκαίρι). Το φθινόπωρο υπάρχει μια τάση μικρής αύξησης των βροχοπτώσεων για όλη την Ελλάδα (5%) η οποία για το βόρειο Αιγαίο είναι ακόμα μεγαλύτερη. Η περιοχή μελέτης, καθώς βρίσκεται κοντά στη Μικρά Ασία εμφανίζει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά των Κυκλάδων και της Αττικής (Kapsomenakis et al., 2011), με μείωση της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα (10-15%), της άνοιξης (15-20%) και του καλοκαιριού (0-5%) και μια πολύ μικρή αύξηση κατά το φθινόπωρο (<5%).

2.2 Το Έδαφος η Διάβρωση και η Αποσάθρωση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν τα χαρακτηριστικά του εδάφους, οι τρόποι σχηματισμού του αλλά και οι πολύπλοκες διαδικασίες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης που συμβάλουν στη μεταφορά του εδάφους ή την αλλαγή των χαρακτηριστικών του.

2.2.1 Έδαφος

Το έδαφος αποτελεί ένα σημαντικό στρώμα μεταξύ της ατμόσφαιρας της λιθόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της βιόσφαιρας. Βρίσκεται παντού πάνω στον πλανήτη, εκτός από κάποιες περιοχές οι οποίες καλύπτονται από παγετώνες ή περιοχές στις οποίες αποκαλύπτεται το μητρικό πέτρωμα εξαιτίας της διάβρωσης και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ανοιχτό σύστημα στο οποίο συστατικά ανταλλάσσονται μεταξύ του εδάφους και του περιβάλλοντος χώρου του (Jenny, 1941). Εκτελεί πολλαπλές λειτουργίες που αποτελούν την βάση για την ανάπτυξη φυτών και ζώων, αποθηκεύει και ρυθμίζει το νερό, μετατρέπει την οργανική ύλη σε ανόργανα συστατικά και αποτελεί πηγή πρώτων υλών όπως πηλό και διάφορα ορυκτά (Holden, 2005).

Ο σχηματισμός του εδάφους είναι πολύπλοκη διαδικασία η οποία θα πρέπει να εξετάζονται τόσο δισδιάστατο προφίλ του εδάφους αλλά ταυτόχρονα και οι χωροχρονικές Οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό του εδάφους έχουν μελετηθεί από πολύ παλιά, και έχουν συνδυαστεί με διάφορους τρόπους για τη δημιουργία μοντέλων εδαφογένεσης (Πίνακας 2-1), με γνωστότερο όλων το μοντέλο του Jenny, 1941 αν και ο πρώτος που ασχολήθηκε με το θέμα ήταν ο Ρώσος Dokuchaev, πριν από το 1900, ο οποίος μαζί με άλλους Ρώσους επιστήμονες εξέφρασε το πρώτο μοντέλο (Afanasiev, 1927).

Ακόμα και σήμερα το **μοντέλο των 5 παραγόντων** του Jenny αποτελεί τη βάση σύγκρισης για όλα τα μοντέλα, και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της χωρικής κατανομής του εδάφους (Ciolkosz et al., 1989; Johnson & Hole, 1994; Schaetzl & Anderson, 2005). Έτσι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμού του εδάφους είναι το μητρικό πέτρωμα, η τοπογραφία, το κλίμα, η οργανική δραστηριότητα και ο χρόνος, τα οποία αλληλοεπιδρούν για να καθορίσουν τη χωρική και χρονική κατανομή του εδάφους, για την οποία κυρίαρχο ρόλο παίζει η γεωμορφολογία και η υδρολογική απόκριση μιας λεκάνης (Paton et al., 1995; Heimsath et al, 1999; Dixon et al, 2009; Botter et al, 2011). Το **πάχος τους εδάφους** είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό του και πολλοί ερευνητές κατά το παρελθόν το απομονώνουν, εξετάζοντας τους παράγοντες που το ελέγχουν και ειδικά τη γεωμορφολογία (Pelletier & Rasmussen, 2009; Catani et al., 2010).

Πίνακας 2-1: Τα πρώτα μοντέλα εδαφογένεσης και οι παράγοντες που τα διαμορφώνουν.

	Afanasiev, 1927	Jenny, 1941	Nikiforoff, 1949	Wilde, 1946
Παράγοντες	k: Κλίμα	cl: κλίμα		e: περιβαλλοντική επίδραση
	Φ: Οργανισμοί	o: οργανισμοί	Ομοίως με Afanasiev	b: βιολογική δραστηριότητα
	g: Υπέδαφος	p: μητρικό υλικό		g: γεωλογικό υπόβαθρο
	v: ηλικία	t: χρόνος		t: χρόνος
	-	r: μορφολογία	r: μορφολογία	-
Σχέση	$P = f(k, \Phi, g, v)$ $S = f(cl, o, r, p, t, \dots)$		$P = f(k, \Phi, g, v, r)$	$S = \int (g, e, b) dt$

Το πάχος του εδάφους ελέγχει σε σημαντικό βαθμό τις **υδρολογικές διεργασίες** σε μια λεκάνη απορροής καθώς τα εδάφη μεγάλου πάχους έχουν μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα νερού, επηρεάζοντας άμεσα τον ρυθμό κατείσδυσης (Woolhiser et al., 2006). Κάποιες μελέτες δείχνουν ότι το πάχος του εδάφους καθορίζεται κυρίως από τη γεωμορφολογία (Dietrich et al., 1995; Heimsath et al., 1997). Έτσι αρκετοί ερευνητές, χρησιμοποιώντας διαφορετικές προσεγγίσεις, μελετούν την επίδραση των διεργασιών στα πρανή μιας ορεινής περιοχής στο πάχος του εδάφους μέσω της γεωμορφολογίας (Heimsath et al., 2001; Braun et al., 2001; Pelletier & Rasmussen, 2009; Catani et al., 2010; Cohen et al., 2010; Patton, 2017; Patton et al., 2018). Καθώς η διαδικασία του σχηματισμού του εδάφους, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες χωρίς σαφώς καθορισμένα όρια μεταξύ τους (Lagacherie et al., 1996) η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των χαρακτηριστικών του εδάφους.

2.2.2 Διάβρωση και αποσάθρωση

Η **αποσάθρωση** (μηχανική, χημική) μαζί με τη διάβρωση αλλά και τις ενδογενείς δυνάμεις καθορίζουν τη μορφή του αναγλύφου λειτουργώντας δημιουργικά αλλά και καταστρεπτικά στη διαμόρφωση των γεωμορφών. Αρχικά και εξαιτίας της επίδρασης των δυνάμεων της φύσης έχουμε την εμφάνιση της αποσάθρωσης η οποία προκαλεί την ελάττωση της συνοχής των πετρωμάτων δημιουργώντας έναν μανδύα αποσάθρωσης πάνω από αυτά, ενώ η ένταση της καθορίζεται κυρίως από τις κλιματολογικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων και τον χρόνο. Το χαλαρό αυτό υλικό κάτω από τις

κατάλληλες συνθήκες μπορεί να μετατραπεί σε έδαφος το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών και άλλων ζώντων οργανισμών ενώ ταυτόχρονα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πόρους για τις ανθρώπινες κοινωνίες (White, 2006). Η διάβρωση μεταφέρει το χαλαρό υλικό από μια περιοχή σε κάποια άλλη, και προκαλείται από το νερό, τον άνεμο αλλά και τους παγετώνες. Το νερό είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που προκαλεί τη διάβρωση ειδικά στις εύκρατες περιοχές όπως οι Μεσογειακές, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας και μεταφέρει το χαλαρό υλικό από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα τμήματα μιας υδρογραφικής λεκάνης μέσω του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 2-3).

Το πρόβλημα της διάβρωσης του εδάφους είναι ιδιαίτερα έντονο στις εύκρατες ζώνες που περιλαμβάνουν τμήματα της Κεντρικής Ασίας, των Η.Π.Α., της Κίνας και της Ινδίας (Dregne, 1992; Barton et al., 2004; Valentin et al., 2008; Zheng, 2006; Robichaud et al. 2013; Sadeghi et al., 2015), στις οποίες είναι γνωστό και ως υποβάθμιση του εδάφους (Buttafuoco, 2012) επηρεάζοντας μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού. Σε αυτές τις περιοχές θα πρέπει να προσθέσουμε και τις περιοχές που περιβρέχονται από τη Μεσόγειο θάλασσα, για τις οποίες τα προβλήματα διάβρωσης είναι ιδιαίτερα έντονα (Boardman & Poesen, 2006; Garcia Ruiz, 2010; Panagos et al., 2015) και αναμένεται να γίνουν εντονότερα στο μέλλον (Nunes et al., 2008). Σε αυτές τις περιοχές κατά τη διάρκεια καταιγίδων έχουμε εμφάνιση έντονων πλημμυρικών φαινομένων, διάβρωση εδάφους σε μεγάλη έκταση, και αλλαγή της μορφολογίας των κοιτών (Poesen & Hooke 1997, Wittenberg et al. 2007, Ortega & Garzón-Heydt 2009, Machado et al. 2011), ενώ εξαιτίας της έντονης διάβρωσης έχει παρατηρηθεί ότι τα ποτάμια της Μεσογείου, έχουν μεγαλύτερη στερεοπαροχή (Poulos, 2020) σε σχέση με άλλα ποτάμια της Ευρώπης ή της Ασίας, γεγονός που αποδίδεται στις ειδικές συνθήκες της τοπογραφίας, λιθολογίας, κλίματος και βλάστησης (Vanmaercke et al. 2011).

Ο ελληνικός χώρος δεν αποτελεί εξαίρεση και μελέτες που έχουν γίνει δείχνουν μια αυξανόμενη τάση της διάβρωσης του εδάφους (Kourgiyalas et al., 2016) που ενισχύει τις τάσεις ερημοποίησης σε κάποιες περιοχές μέσω της αλλαγής του κλίματος και της απώλειας του εδαφικού καλύμματος.



Σχήμα 2-3: Η διαδικασία της διάβρωσης μεταφοράς του ιζήματος και απόθεσης του σε μια μικρή ορεινή λεκάνη της Σάμου (Κάμπος Μαραθοκάμπο, Ρέμα Μελέτη).

2.2.3 Γεωμορφές διάβρωσης

Η **διάβρωση του εδάφους** από το νερό στην ύπαιθρο εμφανίζεται σχηματίζοντας διαφορετικές γεωμορφές. Στα αρχικά της στάδια (κοντά στον υδροκρίτη) εμφανίζεται ως επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), εξελίσσεται σε αυλακωτή διάβρωση (rill erosion) κατά την οποία σχηματίζονται αυλακώσεις βάθους μερικών εκατοστών (<30 εκατοστά) και καταλήγει σε χαραδρωτική διάβρωση (gully erosion) κατά την οποία σχηματίζονται χαραδρώσεις, στις οποίες συγκεντρώνεται το νερό το οποίο διαβρώνει κατά βάθος συνήθως μέχρι να αποκαλυφθεί το μητρικό πέτρωμα (Morgan, 2005). Οι χαραδρώσεις αυτές αποτελούν τους πρώτους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, το οποίο σχηματίζεται σε σημεία όπου το νερό αρχίζει να συγκεντρώνεται και αποκτά μεγάλη μεταφορική ικανότητα διαβρωμένου υλικού, διαβρώνει κατά βάθος σχηματίζοντας κοιλάδες. Μια ιδιαίτερη μορφή μεταφοράς αποσθρωμένου υλικού εμφανίζεται σε απότομα πρανή καθώς αποσθρωμένο υλικό μεταφέρεται αργά προς τα κατάντι μέσω ερπυσμού και με την εμφάνιση επιφανειακής απορροής αυτό αφαιρείται τελείως από την περιοχή, μετακινούμενο προς χαμηλότερες περιοχές (Selby & Hodder, 1983).



Σχήμα 2-4: Μορφές διάβρωσης από το νερό και οι σχηματιζόμενες γεωμορφές στο νησί της Σάμου.

2.2.4 Παράγοντες ελέγχου της διάβρωσης

Μέσω της διάβρωσης απομακρύνεται τόσο το αποσαθρωμένο υλικό όσο και η επιφάνεια του εδαφικού ορίζοντα αλλά ταυτόχρονα νέο χαλαρό υλικό και νέο έδαφος σχηματίζονται, και έτσι δημιουργείται ένα ισοζύγιο ανάμεσα στο δυναμικό διάβρωσης μιας περιοχής και το δυναμικό παραγωγής νέου εδάφους, η ακριβής περιγραφή του οποίου είναι σχεδόν αδύνατη ειδικά για εκτεταμένες περιοχές (Alewell et al., 2015).

Ο ρυθμός διάβρωσης του εδάφους και του αποσαθρωμένου υλικού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι τη διαφοροποιούν ανάλογα με την περιοχή (Morgan, 2005; Ramos & Martínez-Casasnovas 2006; Wilkinson and Humphreys 2006; Martínez-Murillo et al. 2013). Ο σημαντικότερος ίσως παράγοντας που επηρεάζει την διάβρωση είναι η μορφολογία, και για αυτό το λόγο σε όλα τα μοντέλα διάβρωσης εμπεριέχονται διάφορα χαρακτηριστικά της (π.χ. προσανατολισμός κλίσης, μήκος κλίσης, καμπυλότητα κλίσης) ως ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. ULSE, RUSLE, ANSWERS; Merritt et al. 2003). Ανάλογα με την περιοχή μελέτης, τα χαρακτηριστικά της αλλά και με τη κλίμακα μελέτης υπάρχουν

διαφοροποιήσεις στον τρόπο που αυτά επιδρούν στην διάβρωση, δυσκολεύοντας έτσι τη δημιουργία ενός καθολικού μοντέλου για όλες τις περιοχές.

Εκτός από την μορφολογία, οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση είναι (Morgan,2005):

1. Συχνότητα και ένταση των βροχοπτώσεων. Καθώς η επιφανειακή αποροή είναι ο σημαντικότερος παράγοντας μεταφοράς του υλικού, ιδιαίτερα στις εύκρατες περιοχές, η διάβρωση ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων. Η ένταση της βροχόπτωσης αλλά και η χρονική διάρκεια της παίζουν το μεγαλύτερο ρόλο για τον καθορισμό της διάβρωσης (Wischmeier, 1962).

2. Υδρολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης (επιφανειακά, υπόγεια νερά και προυπάρχουσα υγρασία στο έδαφος), οι οποίες ελέγχουν τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής απορροής και συνεπακόλουθα της διάβρωσης από το νερό και ελέγχονται κυρίως από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά αλλά και τις προυπάρχουσες υδρολογικές συνθήκες εξαιτίας της βροχόπτωσης.

3. Ανθεκτικότητα του μητρικού πετρώματος. Το κάθε πέτρωμα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την αντοχή του στην αποσάθρωση και τη διάβρωση, ενώ επίσης καθορίζει και τα χαρακτηριστικά του εδαφικού μανδύα.

4. Μορφολογία της περιοχής. Ιδιαίτερα οι τοπογραφικές κλίσεις (Yang et al., 2011) αλλά και το μήκος κλίσης παίζουν καθοριστικό ρόλο καθορίζοντας την επιφανειακή απορροή και συνεπακόλουθα τη διάβρωση σε μια περιοχή. Ο προσανατολισμός της κλίσης καθορίζει τις προυπάρχουσες συνθήκες υγρασίας επιδρώντας έτσι και στο ρυθμό διάβρωσης, αλλά όχι με τρόπο που μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή μελέτης και τα χαρακτηριστικά της. Οι σκιερές περιοχές έχουν συνήθως πολύ μεγαλύτερη διάβρωση (Yair et al., 1980; Churchill, 1982; Marquez & Mora, 1992) αλλά σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. Fang et al., 2011) οι ηλιόλουστες πλαγιές έχουν μικρότερη απορροή, αλλά μεγαλύτερη παραγωγή ιζημάτων.

5. Βλάστηση / χρήσεις γης. Είναι ευρέως γνωστό ότι η βλάστηση επηρεάζει την διάβρωση αλλά και το σχηματισμό του εδάφους με πολλούς τρόπους (Collins et al., 2004). Υψηλά ποσοστά φυτοκάλυψης οδηγούν σε μειωμένη απορροή αλλά και διάβρωση του εδάφους, ενώ αλλαγές στις χρήσεις γης μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα διάβρωσης. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να προέρχονται είτε από φυσικά αίτια (φυσικές πυρκαγιές) είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες.

6. Ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης σε σημαντικό βαθμό μέσω της επέκτασης των υποδομών, των εμπρησμών αλλά

και της διαχείρισης των καλλιεργούμενων και λιβαδικών εκτάσεων (Kuznetsov et al., 1998; Noel et al., 2001).

Η διάβρωση είναι αλληλοσυνδεόμενη διαδικασία με την απορροή και τα πλημμυρικά φαινόμενα από τα οποία επηρεάζεται αλλά και επηρεάζει. Μια περιοχή η οποία παρουσιάζει μια σειρά από χαρακτηριστικά όπως υψηλές κλίσεις, χαμηλή βλάστηση και συχνή εμφάνιση ακραίων πλημμυρικών γεγονότων, αντιμετωπίζει ανεπανόρθωτα προβλήματα διάβρωσης (Wolka, 2015) και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προστατευτεί.

2.2.5 Εκτίμηση της διάβρωσης

Αν και είναι δυνατή η ακριβής μέτρηση της διάβρωσης για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα και για μια μικρή περιοχή μελέτης, όπως ένα αγρόκτημα, μια πλαγιά ή μια μικρή λεκάνη απορροής, κάτι τέτοιο δε μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα και για αυτό το λόγο σχεδιάζονται και χρησιμοποιούνται τα **μοντέλα εκτίμησης ή πρόβλεψης της εδαφικής διάβρωσης** στην περιοχή μελέτης (Morgan & Nearing, 2011). Ωθηση στη μοντελοποίηση του φαινομένου έδωσε, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η ανάπτυξη των δυνατοτήτων των υπολογιστικών συστημάτων, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) αλλά και η τηλεανίχνευση. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να μελετήσουμε πιο αποδοτικά, τα χωρικά χαρακτηριστικά της διάβρωσης του εδάφους αλλά και των διεργασιών που την προκαλούν (De Jong, 1994), και τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί πολλές ερευνες σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο.

Έτσι μέσω της μελέτης των πολύπλοκων αλληλοεπιδράσεων των διαφόρων παραγόντων που καθορίζουν τη διάβρωση έχουμε τη δυνατότητα να χαρτογραφήσουμε τις περιοχές διαφορετικού **βαθμού επικινδυνότητας διάβρωσης** (Park et al., 2011), κάτι που μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη έργων υποδομής αλλά και τη διαχείριση των χρήσεων γης με πιο αποδοτικό τρόπο. Κάποια από τα σχεδιαζόμενα μοντέλα επιχειρούν να ποσοτικοποιήσουν την διάβρωση με ποιο γνωστά από όλα τα μοντέλα “USLE” και RUSLE (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1991). Η τροποποιημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας γνωστή ως μοντέλο “RUSLE” (Wischmeier & Smith, 1978) είναι ένα εμπειρικό μοντέλο το οποίο βασίζεται και βελτιώνει την παγκόσμια εξίσωση εδαφικής διάβρωσης (“USLE”; Wischmeier & Smith, 1960). Τα δύο αυτά μοντέλα έχουν αποδείξει την αξία τους τα τελευταία 60 χρόνια με την εφαρμογή τους σε περισσότερες από 109 χώρες παγκοσμίως και την παραγωγή πάνω από 2,000 δημοσιεύσεων (Alewell et al., 2019). Πολλά ακόμα γνωστά μοντέλα όπως τα “SWAT”,

“AnnAGNPS”, “Watem/Sedem” και “CSLE” (Arnold et al., 1998; Cronshey & Theurer, 1998; Van Rompaey et al., 2001; Liu et al., 2002) χρησιμοποιούνται ευρέως ανά την υφήλιο (με περίπου άλλες 2,000 δημοσιεύσεις συνολικά) αυξάνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την επιτυχία της συγκεκριμένης οικογένειας μοντέλων σε σχέση με άλλες κατηγορίες. Η επιτυχία του οφείλεται στο μεγάλο βαθμό ευελιξίας, παραμετροποίησης αλλά και της πλήρους βιβλιογραφίας κάτι το οποίο το κάνει να λειτουργεί σε πολλές περιοχές του πλανήτη με καλά αποτελέσματα. Πολλοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι πιο πολύπλοκα μοντέλα δε δείχνουν να δίνουν απαραίτητως καλύτερα αποτελέσματα καθώς αυξάνεται η αβεβαιότητα τους εξαιτίας των περισσότερων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της διάβρωσης (Quinton, 2013; Alewell et al., 2019), ενώ ταυτόχρονα δε θα πρέπει να ξεχνάμε ότι οποιοδήποτε μοντέλο απλά προσπαθεί να προσεγγίσει την πραγματικότητα και πάντα θα διαφέρει από αυτή.

Η εφαρμογή τέτοιων μοντέλων παραμένει να είναι μια επίπονη διαδικασία καθώς θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μια σειρά από παράγοντες που την διαμορφώνουν ενώ ταυτόχρονα να φροντίζουμε ότι τα μοντέλα αυτά είναι εύρωστα και χρησιμοποιούνται σωστά και με τις ορθές παραμέτρους. Τα βασικά προβλήματα που επηρεάζουν την εφαρμογή των μοντέλων διάβρωσης (Boardman, 2006) είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων, η πολυπλοκότητα, το κόστος ανάπτυξης, η διαδικασία επικύρωσης μοντέλου (validation) και τέλος η προσαρμογή του μοντέλου σε διαφορετικές κλίμακες (χωρικές και χρονικές).

2.2.5.1 Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά των μοντέλων εκτίμησης της διάβρωσης

Τα μοντέλα διάβρωσης του εδάφους ανάλογα τον τρόπο δημιουργίας τους χωρίζονται (Wheater et al., 1993; Lal, 2017) στους εξής τύπους μοντέλων:

A. Εμπειρικά μοντέλα. Βασίζονται κυρίως σε παρατηρήσεις και αναλύουν στατιστικά κάποια δεδομένα εισόδου για να προβλέψουν την έξοδο (π.χ βροχοπτώση – ποσό εδαφικής διάβρωσης). Η έξοδος συνδέεται με την είσοδο μέσω μιας εμπειρικής σχέσης που έχει προκύψει από την ανάλυση πολλών δεδομένων σε κάποια ευρεία περιοχή. Ίσως το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο, το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια είναι το “RUSLE” – “Revised Universal Soil Loss Equation” (Renarn et al., 1991).

B. Προσδιοριστικά (ντετερμινιστικά) μοντέλα, που μπορεί να είναι:

- **Μοντέλα φυσικής βάσης (Physically based).** Τα μοντέλα αυτά προσπαθούν να απεικονίσουν τους μηχανισμούς που προκαλούν τη διάβρωση ερμηνεύοντας τις πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των διάφορων μεταβλητών που καθορίζουν το αποτέλεσμα αλλά και των αλλαγών τους στο χώρο και το χρόνο. Σε αυτά τα μοντέλα διατυπώνονται πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις μέσω των οποίων αλληλοσυνδέονται οι μεταβλητές αυτές και περιγράφεται το καθεστώς απορροής και στερεομεταφοράς σε μια λεκάνη με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα εμπειρικά. Συνήθως χρησιμοποιούνται πολλές μεταβλητές ώστε να βελτιώνεται η προσαρμογή τους σε αυτά και να αυξάνεται ο βαθμός ελευθερίας (degree of freedom), αλλά κάτι τέτοιο δεν οδηγεί πάντα σε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλα μοντέλα με λιγότερες παραμέτρους (Perrin et al., 2001). Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου της διάβρωσης όμως πρακτικά δεν υπάρχει κανένα μοντέλο το οποίο να είναι εξ' ολοκλήρου φυσικής βάσης και συνήθως γίνονται παραδοχές ή συνδυάζονται με εμπειρικές/ εννοιολογικές προσεγγίσεις (Pandey et al., 2015). Κάποια παραδείγματα τέτοιων υβριδικών μοντέλων είναι το EUROSEM (Morgan et al., 1998), το PESERA (Kirkby et al., 2004) και το RHEM (Nearing et al., 2011), αλλά υπάρχουν δεκάδες ακόμα μοντέλα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά από τους Pandey et al. (2015).

- **Εννοιολογικά ή παραμετρικά μοντέλα.** Τα εννοιολογικά μοντέλα είναι μια ενδιάμεση κατηγορία ανάμεσα στα εμπειρικά και τα μοντέλα φυσικής βάσης (Beck, 1987). Βασίζονται στα διαθέσιμα δεδομένα για να περιγράψουν τη διάβρωση, σε αντίθεση με τα δεδομένα φυσικής βάσης όπου τα δεδομένα προκύπτουν μετά από τη μελέτη του φαινομένου. Έτσι οι παράμετροι δεν είναι άμεσα μετρήσιμες και απαιτείται βαθμονόμηση του μοντέλου για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του (Singh, 1983), κάτι όμως το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ένα προκατειλημένο μοντέλο (biased; Doherty & Welter, 2010) το οποίο να μην έχει καλές δυνατότητες γενίκευσης, δηλαδή να μη δίνει ορθές εκτιμήσεις σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά (White et al., 2014). Όσον αφορά την εκτίμηση της διάβρωσης (αλλά και της απορροής) τα εννοιολογικά μοντέλα συνήθως συνδυάζονται με φυσικής βάσης για το σχηματισμό υβριδικών μοντέλων ενώ υπάρχουν και κάποια που είναι αποκλειστικά εννοιολογικά μοντέλα (π.χ. LASCAM; Viney & Sivapalan, 1999).

Όπως προαναφέρθηκε ένα σημαντικό χαρακτηριστικό κατά την μοντελοποίηση της διάβρωσης είναι η χωρική κατανομή των παραμέτρων και το πως αυτές επηρεάζουν ένα μοντέλο. Τα μοντέλα διάβρωσης μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την δομή τους (χωρική κατανομή των δεδομένων):

- **Χωρικά κατανεμημένα μοντέλα** (Zhang et al., 1996 ; Jetten et al.,2003; de Vente et al., 2005) τα οποία διαχωρίζουν μια περιοχή σε τμήματα (κυψελλίδες) και εξετάζουν κάθε τμήμα της περιοχής ξεχωριστά για να εκτιμήσουν τη διάβρωση. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθούν, δηλαδή τις διαδικασίες υλοποίησής τους σε Γ.Σ.Π. (Meritt et. al.,2003; Karydas et al., 2014):

A. Χωρικά αυτοτελή (Spatial coexistent) μοντέλα στα οποία το μοντέλο συνεκτιμά μόνο τις παραμέτρους κάθε τμήματος για την παραγωγή μιας εξόδου

B. Χωρικά συνεχή (Pathway) μοντέλα στα οποία κάθε τμήμα επηρεάζεται από τα γειτονικά του τμήματα και πιο συγκεκριμένα αυτά που βρίσκονται στα ανάντι.

- **Ενιαία μοντέλα** (lumped) τα οποία είναι απλούστερα (Aksoy&Kanvas, 2005; Karydas et al., 2014) και βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής των μεταβλητών εισόδου σε μια λεκάνη απορροής και για κάθε χρονική περίοδο δίνοντας μία τιμή εξόδου για όλη τη περιοχή μελέτης (ολόκληρη τη λεκάνη).

Τα μοντέλα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα καθώς μας επιτρέπουν την αναγνώριση των περιοχών οι οποίες κινδυνεύουν περισσότερο από κάποιες άλλες αλλά εξαιτίας της πολυπλοκότητας τους, μέχρι και σήμερα, κανένα μοντέλο δε δείχνει με ακρίβεια την πραγματικότητα, απλά παρουσιάζει μια εκτίμηση της διάβρωσης και θα πρέπει αυτό να λαμβάνεται υπόψιν όταν σχολιάζουμε τα αποτελέσματα μας (Jetten & Favis-Mortlock, 1999; Boardman, 2006). Για να βελτιωθεί η ακρίβεια των μοντέλων διάβρωσης θα πρέπει τα υπάρχοντα αλλά και τα καινούρια μοντέλα να ελεγχθούν με συστηματικό τρόπο (μετρήσεις υπαίθρου), διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη που δε μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα και για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ χρησιμοποιούνται και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης όπως θα αναλυθεί στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Πίνακας 2-2: Παραδείγματα γνωστών μοντέλων τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν και τα χαρακτηριστικά τους (τροποποιημένος από Li et al., 2017).

Μοντέλο	Τύπος	Χωρική κλίμακα	Χρονική κλίμακα	Δομή
RUSLE (Renard et al., 1991)	Εμπειρικό	Κλιτύς	Ετήσιο	Ενιαίο
MUSLE (Williams, 1975)	Εμπειρικό	Μικρή λεκάνη	Στιγμιαίο	Ενιαίο
Zheng et al., 2008	Εμπειρικό	Μικρή λεκάνη	Στιγμιαίο	Ενιαίο
Si et al., 2015	Προσδιοριστικό	Μικρή λεκάνη	Στιγμιαίο	Ενιαίο
Yang et al., 2012	Προσδιοριστικό	Λεκάνη	Στιγμιαίο	Κατανεμημένο
WEPP (Lafren et al., 1991)	Προσδιοριστικό	Κλιτύς / Μικρή λεκάνη	Στιγμιαίο/ Συνεχές	Κατανεμημένο
SWAT (Arnold et al., 1998)	Προσδιοριστικό	Λεκάνη	Στιγμιαίο/ Συνεχές	Κατανεμημένο
MMF (Morgan et al., 1984)	Προσδιοριστικό	Περιφερειακό επίπεδο/ Κλιτύς	Στιγμιαίο/ Συνεχές	Κατανεμημένο
WATEM/SEDEM (Van Rompaey et al., 2001)	Προσδιοριστικό	Λεκάνη	Ετήσιο	Κατανεμημένο

2.3 Πλημμυρικός κίνδυνος

Η **ποτάμια πλημμύρα** είναι μια φυσική διεργασία οι οποίοι αποτελεί σημαντικό τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Δημιουργείται όταν η φυσική κοίτη ενός ποταμού, που αποστραγγίζει μια υδρογραφική λεκάνη, δεν έχει τη μεταφορική ικανότητα για να μεταφέρει τον όγκο νερού που διέρχεται από αυτή με αποτέλεσμα να υπερχειλίζει, και περιοχές της χέρσου να καταλαμβάνονται από νερό. Η κοίτη αυτή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με το χρόνο, μεταβολή η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες απορροής, τη συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων και τη γεωλογία της περιοχής. Έχει παρατηρηθεί ότι το μέγεθος μιας κοίτης αλλά και η μορφολογία εντός αυτής εξαρτώνται κυρίως από την “επικρατούσα απορροή” η οποία είναι ίση με την πλημμυρική απορροή η οποία παρατηρείται κάθε ένα έως δύο χρόνια (Knight & Shamseldin, 2006). Έτσι μια φυσικά διαμορφωμένη κοίτη προσαρμόζεται και μπορεί να ανταποκριθεί σε μικρές πλημμυρικές παροχές που συμβαίνουν συχνά, αλλά όχι σε ακραίες πλημμυρικές παροχές, ενώ ανθρώπινες παρεμβάσεις επί της κοίτης μειώνουν τη μεταφορική της ικανότητα και ενισχύουν το φαινόμενο των πλημμυρών.

Οι ποτάμιες πλημμύρες από φυσικά αίτια μπορούν είτε να παρουσιάζουν βραδεία εξέλιξη (σε μεγάλους ποταμούς), είτε να εμφανίζονται ταχύτατα (ξαφνικές πλημμύρες). Στην περιοχή της Μεσογείου οι ξαφνικές πλημμύρες κυριαρχούν, καθώς εξαιτίας της μορφολογίας υπάρχουν πολλές μικρές ορεινές λεκάνες στις οποίες η απορροή εμφανίζεται μόνο κατά τη διάρκεια γεγονότων βροχόπτωσης (Beven 2002, Borga et al. 2014).

Οι πλημμύρες είναι μια από τις σημαντικότερες **φυσικές καταστροφές** που εμφανίζονται παγκοσμίως με τον Ελληνικό χώρο να μην αποτελεί εξαίρεση (Σχήμα 2.5), καθώς η εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων είναι ιδιαίτερα συχνή (Diakakis, 2012), κάτι που συμβαίνει και σε ολόκληρη τη Νότια Ευρώπη (Gaum et al., 2009). Καθώς εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής αναμένεται το φαινόμενο να επιδεινωθεί (Westra et al. 2014) η μελέτη των πλημμυρών και των υδρολογικών διεργασιών που τις προκαλούν είναι επιβεβλημένη, αν και ιδιαίτερα πολύπλοκη.



Σχήμα 2-5: Πλημμυρικό φαινόμενο στην ευρύτερη περιοχή της Χαλκίδας, (Μάιος, 2019 – Αρχείο συγγραφέα)

2.3.1 Υδρολογική λεκάνη

Κατά τη μελέτη των υδρολογικών συνθηκών σε μια περιοχή μελέτης, χρησιμοποιείται ευρέως ως βασική ενότητα η **υδρολογική λεκάνη** (watershed, drainage basin, river basin, catchment) ενός ποταμού, η οποία οριοθετείται από τις υψηλότερες κορυφές της περιοχής μελέτης, οι οποίες σχηματίζουν το όριο της υδρολογικής λεκάνης στην επιφάνεια του εδάφους δηλαδή τον υδροκρίτη (drainage divide). Όλη η βροχόπτωση που πέφτει εντός μιας υδρολογικής λεκάνης ρέει προς ένα σημείο του υδρογραφικού δικτύου (συνήθως την εκβολή ενός ποταμού στη θάλασσα), σχηματίζοντας έτσι ένα κλειστό σύστημα. Κάτι τέτοιο στην πραγματικότητα μπορεί να μην ισχύει καθώς κατά τον ορισμό της υδρολογικής λεκάνης γίνεται η παραδοχή ότι όλο το νερό που πέφτει σε μια λεκάνη ρέει προς τα κατάντι μιας κλιτύς. Εξαιτίας όμως της πολύπλοκης γεωλογίας είναι δυνατόν το υπόγειο νερό να καταλήγει σε κάποια άλλη υδρογραφική λεκάνη (Dingman, 1994; Daive, 2008). Μια υδρογραφική λεκάνη αποτελείται από υπολεκάνες οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν, επιλέγοντας ένα σημείο στο οποίο μας ενδιαφέρει να βρούμε την περιοχή την οποία αποστραγγίζει (drainage area) και υπολογίζοντας την περιοχή που συνεισφέρει στη διαμόρφωση της ροής αυτής.

2.3.2 Υδρολογικό ισοζύγιο

Σε μια κλειστή υδρογραφική λεκάνη, υπάρχει αποθηκευμένο νερό σε διαφορετικές μορφές (π.χ. προηγούμενη υγρασία εδάφους, υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας) το οποίο ελαττώνεται με το πέρασμα του χρόνου, και ανανεώνεται με την εμφάνιση της βροχής καθώς ένα μέρος της αποθηκεύεται. Ένα ακόμα τμήμα της εξατμίζεται και η βροχόπτωση που απομένει δημιουργεί την ολική απορροή, διαμορφώνοντας έτσι το **υδατικό ισοζύγιο** της υδρογραφικής λεκάνης (Σχήμα 2-6) το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση :

$$\Delta S = P - ET - T_{discharge}$$

Όπου P το ύψος της βροχόπτωσης, ET η εξατμισοδιαπνοή, $T_{discharge}$ είναι η ολική απορροή (επιφανειακή, υποδερμική, υπόγεια) και ΔS είναι η διαφορά που παρατηρείται στο αποθηκευμένο νερό εντός της λεκάνης. Οι Farmer et al., 2003 επέκτειναν την παραπάνω σχέση, και τη συσχέτισαν με το χρόνο μέσω της σχέσης:

$$\frac{dS}{dt} = r - e - q$$

όπου r είναι ο ρυθμός της βροχόπτωσης, e ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής και q ο ρυθμός της απορροής, ενώ $\frac{dS}{dt}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής του αποθηκευμένου νερού.

2.3.3 Επιφανειακή απορροή

Επιφανειακή απορροή είναι η ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας κατά μήκος φυσικών υδατορρεμάτων (Ward & Robinson, 1989) τα οποία αποστραγγίζουν μια υδρολογική λεκάνη. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον αλλά και τον άνθρωπο. Σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι η **παροχή** (discharge) δηλαδή η ποσότητα της επιφανειακής απορροής (σε m^3/s), η οποία εξαρτάται από ολόκληρη την υδρογραφική λεκάνη, και τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτή. Η επιφανειακή ροή μπορεί να είναι μόνιμη (perennial), διακοπτόμενη (intermittent) και εφήμερη (ephemeral). Στη διακοπτόμενη ροή έχουμε απορροή κατά τη διάρκεια ολόκληρης της υγρής περιόδου ενώ στην εφήμερη ροή έχουμε χειμαρρικές παροχές μόνο κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας (Mosley & McKerchar, 1993). Ο τύπος της επιφανειακής ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κλίμα της περιοχής αλλά και την έκταση της υδρολογικής λεκάνης.

Κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης μόνο ένα τμήμα της βροχόπτωσης ρέει επιφανειακά μέσω του **υδρογραφικού δικτύου**. Ένα άλλο τμήμα της βροχόπτωσης κατεισδύει και ρέει κάτω από την επιφάνεια με διάφορους τρόπους αλλά ένα μέρος αυτών εμφανίζονται και

πάλι ως **επιφανειακή απορροή** κατά τη διάρκεια ή ακόμα και μετά τη λήξη της βροχόπτωσης. Πιο συγκεκριμένα η επιφανειακή απορροή διαμορφώνεται από το συνδυασμό των παρακάτω ροών (Viessman et al., 1989; Dingman, 1994; Rumynin, 2015):

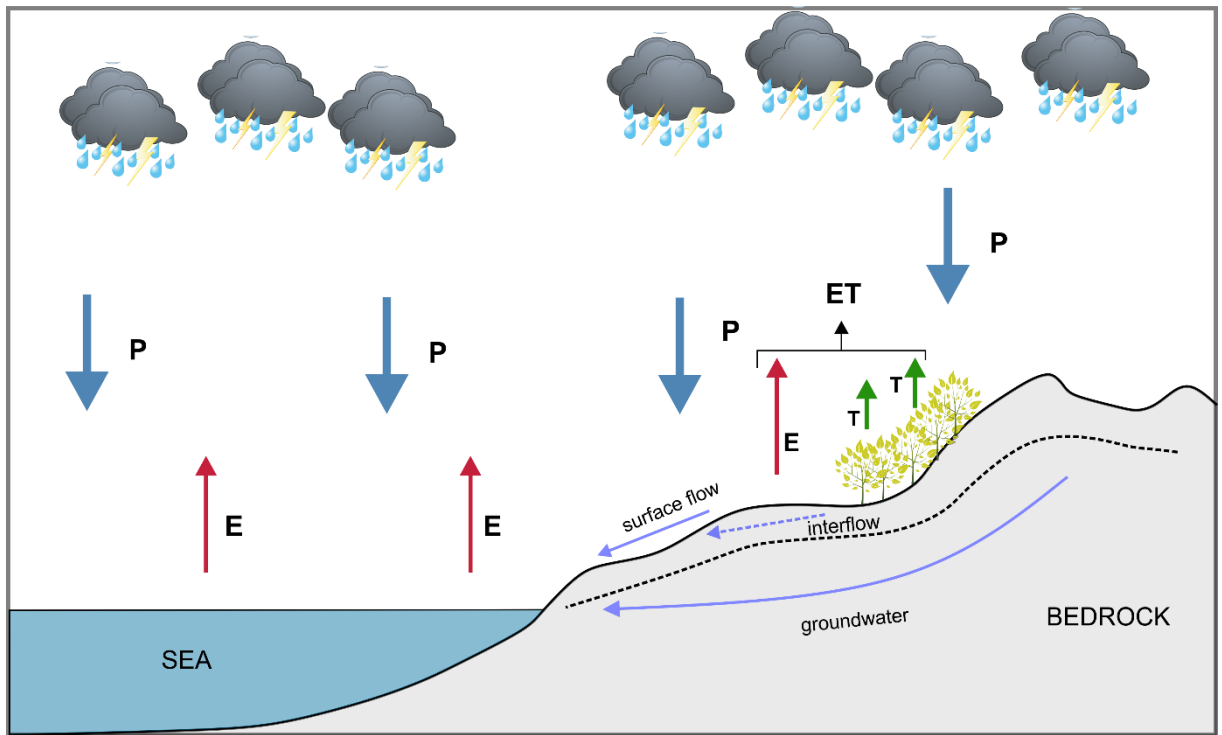
- **Ροή επιφανείας (surface flow)**

- **Κατακρημνίσματα** που πέφτουν απευθείας στο κανάλι απορροής και μετατρέπονται άμεσα σε επιφανειακή απορροή (**direct flow**). Είναι αμελητέα ποσότητα εξαιτίας της μικρής έκτασης των καναλιών σε σχέση με την έκταση της υδρογραφικής λεκάνης (εκτός από περιπτώσεις λιμνών).

- **Επίγεια ροή (overland flow)**. Ο Horton (1930) πρώτος αναγνώρισε τις συνθήκες σχηματισμού της επίγεια ροής, θεωρώντας ότι αυτή αρχίζει όταν τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους κορεστούν (overland flow saturated from above). Σε περιοχές με μεγάλη φυτοκάλυψη όμως κάτι τέτοιο δε συμβαίνει συχνά, καθώς το έδαφος έχει μεγάλη περατότητα, και έτσι συχνότερα θεωρούμε ότι το νερό κατεισδύει και έπειτα κινείται υπογείως και εκδηλώνεται επιφανειακή ροή όταν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας είναι σχεδόν στην επιφάνεια οπότε η κατεισδυση είναι σχεδόν μηδενική και δημιουργείτε η επίγεια ροή λόγω κορεσμού (Hewlett, 1961; Hewlett&Hibbert, 1967).

- **Υποδερμική ροή (interflow)**. Έχει παρατηρηθεί ότι οι εδαφικές στρώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα σε διεύθυνση παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους από ότι με την κάθετη διεύθυνση. Έτσι το νερό κινείται πλευρικά σε διάφορα επίπεδα (στρώσεις εδάφους, επαφή με το μητρικό πέτρωμα) και σε κάποιο σημείο η κορεσμένη ζώνη φτάνει στην επιφάνεια προκαλώντας επιφανειακή απορροή.

- **Υπόγεια ροή (groundwater flow)**. Το νερό που κατεισδύει στα βαθύτερα στρώματα σχηματίζει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Εξαιτίας της πιεζομετρίας το νερό αυτό κινείται και μπορεί να βγαίνει στην επιφάνεια μέσα από πηγές ή σε σημεία που συναντά ένα κανάλι απορροής. Αυτή η ροή είναι μόνιμη (βασική ροή) και δρα συμπληρωματικά με τις προηγούμενες.



Σχήμα 2-6: Ο υδρολογικός κύκλος και οι διάφοροι τύποι ροής που επηρεάζουν την επιφανειακή ροή. P: Βροχόπτωση, E: Εξάτμιση, T: Διαπνοή, ET: Εξατμισοδιαπνοή. (τροποποιημένο από Davie, 2008).

2.3.4 Παράγοντες που προκαλούν και επηρεάζουν τις πλημμύρες

Μια σειρά από παράγοντες επηρεάζουν τις πλημμύρες μέσω της μεταβολής των υδρολογικών διεργασιών. Ο βασικότερος φυσικός παράγοντας που προκαλεί μια πλημμύρα είναι η έντονη βροχόπτωση βραχείας ή/και εκτεταμένης χρονικής περιόδου ενώ πλημμύρες μπορούν να προκληθούν από το λιώσιμο των πάγων αλλά και ανθρωπογενείς δραστηριότητες, για παράδειγμα μέσω της αστοχίας φραγμάτων αποθήκευσης νερού.

Επιπλέον η **γεωμορφολογία** (τοπογραφία και μορφομετρικά χαρακτηριστικά), η **γεωλογία**, η **βλάστηση** και οι **προηγούμενες συνθήκες υγρασίας** καθορίζουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλημμυρικό φαινόμενο και σε συνδυασμό με την **ένταση της βροχόπτωσης** η οποία παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα στα εύκρατα κλίματα (Georgakakos 2006, Norbiato et al. 2008, Golian et al. 2010) καθορίζουν την εμφάνιση ή όχι πλημμυρικών φαινομένων, αλλά και την χρονική στιγμή κατά την οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της παροχής σε κάποιο σημείο του υδρογραφικού δικτύου (Yair & Raz-Yassif, 2004, Xue & Gavin 2008, Dunkerley 2012, Camarasa-Belmonte & Soriano 2014).

Από τις προηγούμενες παραμέτρους η **μορφολογία της περιοχής** παίζει ίσως τον σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση των υδρολογικών συνθηκών και καθορίζει τα σημεία

εκδήλωσης των πλημμυρικών φαινομένων. Μέσω της **μορφομετρικής ανάλυσης** μιας περιοχής μπορούμε να αναγνωρίσουμε αυτές της συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που επηρεάζουν την εκδήλωση των πλημμυρών επιτρέποντας μας να κατηγοριοποιήσουμε της λεκάνες ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποδειχτεί πολύτιμο ειδικά σε μικρές λεκάνες με διαλλείπουσα ροή όπου η μελέτη των ξαφνικών πλημμυρών που εμφανίζονται είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Σε μικρές ορεινές λεκάνες (<150km²) κατά το παρελθόν (Batton & Baker, 1976; Costa, 1987) έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μορφομετρικοί παράμετροι όπως η υδρογραφική πυκνότητα (drainage density), η τάξη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου αλλά και ο λόγος αναγλύφου (relief ratio) για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου δίνοντας καλά αποτελέσματα.

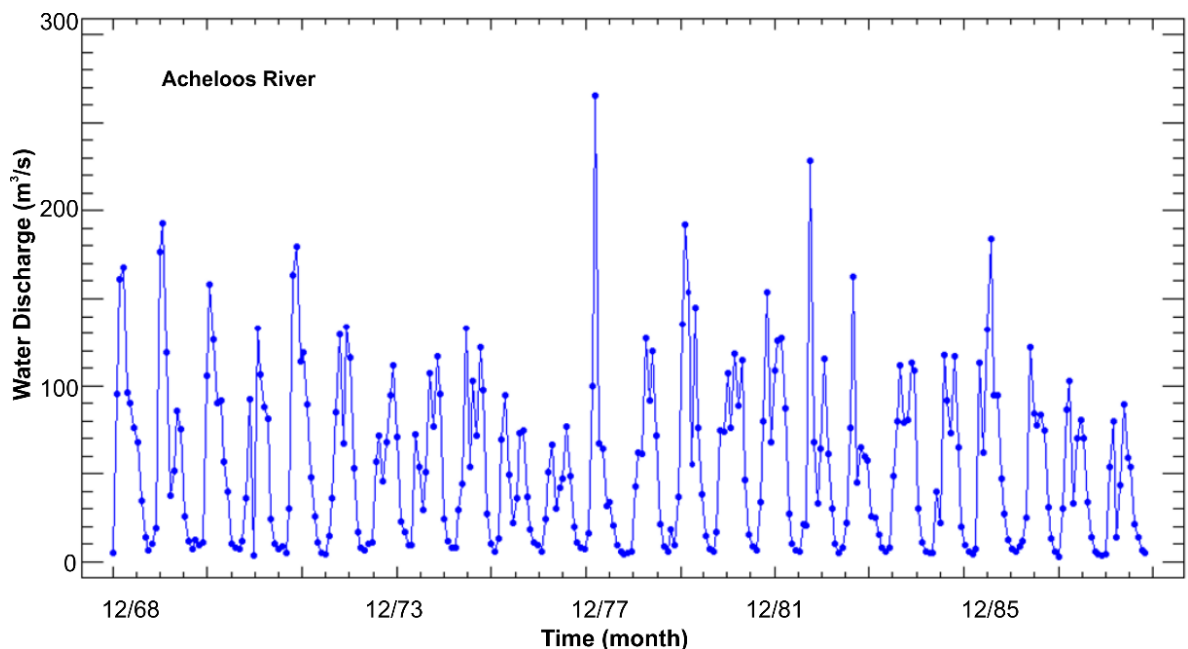
Οι **μικρές υδρογραφικές λεκάνες** είναι χαρακτηριστικές στις Μεσογειακές περιοχές. Σε αυτές συνήθως δε παρατηρείται μόνιμη ροή, και οι ξαφνικές πλημμύρες αποτελούν ένα ιδιαίτερο πρόβλημα για αυτές. Η απόκριση μιας μικρής υδρογραφικής λεκάνης στη βροχόπτωση διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της και εξαρτάται από:

- **Τοπογραφικά χαρακτηριστικά**, και κυρίως τη μέση κλίση της λεκάνης απορροής και την κλίση της κοίτης του κύριου κλάδου που αποστραγγίζει τη λεκάνη.
- **Βλάστηση και οι χρήσεις γης**, καθώς η βλάστηση και το μοτίβο των χρήσεων γης επηρεάζουν το μηχανισμό κατείσδυσης του νερού, επηρεάζοντας την απορροή.
- **Το σχήμα αλλά και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά** της λεκάνης απορροής τα οποία επηρεάζουν το χρόνο συγκέντρωσης (concentration time) και τον χρόνο υστέρησης (lag time) και πρέπει να συνεκτιμώνται για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης σε μια περιοχή (Patton & Baker 1976, Costa 1987)
- **Χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης** και κυρίως η ένταση και η διάρκεια.

2.3.5 Υδρογράφημα

Για την καλύτερη μελέτη πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως ο πλημμυρικός κίνδυνος και η βέλτιστη διαχείριση του απαιτείται η γνώση του όγκου της επιφανειακής απορροής (δηλαδή της παροχής) αλλά και της χρονικής της κατανομής. Το **υδρογράφημα** μας δίνει αυτή τη δυνατότητα καθώς παρουσιάζει την παροχή σε σχέση με το χρόνο για κάποιο σημείο του υδρογραφικού δικτύου. Αν και θεωρείτε ως συνεχές στην πραγματικότητα είναι διακριτό, καθώς απεικονίζει είτε τη μέση παροχή για κάποιο χρονικό

διάστημα (Σχήμα 2-7) είτε τη διακύμανση των μετρήσεων που πραγματοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (πχ. 30 λεπτά). Ο άξονας των y του γραφήματος απεικονίζει την παροχή σε m^3/s , ενώ πολλές φορές χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα για την απεικόνιση της, καθώς μας επιτρέπει να οπτικοποιήσουμε ταυτόχρονα και τις πλημμυρικές παροχές αλλά και τις μικρές παροχές που επικρατούν κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τα χαρακτηριστικά του υδρογράφηματος (σχήμα και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του) προκύπτουν ως συνάρτηση των υδρομετεωρολογικών αλλά και των άλλων χαρακτηριστικών μιας υδρολογικής λεκάνης (Viessman et al., 1989;Davie & Quinn, 2019).



Σχήμα 2-7: Παράδειγμα υδρογραφήματος για μηνιαίες τιμές παροχής του ποταμού Αχελώου (αρχείο συγγραφέα, από Gournelos et al., 2015).

Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα των μέσων στιγμιαίων παροχών ανάμεσα στις υγρές περιόδους, υπάρχει μια περίοδος για την οποία έχουμε μια μικρή αλλά σταθερή ροή (baseflow) η αλλιώς καθυστερημένη ροή (delayed flow) η οποία τροφοδοτείται κυρίως μέσω της υπόγειας ροής. Κατά τη διάρκεια του χρόνου η βασική ροή μειώνεται καθώς μειώνεται το αποθηκευμένο νερό εντός της λεκάνης, αλλά μέσω της βροχόπτωσης, όταν αυτή εμφανίζεται, γίνεται αναπλήρωση τους διατηρώντας έτσι τη βασική ροή σχεδόν σταθερή. Εκτός από τη βασική ροή (baseflow) έχουμε και την ταχεία ή πλημμυρική (quickflow) ή άμεση (direct) απορροή η οποία σχετίζεται άμεσα με τη βροχόπτωση και πιο συγκεκριμένα την ενεργή ή πλεονάζουσα βροχόπτωση (excess rainfall) η οποία ορίζεται

ως η ποσότητα της βροχόπτωσης που δεν κατεισδύει και δεν εξατμίζεται αλλά ρέει επιφανειακά (Davie & Quinn, 2019).

Η εμφάνιση της **άμεσης απορροής** στην εκβολή του ποταμού γίνεται σταδιακά. Έτσι αρχικά έχουμε γρήγορη αύξηση της παροχής στο υδρογράφημα, η οποία συνεχίζεται με το χρόνο καθώς όλο και μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης συνεισφέρει σε αυτή. Η ένταση της βροχόπτωσης καθορίζει το μέγιστο της απορροής, ενώ η διάρκεια της βροχόπτωσης καθορίζει το σχήμα του υδρογραφήματος. Εάν η διάρκεια της βροχόπτωσης είναι πολύ μεγάλη τότε θεωρητικά το αποθηκευμένο νερό φτάνει σε ένα μέγιστο, οπότε η επιφανειακή απορροή και η συνολική βροχόπτωση εξισώνονται και με αυτό τον τρόπο η παροχή σταθεροποιείται και φτάνει σε ένα μέγιστο (Viessman et al., 1989), κάτι που δε συμβαίνει όμως στη φύση.

Σε ένα υδρογράφημα διακρίνουμε τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν (αλλά και καθορίζονται) την απόκριση μιας λεκάνης (Botter et al, 2011):

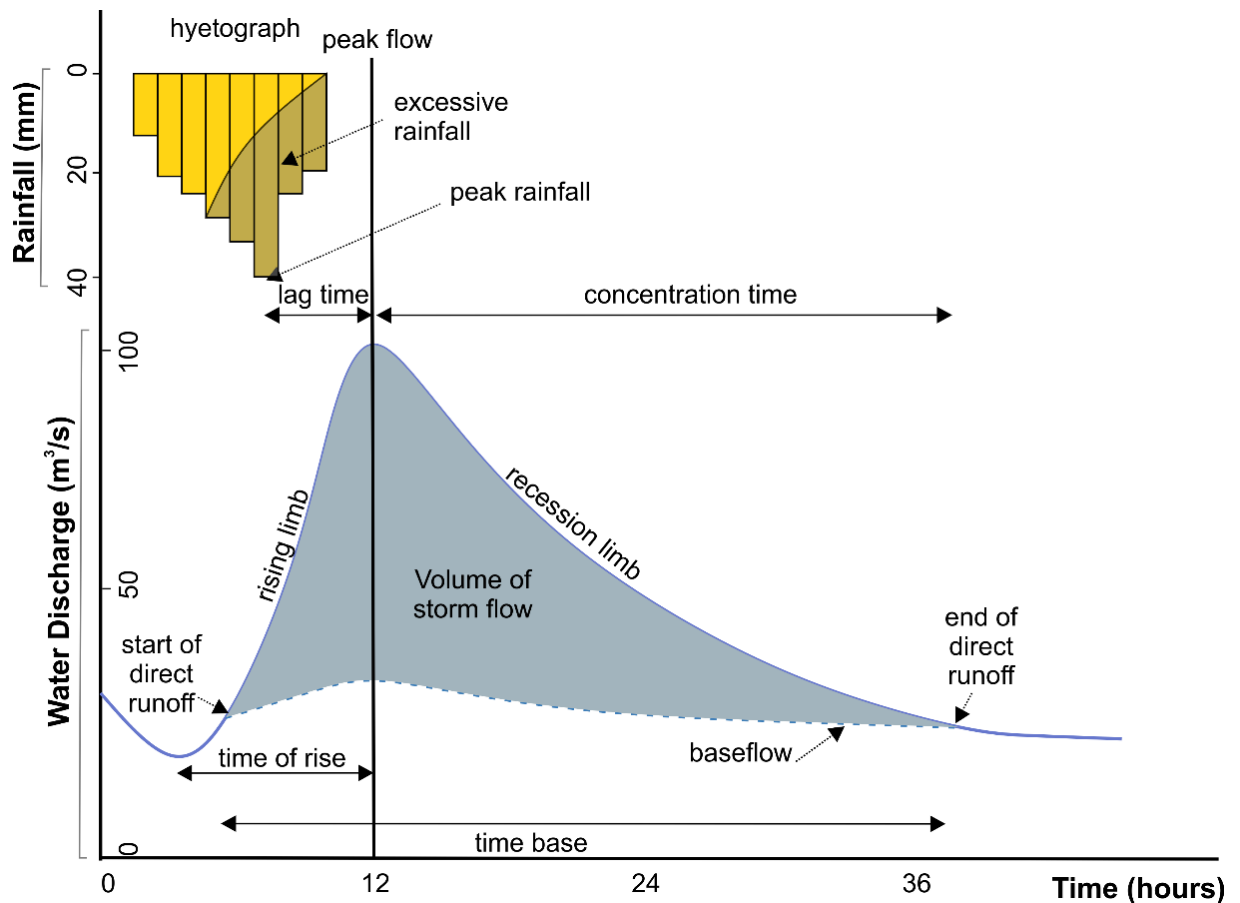
- **Βασική ροή (base flow).** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οφείλεται στην υπόγεια ροή του νερού η οποία διατηρείται ακόμα και μετά την εκδήλωση της βροχής. Για μεγάλες υδρολογικές λεκάνες αυτή η ροή μπορεί να είναι μόνιμη, ενώ σε μικρές Μεσογειακές λεκάνες συνήθως δε παρατηρείται βασική κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου. Μετά από μια βροχόπτωση ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να τροφοδοτεί την επιφανειακή απορροή για αρκετές ημέρες σε μικρές λεκάνες, ενώ για μεγάλες λεκάνες ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι μήνες ή και έτη (Viessman et al., 1989).
- **Μέγιστη ροή (peak flow).** Με την εμφάνιση της βροχόπτωσης, αρχίζει να αναπληρώνεται το αποθηκευμένο νερό εντός της λεκάνης. Έπειτα η επιφανειακή απορροή αρχίζει να αυξάνει ραγδαία για κάποιο χρόνο ανόδου (time of rise) οπότε και φθάνει σε μια μέγιστη τιμή - κορυφή (crest).
- **Ανερχόμενο - κατερχόμενο σκέλος υδρογραφήματος (rising and falling limb).** Το τμήμα του υδρογραφήματος πριν από την κορυφή ονομάζεται ανερχόμενο σκέλος και είναι σχετικά απότομο (καθώς επηρεάζεται κυρίως από την άμεση απορροή), ενώ το τμήμα μετά την κορυφή ονομάζεται κατερχόμενο και είναι πιο ομαλό, καθώς ακόμα και μετά το τέλος της βροχόπτωσης, επιφανειακή απορροή από απομακρυσμένες περιοχές της λεκάνης συνεχίζει να καταφθάνει και ενισχύεται από άλλους τύπους ροών που δρουν με μικρότερη ταχύτητα όπως η υποδερμική και η υπόγεια (Davie & Quinn, 2019).

- **Χρόνος υστέρησης (lag time; T_L).** Το μέγιστο της έντασης της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής δε συμπίπτουν χρονικά, εξαιτίας των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής (τα οποία όπως προαναφέραμε καθορίζουν το σχήμα του υδρογραφήματος). Η χρονική αυτή διαφορά ονομάζεται χρόνος υστέρησης.
- **Χρόνος συγκέντρωσης (time of concetration).** Είναι ο χρόνος που χρειάζεται ακόμα και το πιο απομακρυσμένο τμήμα της λεκάνης να συνεισφέρει στην παροχή που παρατηρείται στην εκβολή. Η άμεση ροή σταματάει μετά από χρόνο ίσο με το χρόνο συρροής (T_c) από τη λήξη της ενεργούς βροχόπτωσης (δηλαδή όταν το νερό και από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης έχει φτάσει στην εκβολή).
- **Χρόνος βάσης (time base; T_b).** Η διάρκεια της άμεσης απορροής ονομάζεται και χρόνος βάσης ή διάρκεια πλημμύρας. Είναι το άθροισμα δηλαδή του χρόνου υστέρησης και του χρόνου συγκέντρωσης.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι κανένα υδρογράφημα δε μπορεί να χαρακτηρίσει την ανταπόκριση της λεκάνης σε όλα τα δυνατά γεγονότα βροχόπτωσης και για αυτό το λόγο έχουν κάποιοι ερευνητές προτείνουν μη γραμμικά μοντέλα για την περιγραφή τους. Τα παρακάτω χαρακτηριστικά μιας λεκάνης μπορούν να προκαλέσουν μη γραμμική απόκριση (Diskin, 1973; Zondervan, 1978; Broome & Spigel, 1982; Jowitt, 1999; Ding, 2011):

- Γεγονότα με μεγαλύτερη τάξη ύψους βροχής προκαλούν πολύ ταχύτερη απόκριση της λεκάνης.
- Η προυπάρχουσα υγρασία και ο κορεσμός μιας υδρογραφικής λεκάνης εν γένει προκαλούν ταχύτερη απόκριση σε ένα γεγονός βροχόπτωσης.
- Το μέγιστο της παροχής (flood peak) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση της βροχόπτωσης.

Παρόλ'αυτα ένα υδρογράφημα παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς μας δίνει μια εικόνα για τον τρόπο που η βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης αλληλεπιδρούν και παράγουν την απορροή.



Σχήμα 2-8: Σχηματική απεικόνιση υετογραφήματος και του αντίστοιχου υδατογραφήματος (τροποποιημένο από Davie & Quinn, 2019).

2.3.5.1 Μοναδιαίο υδρογράφημα

Για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής η οποία είναι χρήσιμη για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου αλλά και το σχεδιασμό των έργων υποδομής ή/και συστημάτων εγκαίρης προειδοποίησης χρησιμοποιείται ευρέως το **μοναδιαίο υδρογράφημα** (Singh et al., 2014) το οποίο κλείνει σχεδόν έναν αιώνα ζωής. Ο Sherman, 1932 προσδιορίζει το μοναδιαίο υδρογράφημα ως το υδρογράφημα της επιφανειακής απορροής το οποίο προκύπτει από την ενεργή βροχόπτωση (δηλαδή αυτή που μετατρέπεται σε άμεση απορροή) για κάποιο σταθερό χρόνο (π.χ. μια ώρα ή μια ημέρα).

Το μοναδιαίο υδρογράφημα καθορίζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης αλλά και της βροχόπτωσης και λαμβάνοντας αυτό ως γνωστό μπορούμε να προβλέψουμε την απόκριση μιας υδρολογικής λεκάνης για διαφορετικά γεγονότα βροχόπτωσης. Πολλοί ερευνητές κατά το παρελθόν, με διάφορες προσεγγίσεις, προσπαθούν να προβλέψουν την παροχή σε υδρολογικές λεκάνες για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις χρησιμοποιώντας συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα (synthetic unit hydrograph-SUH) τα οποία

υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (π.χ. Gray, 1961; Gupta et al., 1980; Haan et al., 1994; Bhunya et al., 2009)

Για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος έχουν αναπτυχθεί δεκάδες μεθοδολογίες. Οι αρχικές μεθοδολογίες συνδυάζουν εμπειρικά τα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης για να κατασκευάσουν ένα **συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα** (π.χ. Snyder, 1938; Taylor & Schwarz, 1952; SCS, 1957). Την ίδια περίοδο αναπτύχθηκαν κάποια εννοιολογικά μοντέλα (π.χ. Clark, 1945; Nash, 1957) ενώ αργότερα δημιουργήθηκαν μοντέλα βασισμένα σε συναρτήσεις κατανομής πιθανοτήτων (π.χ. Snyder, 1955; Eagleson et al., 1966; Mays & Taur, 1982).

Τέλος μέσω του συνδυασμού της υδρολογίας με την ποσοτική γεωμορφολογία αναπτύχθηκαν τα λεγόμενα **γεωμορφολογικά μοναδιαία υδρογραφήματα** (geomorphological instantaneous unit hydrograph models – GIUH), τα οποία έχουν μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια (π.χ Nourani et al., 2009; Grimaldi et al., 2012). Μια πλήρης σύνοψη των πιο σημαντικών μοντέλων μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Singh et al., 2014.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η **μέθοδος SCS-CN**, η οποία βασίζεται στην κατασκευή ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος, και θα εφαρμοστεί στην περιοχή μελέτης.

2.4 Τεχνητή Νοημοσύνη

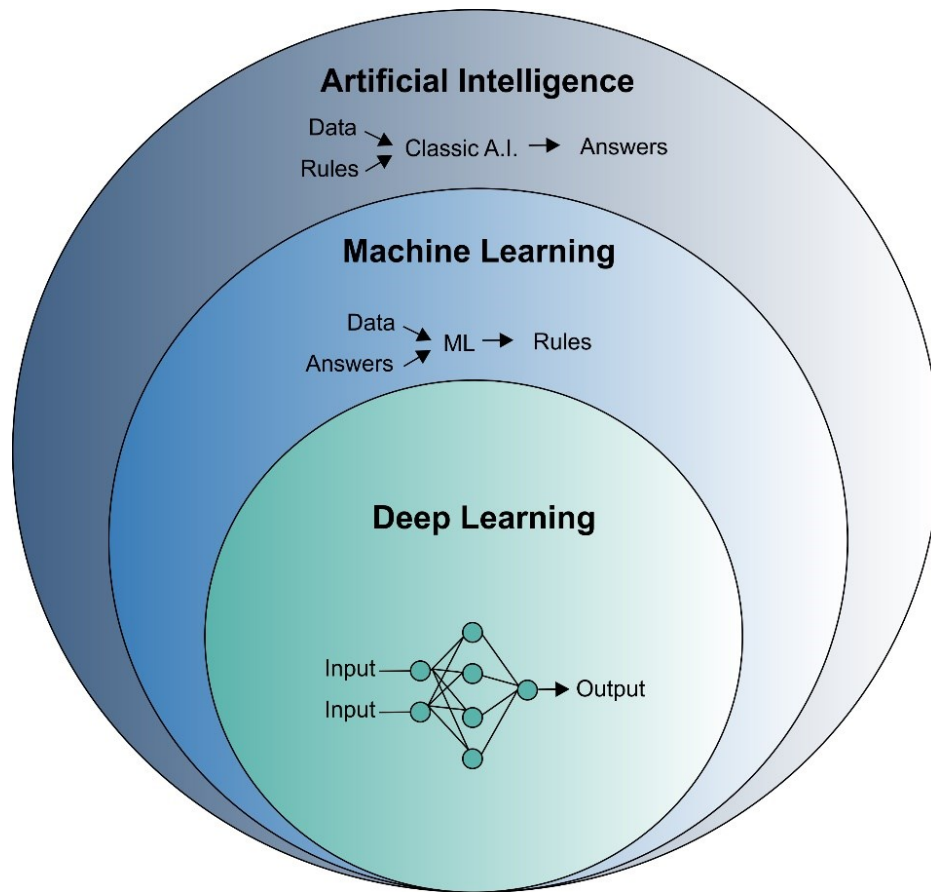
Ο άνθρωπος εδώ και χιλιάδες χρόνια εκφράζει την επιθυμία του για την κατασκευή σκεπτόμενων μηχανών. Στην Αρχαία Ελλάδα μυθικοί ήρωες όπως ο Πυγμαλίων και ο Ήφαιστος ήταν εφευρέτες οι οποίοι κατασκεύασαν τεχνητά όντα τα οποία ήταν προικισμένα με νοημοσύνη ή συνείδηση όπως η Γαλάτεια, ο Τάλως και η Πανδώρα. Με τη σύλληψη της ιδέας των μοντέρνων υπολογιστών και πολύ πριν κατασκευαστεί κάποιος, οι άνθρωποι αναρωτιόνταν αν ένας υπολογιστής θα μπορούσε να αποκτήσει ευφυΐα (Lovelace, 1842). Σήμερα η τεχνητή νοημοσύνη είναι ένα επιστημονικό πεδίο με τεράστιο πλήθος εφαρμογών και εφαρμογή σε πολλά πρακτικά προβλήματα (Goodfellow et al., 2016).

Η **Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)**, εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950 και προσπαθεί να προσομοιώσει την ανθρώπινη ευφυΐα στους υπολογιστές, κάνοντας τους ικανούς να λύνουν σύνθετα προβλήματα, τα οποία έχουν πολύ ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιστήμης και όχι μόνο (π.χ. αναγνώριση εικόνας, λήψη αποφάσεων). Η επιστήμη αυτή μελετά κάθε τεχνητό σύστημα το οποίο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και μπορεί να πάρει τέτοιες αποφάσεις ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα να ολοκληρώσει επιτυχώς κάποιον στόχο (Poole et al., 1998; Russell & Norvig, 2003).

Στα πρώτα στάδια και μέχρι το 1990 κυριαρχούσε η λεγόμενη συμβολική τεχνητή νοημοσύνη (symbolic AI) όπου οι συνιστώσες ενός προβλήματος περιγράφονται μέσω αναπαραστάσεων που είναι ευκολα κατανοητές από τους ανθρώπους, και μέσω ενός συνόλου κανόνων λαμβάνουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η **Μηχανική Μάθηση (machine learning)**, εμφανίστηκε λίγο αργότερα και αποτελεί ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, ενώ χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα προσαρμογής της στα δεδομένα αυτόματα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, μέσω της ανάλυσης περισσότερων δεδομένων. Έτσι ενώ στη συμβολική τεχνητή νοημοσύνη ο άνθρωπος καθόριζε τους κανόνες για την παραγωγή του αποτελέσματος, στη μηχανική μάθηση οι κανόνες αυτοί δημιουργούνται από τη μηχανή (μέσω της διαδικασίας της εκπαίδευσης - training. Αντίστοιχα, η **Βαθεία Μάθηση (deep learning)** αποτελεί υποσύνολο της μηχανικής μάθησης και χρησιμοποιεί πολλαπλά στρώματα επεξεργασίας των δεδομένων για να επιτύχει καλύτερη και πιο αποδοτική επίλυση του ζητούμενου προβλήματος. Στη τελευταία περίπτωση κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται τα **νευρωνικά δίκτυα** (Chollet, 2018).

Δύο από τα βασικά πεδία της Τεχνητής Νοημοσύνης, είναι τα **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (T.N.Δ.)** και η **Ασαφής Λογική** καθώς μπορούν να προσομοιώνουν την ικανότητα

του ανθρώπινου μυαλού, ενώ ο συνδυασμός αυτών εντάσσεται στα υβριδικά συστήματα (Kar 2014).



Σχήμα 2-9: Η τεχνητή νοημοσύνη και τα υποσύνολα της η μηχανική μάθηση και η βαθιά μάθηση (τροποποιημένο από Goodfellow et al., 2016; Cholet 2018).

2.4.1 Ασαφής Λογική και Ασαφή Συστήματα

Τα **ασαφή συστήματα (fuzzy systems)**, τα οποία αποτελούν υλοποίηση των **ασαφών συνόλων (fuzzy sets)** και της **ασαφούς λογικής**, είναι μία προσπάθεια αποτελεσματικής περιγραφής της ασάφειας του πραγματικού κόσμου. Αυτά τα συστήματα, εφαρμόζονται για την επίλυση προβλημάτων τα οποία είτε δε μπορούν να λυθούν με παραδοσιακούς τρόπους είτε η επίλυση τους είναι χρονοβόρα (με τις παρούσες δυνατότητες της τεχνολογίας) και στηρίζονται στην αρχή της “ασάφειας” ώστε να δώσουν μια απάντηση που μπορεί με κάποιον τρόπο να ερμηνευτεί. Συνδυάζουν τη θεωρία των ασαφών συνόλων με **μηχανισμούς εξαγωγής συμπερασμάτων, με τη χρήση κανόνων ασαφούς λογικής (fuzzy reasoning and inference)** και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς της επιστήμης.

Η θεωρία των ασαφών συνόλων αντιμετωπίζει τις αβεβαιότητες και ανακρίβειες που εμφανίζονται σε ένα εύρος προβλημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα εισαγωγής της εμπειρική γνώσης στο σύστημα. Σε αντίθεση με την κλασσική θεωρία συνόλων κατά την οποία τα στοιχεία είτε ανήκουν είτε δεν ανήκουν σε κάποιο σύνολο, τα ασαφή σύνολα αναπαριστούν τις αβεβαιότητες μέσω συναρτήσεων ασαφών αριθμών, οι οποίες παράγουν για κάθε σημείο του συνόλου ένα βαθμό συμμετοχής σε αυτό (Zadeh 1978, Zimmerman 1984). Πολλές εξελιγμένες μορφές της ασαφούς λογικής έχουν προταθεί, και μια από τις πιο σημαντικές για τις φυσικές επιστήμες είναι τα μεταβλητά ασαφή σύνολα (Chen & Guo 2006, Guo & Chen 2006, Wu et al. 2006), τα οποία χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στις γεωεπιστήμες για τη δημιουργία **έμπειρων συστημάτων εκτίμησης κινδύνου** μέσω ασαφών κανόνων λογικής, τον καθορισμό βαρών για κάθε μεταβλητή και τη παραγωγή σύνθετων εκτιμήσεων επικινδυνότητας (Binagli et al. 1998, Gournelos 2004, Wang et al. 2011, Zhang et al. 2011, Li 2013).

Τα **ασαφή συστήματα** πλεονεκτούν σε σχέση με άλλα συστήματα λόγω της απλότητας τους τόσο κατά την εφαρμογή τους όσο και κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, αλλά και για το γεγονός ότι δεν απαιτούν την ύπαρξη δεδομένων για την εκπαίδευσή τους. Όταν όμως το εξεταζόμενο πρόβλημα απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς δε μπορούν να εφαρμοστούν. Οι κύριες χρήσεις των ασαφών συνόλων αφορούν την υλοποίηση ασαφών ελεγκτών (fuzzy controllers) καθώς και τη μοντελοποίηση με τη χρήση κανόνων ασαφούς λογικής (Dubois & Prade, 1997).

2.4.1.1 Ασαφή σύνολα και ασαφείς αριθμοί

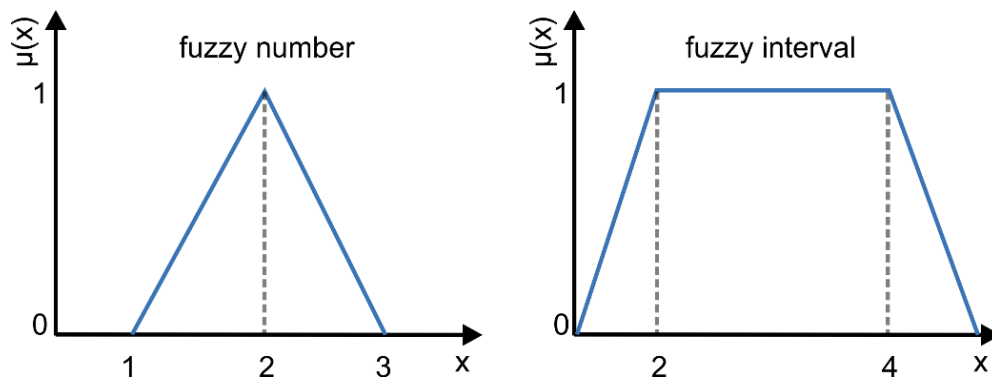
Η ιδέα ενός **ασαφούς συνόλου** το οποίο είναι η επέκταση ενός κλασσικού συνόλου, προτάθηκε το 1965 από τον Lotfi Zadeh, με κύριο σκοπό την τυποποίηση της έννοιας της βαθμιαίας συμμετοχής σε μια ομάδα και σε άμεση συσχέτιση με τις αντίστοιχες έννοιες όπως εμφανίζονται συχνά στην ανθρώπινη γνώση. Οι βασικές αρχές ενός ασαφούς συνόλου είναι όμοιες με αυτές ενός κανονικού συνόλου αλλά πλέον δεν υπάρχει μονοσήμαντη συμμετοχή ενός αντικείμενου σε ένα σύνολο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση συναρτήσεων συμμετοχής, οπότε ένα αντικείμενο πλέον χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό συμμετοχής σε ένα ασαφές σύνολο, ο οποίος λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο μία συνάρτηση συμμετοχής να απεικονίζεται με ένας διάστημα αριθμών, αλλά ένα διατεταγμένο σύνολο όπως το ασαφές πλέγμα (complete lattice ή fuzzy lattice) είναι αρκετό (Goguen, 1967), ενώ όσον αφορά το βαθμό συμμετοχής ανάλογα με την περίπτωση που μελετάμε μπορεί να ερμηνευτεί με 3 διαφορετικούς τρόπους:

βαθμός ομοιότητας (Bellman et al., 1966), βαθμός προτίμησης (Bellman & Zadeh, 1970) και βαθμός αβεβαιότητας (Zadeh, 1978).

Στη συνηθισμένη περίπτωση ένα ασαφές σύνολο (A) περιλαμβάνει ένα ζεύγος τιμών (X, μ) όπου το (X) είναι ένα σύνολο (πεδίο ορισμού της μεταβλητής) και $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ η **συνάρτηση συμμετοχής**. Για κάθε $x \in X$ ορίζεται ένας βαθμός συμμετοχής στο σύνολο (X, μ) , δηλαδή $x \rightarrow \mu_A(x)$ για τον οποίο ισχύει:

- Αν η τιμή x δε συμμετέχει στο σύνολο τότε $\mu_A(x) = 0$
- Αν η τιμή x συμμετέχει πλήρως στο σύνολο τότε $\mu_A(x) = 1$
- Αν η τιμή x συμμετέχει μερικώς στο σύνολο τότε $0 < \mu_A(x) < 1$

Έτσι δημιουργούνται **ασαφή διαστήματα**, όπου αν μόνο ένα σημείο συμμετέχει πλήρως στο σύνολο, τότε έχουμε έναν ασαφή αριθμό, ενώ εάν πολλά σημεία συμμετέχουν πλήρως στο σύνολο έχουμε ένα ασαφές διάστημα. Αυτά αντιπροσωπεύουν προσεγγιστικές ποσότητες για παράδειγμα ‘περίπου 2’ ή ‘από περίπου από 2 έως 4’ (Σχήμα 2-5) και έχουν μεγάλη χρησιμότητα σε πραγματικά προβλήματα.



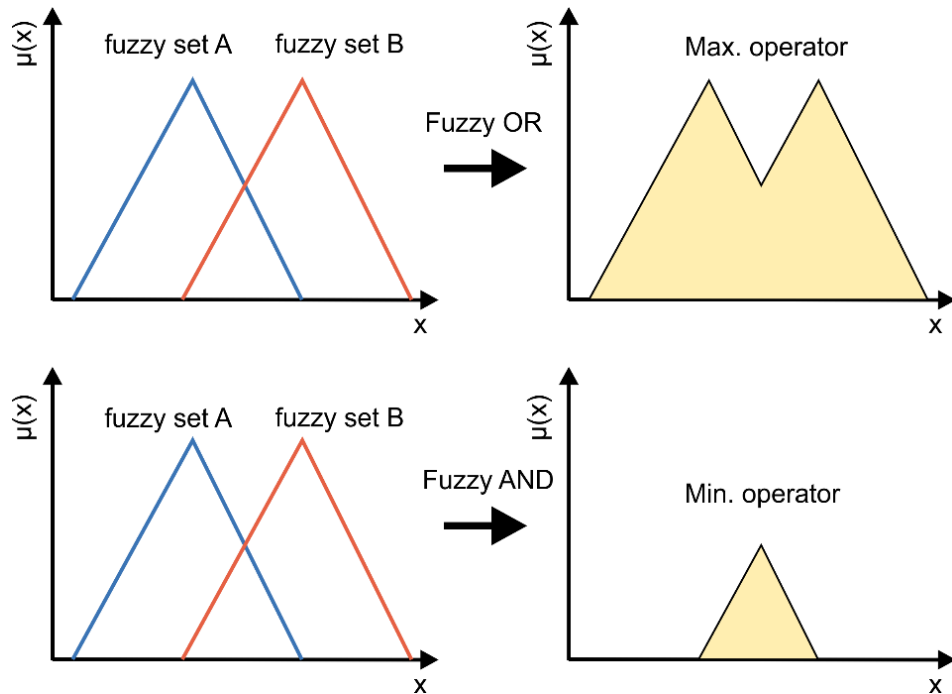
Σχήμα 2-10: Ασαφής αριθμός (περίπου 2) και ασαφές διάστημα (περίπου από 2 έως 4)

2.4.1.2 Πράξεις μεταξύ ασαφών συνόλων

Οι **πράξεις μεταξύ των ασαφών συνόλων** ορίζονται μέσω διμερών πράξεων που ορίζονται στο διάστημα $[0,1]$ και υλοποιούνται μέσω των συναρτήσεων ‘t-norm’ και ‘t-conorm’ (Menger, 1942; Schweizer & Sklar 1961). Ένα παράδειγμα t-norm είναι η συνάρτηση \min με αντίστοιχη t-conorm τη συνάρτηση \max . Πιο αναλυτικά οι πράξεις μεταξύ ασαφών συνόλων γίνονται συνήθως μέσω των τελεστών ένωσης (Union – fuzzy OR)

και τομής (Intersection – fuzzy AND) που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις (Dubois & Parde, 2000; Klement et al., 2005):

1. **Τομή** μεταξύ ασαφών συνόλων (t-norm). Είναι κάθε συνάρτηση που ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες για όλα τα $x, y, z \in [0,1]$:
 - $T(x, y) = T(y, x)$
 - $T(x_1, y_1) = T(x_2, y_2)$ εάν $x_1 \leq x_2$ και $y_1 \leq y_2$
 - $T(z, T(x, y)) = T(T(z, x), y)$
 - $T(x, 1) = x$
2. **Ένωση** μεταξύ ασαφών συνόλων (t-conorm ή s-norm) η οποία είναι κατά μια έννοια συμπληρωματική της ένωσης δηλαδή : $S(x, y) = 1 - T(1 - a, 1 - b)$ και ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες για όλα τα $x, y, z \in [0,1]$::
 - $S(x, y) = S(y, x)$
 - $S(x_1, y_1) \leq S(x_2, y_2)$ εάν $x_1 \leq x_2$ και $y_1 \leq y_2$
 - $S(z, S(x, y)) = S(S(z, x), y)$
 - $S(x, 0) = x$



Σχήμα 2-11: Ένωση μεταξύ δυο ασαφών συνόλων και τομή μεταξύ δύο ασαφών συνόλων με τη χρήση των τελεστών max και min αντίστοιχα.

Υπάρχουν πάρα πολλές συναρτήσεις t-norm και s-norm εκ των οποίων οι σημαντικότερες περιγράφονται στον πίνακα 2-2. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις που συναντώνται στην υλοποίηση διαφόρων ασαφών μοντέλων και συστημάτων για τα t-norm

και s-norm αντίστοιχα είναι (Zadeh, 1967; Gilles, 1976) το “**min**” για την υλοποίηση του λογικού τελεστή AND και το “**max**” για το OR.

Πίνακας 2-3: Οι σημαντικότερες συναρτήσεις t-norm και s-norm (Klement et al., 2005)

	T-NORM	S-NORM
MINIMUM / MAXIMUM	$T_{min}(x, y) = \min(x, y)$	$S_{max}(x, y) = \max(x, y)$
PRODUCT / PROBABILISTIC SUM	$T_{prod.}(x, y) = x \cdot y$	$S_{prob.}(x, y) = x + y - x \cdot y$
LUKASIEWICZ T-NORM / S-NORM	$T_{Luk.}(x, y) = \max(x + y - 1, 0)$	$S_{Luk.}(x, y) = \min(x + y, 1)$
DRASTIC PRODUCT/ DRASTIC SUM	$T_d(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{αν } (x, y) \in [0,1]^2 \\ \min(x, y), & \text{αλλιώς} \end{cases}$	$S_d(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{αν } (x, y) \in [0,1]^2 \\ \max(x, y), & \text{αλλιώς} \end{cases}$

Δε θα επεκταθούμε περαιτέρω στις αριθμητικές πράξεις, οι οποίες αναλύονται από πολλούς ερευνητές (π.χ. Klement et al., 2005; Dutta et al., 2011) αλλά θα μελετήσουμε κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των ασαφών συνόλων και πως αυτά προκύπτουν μέσω των ‘a-cuts’.

2.4.1.3 Χαρακτηριστικά ασαφών συνόλων

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη διαδικασία που εκτελούμε στα ασαφή σύνολα είναι το λεγόμενο “**alpha cut**” μέσω του οποίου μπορούμε να επιλέξουμε ένα μέρος μόνο των στοιχείων ενός ασαφούς συνόλου. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι “a-cut” (Dubois & Prade, 2001; Lin et al., 2018):

1. Το ισχυρό “a-Cut” δίνει ως αποτέλεσμα όλα τα στοιχεία που είναι μεγαλύτερα από ένα όριο (α).
2. ενώ το ασθενές “a-Cut” δίνει όσα είναι μεγαλύτερα ή ίσα από το όριο αυτό.

Εφαρμόζοντας διαφορετικούς τύπους “a-cut” για διαφορετικό όριο α λαμβάνουμε κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά των ασαφών συνόλων (Σχήμα 2-7):

1. **Ενεργή περιοχή (support)**. Αν εφαρμόσουμε ένα ισχυρό a-Cut με όριο $\alpha = 0$ τότε λαμβάνουμε όλα τα στοιχεία που συμμετέχουν σε κάποιο βαθμό στο ασαφές σύνολο, δηλαδή:

$$A_{\alpha.s} = x \in X \mid \mu_A(x) > \alpha$$

2. **Πυρήνας (core).** Αν εφαρμόσουμε ασθενές “a-Cut” με όριο $a=1$ τότε λαμβάνουμε όλα τα στοιχεία που συμμετέχουν πλήρως ($\mu_A(x) = 1$) στο ασαφές σύνολο, δηλαδή:

$$A_{\alpha.c} = x \in X \mid \mu_A(x) = 1$$

Επιπλέον κάποια άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι:

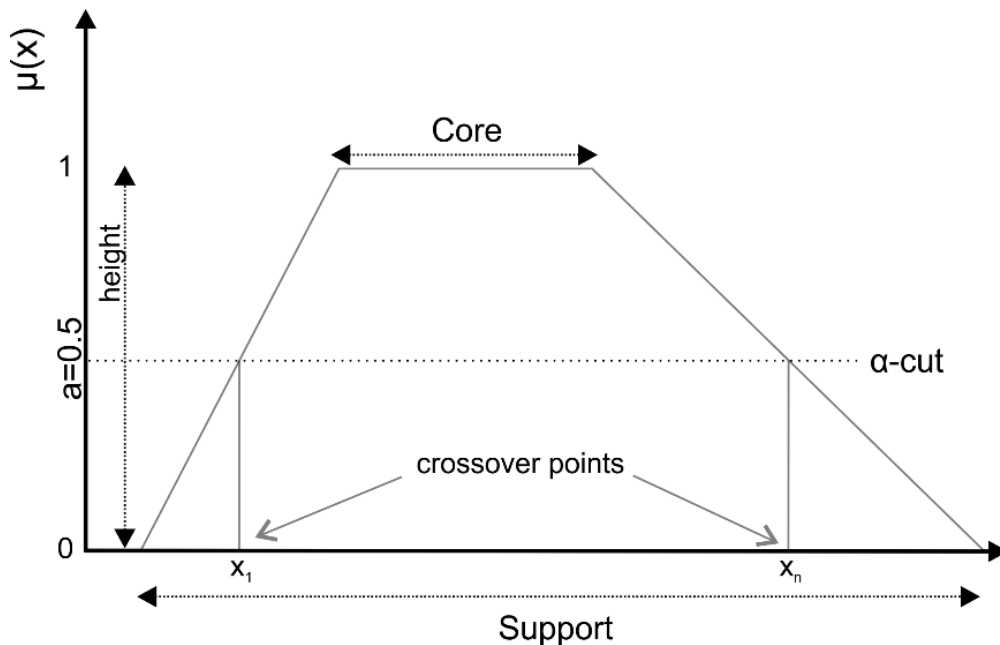
3. **Το ύψος** ενός ασαφούς συνόλου επιστρέφει τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής που υπάρχει σε αυτό. Αυτό μπορεί να λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ αλλά για κανονικά σύνολα τότε θα είναι πάντα ίσο με 1 (Dubois & Prade,2000). Το ύψος ορίζεται ως:

$$height(A) = \sup (\mu_A(x))$$

δηλαδή ως το ελάχιστο άνω φράγμα (supremum) του όχι κενού, άνω φραγμένου ασαφούς συνόλου που περιέχει τους βαθμούς συμμετοχής $\mu_A(x)$. **Κανονικό** είναι ένα ασαφές σύνολο για το οποίο ο πυρήνας δεν είναι ίσος με το μηδέν, δηλαδή υπάρχει τουλάχιστον κάποιο

4. Ως **σημεία καμπής** (crossover points) μίας συνάρτησης συμμετοχής ορίζονται τα σημεία που ανήκουν στο πεδίο ορισμού της συνάρτησης για τα οποία ο βαθμός συμμετοχής είναι 0.5 δηλαδή:

$$\Sigma K(A) = x \in X \mid \mu_A(x) = 0.5$$



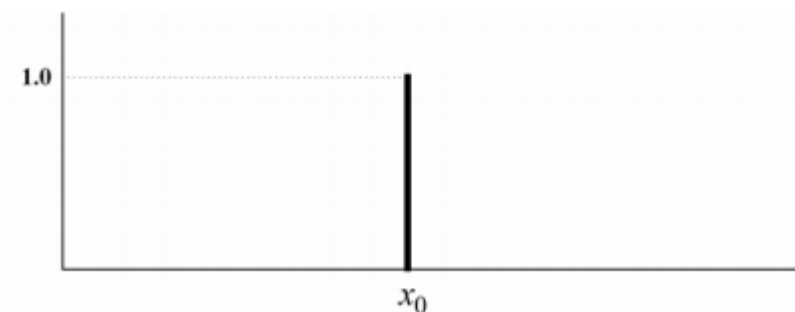
Σχήμα 2-12: Χαρακτηριστικά ασαφών συνόλων

5. **Κυρτότητα.** Ένα ασαφές σύνολο μπορεί να είναι κυρτό (convex) ή μη κυρτό. Σε ένα κυρτό σύνολο η συνάρτηση συμμετοχής αυξάνει μονότονα φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και έπειτα φθίνει μονότονα. Δηλαδή για τρία στοιχεία του ασαφούς συνόλου A , για τα οποία ισχύει ότι $x < y < z$, θα έχουμε ένα κυρτό σύνολο εάν ισχύει ότι:

$$\mu_A(y) \geq \min[\mu_A(x), \mu_A(z)]$$

6. Ασαφές singleton

Το ασαφές singleton είναι μια ειδική περίπτωση ασαφούς συνόλου, το οποίο αποτελείται μόνο από ένα στοιχείο με βαθμό συμμετοχής 1 ενώ όλα τα υπόλοιπα σημεία έχουν τιμή 0.



Σχήμα 2-13: Σχηματική απεικόνιση ασαφούς Singleton

2.4.1.4 Λεκτικές μεταβλητές (Linguistic Variables)

Ιδιαίτερα χρήσιμες κατά την κατασκευή ασαφών συστημάτων βασισμένων σε κανόνες είναι **οι λεκτικές μεταβλητές**. Μέσω αυτών μπορούμε να εκφράσουμε τους όρους με ένα τρόπο που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας (π.χ. “μικρή κλίση”). Έτσι μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τις αριθμητικές τιμές σε μια **γλωσσική μεταβλητή**, και με τον όρο «μικρή κλίση» να εκφράζουμε όλες τις αριθμητικές τιμές της κλίσης οι οποίες θεωρούνται χαμηλές. Επειδή βέβαια μιλάμε για ασαφή συστήματα, και με τη βοήθεια των συναρτήσεων συμμετοχής, δίνουμε μια προοδευτικότητα στις τιμές που μελετάμε. Έτσι μια κλίση μπορεί να θεωρείται “μικρή” σε βαθμό 0.8 και “μεσαία” σε βαθμό 0.2, ενώ μια μεγαλύτερη κλίση να έχει βαθμούς συμμετοχής 0.4 και 0.6 για τα αντίστοιχα σύνολα .

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω πλέον δεν υπάρχουν σαφή όρια μεταξύ των διαφόρων συνόλων, αντίθετα υπάρχει **μια σταδιακή μετάβαση** για μια τιμή από το ένα σύνολο στο άλλο κάτι που δίνει τη δυνατότητα να αναλύσουμε πιο ευκολα και αποδοτικά λεκτικές εκφράσεις (π.χ. ομαλό ανάγλυφο, απότομο ανάγλυφο, μεγάλη τρωτότητα στη διάβρωση)

2.4.1.5 Συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (Fuzzy Inference Systems - FIS)

Ένα σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων ή αλλιώς ένα ασαφές σύστημα ενσωματώνει την γνώση και την εμπειρία ενός ειδικού στο αντίστοιχο πεδίο μελέτης, για τον σχεδιασμό ενός συστήματος το οποίο μελετά μια διαδικασία. Ένα τέτοιο σύστημα βασίζεται σε λογικούς κανόνες, χρησιμοποιεί ασαφή σύνολα για τα δεδομένα και παράγει μια έξοδο, με τον συνδυασμό των παραπάνω.

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες τέτοιων συστημάτων τα **συστήματα Mamdami** (Mamdami & Assilian, 1975) και τα συστήματα Sugeno (Sugeno, 1985). Τα συστήματα Mamdami σχεδιάστηκαν ως ένα σύστημα ελέγχου το οποίο συνδυάζει διάφορους λεκτικούς κανόνες για να παράγει ένα αποτέλεσμα. Το αποτέλεσμα κάθε κανόνα είναι ένα ασαφές σύνολο, και για κάθε σημείο το αποτέλεσμα των ενεργών κανόνων συνδυάζεται για να δώσει την τελική τιμή. Σε αυτό το σύστημα η υλοποίηση και η ερμηνεία των κανόνων είναι απλή και για αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι κανόνες δημιουργούνται από «ειδικούς». Τα **συστήματα Sugeno** είναι παρόμοια σε μεγάλο βαθμό αλλά με μια μεγάλη διαφορά στον υπολογισμό της εξόδου κάθε κανόνα. Σε αυτά τα συστήματα αντί για ένα ασαφές σύνολο, χρησιμοποιείται ένα singleton το οποίο είτε είναι σταθερό είτε γραμμικά εξαρτημένο από τις μεταβλητές εισόδου. Έτσι είναι υπολογιστικά πιο αποδοτικό καθώς για να υπολογίσει την τελική έξοδο υπολογίζει το σταθμισμένο άθροισμα κάποιων σημείων, σε αντίθεση με τα συστήματα Mamdami που θα πρέπει να υπολογιστεί το κέντρο βάρους κάποιου πολυγώνου. Αν και αποδοτικό, δεν χρησιμοποιείται σε συστήματα που συνδυάζουν τη γνώση ειδικών στο πεδίο, αλλά ταιριάζουν περισσότερο σε προβλήματα μαθηματικής ανάλυσης (Mendel, 2017).

2.4.1.6 Εφαρμογές ασαφούς λογικής στην εκτίμηση της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου

Η θεωρία ασαφών συνόλων και η ασαφής λογική βελτιώνουν τη παραδοσιακή λογική και μπορούν να αποδειχτούν ιδιαίτερα χρήσιμες στις επιστήμες της γης (McBratney & Odeh, 1997). Ενώ μέσω της δίτιμης λογικής (Boolean logic) χάνεται μέρος της πληροφορίας και εισάγεται μεγάλη αβεβαιότητα στην ανάλυση των δεδομένων, με τη χρήση της ασαφούς λογικής αποκτούμε τη δυνατότητα να χειριστούμε το πρόβλημα της αβεβαιότητας και να βελτιώσουμε τα αποτελέσματά μας (Wang et al., 1990). Επιπλέον μειώνουμε την απώλεια της πληροφορίας κατά την ανάλυση των δεδομένων (τοπογραφικών, εδαφικών κ.α.) κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για την καλύτερη ταξινόμηση τους. (Burrough et al., 1992).

Η εκτίμηση του **δυναμικού της διάβρωσης αλλά και του πλημμυρικού κινδύνου** με τη χρήση της ασαφούς λογικής, μπορεί να αποδειχτεί πολύτιμη, ειδικά κατά τη μελέτη περιοχών για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή ή αξιόπιστα δεδομένα, παρέχοντας καλά αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτεί την αγορά ειδικού λογισμικού καθώς μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα σύστημα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.). Έχει αποδειχθεί ότι ακόμα και ασαφή μοντέλα δυο μεταβλητών παρέχουν παρόμοια εκτίμηση του δυναμικού διάβρωσης σε σχέση με μεθόδους όπως το USLE και έτσι είναι προφανής η χρησιμότητά τους (Mitra et al., 1998).

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη **μοντελοποίηση φυσικών καταστροφών** μέσω εφαρμογής κανόνων **ασαφούς λογικής** (π.χ. Mitra, 1998; Zhu, et al., 2001; Gournelos et al., 2015), ενώ για τον ελληνικό χώρο οι πρώτες μελέτες εκτίμησης του κινδύνου διάβρωσης με χρήση ασαφούς λογικής ξεκίνησαν πριν περίπου 20 χρόνια (Gournelos, et al., 2001) στα οποία χρησιμοποιούνται Γ.Σ.Π. με δεδομένα εισόδου τοπογραφικά, λιθολογικά και άλλα χαρακτηριστικά (όπως οι χρήσεις γης). Η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων σε διάφορες περιοχές του ελληνικού χώρου έχει δώσει καλά αποτελέσματα κατά το παρελθόν (Gournelos et al, 2000;2004; Kotinas et al., 2015; Gournelos et al., 2019).

2.4.2 Νευρωνικά δίκτυα

Τα **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Τ.Ν.Δ.)**, έχουν προέλθει από τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών νευρωνικών δικτύων του ανθρώπινου εγκεφάλου (Ramon y Cajal 1911) και είναι ένας τύπος παράλληλης δομής υπολογιστικών συστημάτων. Τα Τ.Ν.Δ. είναι συστήματα εξαιρετικής παραλληλίας που χρησιμοποιούν εμπειρική γνώση, και μπορούν να επιλύσουν μη γραμμικά προβλήματα. Η εκμάθηση γίνεται επαγωγικά μέσω παραδειγμάτων και η γνώση αποθηκεύεται στις συνδέσεις των νευρώνων, ως συναπτικά βάρη. Κάθε νευρώνας υπολογίζει την έξοδο του σαν συνάρτηση των εισόδων και των συναπτικών βαρών του. Ο τρόπος που θα συνδεθούν οι νευρώνες μεταξύ τους καθορίζει τον τύπο του Τ.Ν.Δ. Τα τελευταία χρόνια και εξαιτίας της μεγάλης ανάπτυξης του υλικού, του λογισμικού των υπολογιστών αλλά και των μεθοδολογιών αυτόματης συλλογής δεδομένων επιστήμονες από όλα τα επιστημονικά πεδία τα χρησιμοποιούν για να αναλύσουν δεδομένα πολλών μεταβλητών και διαφορετικού μεγέθους.

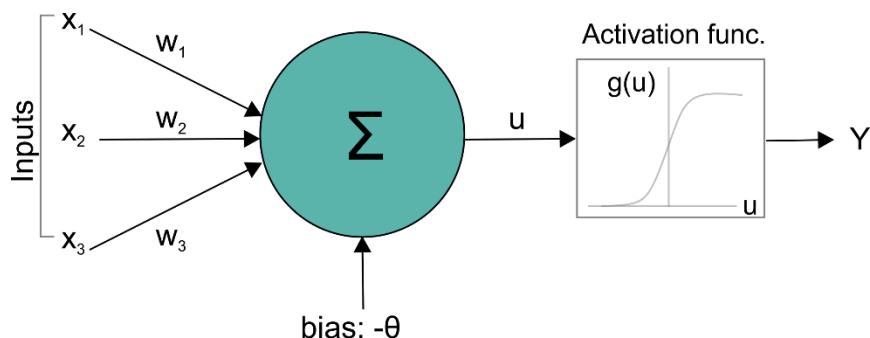
Ένας μεγάλος αριθμός **αλγορίθμων Τ.Ν.Δ.** έχουν προταθεί όπως τα **Εμπρόσθιας Τροφοδότησης Δίκτυα Πολλαπλών Επιπέδων** (Rumelhart et al. 1986), τα **Αναδραστικά Τ.Ν.Δ.** (Elman 1988), τα **Δίκτυα Hopfield** (Hopfield 1987), και οι **Αυτοοργανούμενοι Χάρτες Χαρακτηριστικών** (Kohonen 1989). Δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από γραμμικές μεθόδους, ειδικά κατά τη μελέτη της σχέσης βροχόπτωσης - απορροής (Hsu et al. 1995, Dawson & Wilby 1999, Chen & Adams 2006, Machado et al. 2011), και χρησιμοποιούνται ευρέως στη μελέτη των πλημμυρών και της διάβρωσης.

Υβριδικά συστήματα προκύπτουν από το συνδυασμό μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης, δημιουργώντας συστήματα όπως τα Νευρο-Ασαφή, τα οποία συνδυάζουν τη δυνατότητα εκμάθησης και παραλληλίας των Τ.Ν.Δ. με την εισαγωγή της εμπειρικής γνώσης στο σύστημα (Jang 1993, Nayak 2005, Galavi et al. 2012). Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταξύ άλλων για την ανάλυση μη γραμμικών μεταβλητών και συσχετίσεων (Chen et al. 2005, Ozkan & Inal 2014) και για την δημιουργία κανόνων λογικής (Lin et al. 2014).

2.4.2.1 Ο νευρώνας

Σε αναλογία με τον ανθρώπινο οργανισμό, ο οποίος περιέχει κάποια κύτταρα (νευρώνες), τα οποία αλληλοσυνδέονται για να μεταφέρουν τα ερεθίσματα προς τον εγκέφαλο ή τις εντολές του εγκεφάλου προς αυτά, στα νευρωνικά δίκτυα υπάρχει μια αντίστοιχη οντότητα ο νευρώνας. Αυτός δέχεται κάποιες εισόδους οι οποίες έχουν βάρη (weights), τις

επεξεργάζεται και αποφασίζει (μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης) αν πρέπει να ενεργοποιηθεί οπότε παράγει μια έξοδο. Αυτή η έξοδος μπορεί να τροφοδοτεί κάποιο επόμενο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου ή να αποτελεί την έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Το πιο απλό μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα, ο οποίος προσομοιάζει με έναν βιολογικό νευρώνα προτάθηκε από τους McCulloch & Pitts, 1943 και παραμένει ακόμα και σήμερα η βασική μονάδα, πολλών διαφορετικών αρχιτεκτονικών νευρωνικών δικτύων (Σχήμα 2-14).



Σχήμα 2-14: η εσωτερική δομή ενός τεχνητού νευρώνα (τροποποιημένο από Da Silva, 2017; El-Shahat, 2018)

Ένας νευρώνας αποτελείται από επτά βασικά στοιχεία (Priddy & Keller, 2005; Da Silva, 2017):

1. **Είσοδοι (x_n).** Είναι οι πληροφορίες ή τα σήματα που λαμβάνει το νευρωνικό δίκτυο από το εξωτερικό περιβάλλον. Συνήθως οι είσοδοι κανονικοποιούνται για να αυξηθεί η απόδοση των αλγορίθμων εκμάθησης.
2. **Συναπτικά βάρη (w_n).** Τα βάρη αυτά χρησιμοποιούνται για ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της κάθε εισόδου για τον νευρώνα που εξετάζουμε.
3. **Αθροιστής (linear aggregator).** Συνενώνει τις σταθμισμένες εισόδους για να παράγει μια συνολική τιμή.
4. **Κατώφλι ενεργοποίησης (bias: θ).** Είναι μια τιμή την οποία το αποτέλεσμα που προκύπτει από τον αθροιστή θα πρέπει να ξεπερνάει για να ενεργοποιηθεί ο νευρώνας.
5. **Δυναμικό ενεργοποίησης (activation potential: u).** Είναι η διαφορά ανάμεσα στο κατώφλι ενεργοποίησης και την έξοδο του αθροιστή. Εάν $u \geq \theta$ τότε ο νευρώνας ενεργοποιείται και παράγει μια έξοδο.
6. **Συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function: g).** Σκοπός της συνάρτησης ενεργοποίησης είναι, όταν ο νευρώνας ενεργοποιηθεί να παράγει ένα αποτέλεσμα σε ένα κατάλληλο εύρος τιμών.

7. **Έξοδος.** Είναι η τελική τιμή εξόδου του νευρώνα, η οποία μπορεί να είναι η τελική τιμή του νευρωνικού δικτύου, ή μπορεί να τροφοδοτείται ένας νευρώνας επόμενου επιπέδου από αυτή την τιμή.

2.4.2.2. Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Για την ενεργοποίηση του νευρώνα χρησιμοποιούνται πολλές διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης (Σχήμα 2-10). Αυτές μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Clarkson, 1996; da Silva, 2017):

- **Μερικώς παραγωγίσιμες.** Σε αυτές τις συναρτήσεις δε μπορεί να οριστεί η πρώτη παράγωγος για κάποια σημεία του πεδίου ορισμού τους. Οι πιο γνωστές είναι:

- **Βηματική** (step function):

$$Y = g(u) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } u \geq 0 \\ 0, & \text{εάν } u < 0 \end{cases}$$

- **Διπολική βηματική** (bipolar or signal function) :

$$Y = g(u) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } u > 0 \\ 0, & \text{εάν } u = 0 \\ -1, & \text{εάν } u < 0 \end{cases}$$

- **Συνάρτηση αναρρίχησης** (symmetric ramp function), στην οποία όταν το δυναμικό ενεργοποίησης (u) βρίσκεται εντός του πεδίου ορισμού της συνάρτησης : $[-a, a]$, τότε η έξοδος είναι ίση με u , ενώ όταν το u είναι εκτός του πεδίου ορισμού της τότε λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (a) ή την ελάχιστη τιμή του ($-a$) :

$$Y = g(u) = \begin{cases} a, & \text{εάν } u > a \\ u, & \text{εάν } -a \leq u \leq a \\ -a, & \text{εάν } u < -a \end{cases}$$

- **Πλήρως παραγωγίσιμες,** στις οποίες η πρώτη παράγωγος ορίζεται για κάθε σημείο του πεδίου ορισμού της συνάρτησης. Οι πιο γνωστές είναι:

- **Γραμμική συνάρτηση:**

$$Y = g(u) = u$$

- **Λογιστική ή σιγμοειδής συνάρτηση** (logistic function), στην οποία η έξοδος είναι πάντα μεταξύ 0 και 1 και δίνεται από τη συνάρτηση:

$$Y = g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u}}$$

όπου β μια σταθερά που σχετίζεται με την κλίση της συνάρτησης (inflection point).

ο **Υπερβολική εφαπτομενική συνάρτηση** (hyperbolic tangent), η οποία είναι παρόμοια με τη λογιστική αλλά η έξοδος βρίσκεται μεταξύ -1 και 1:

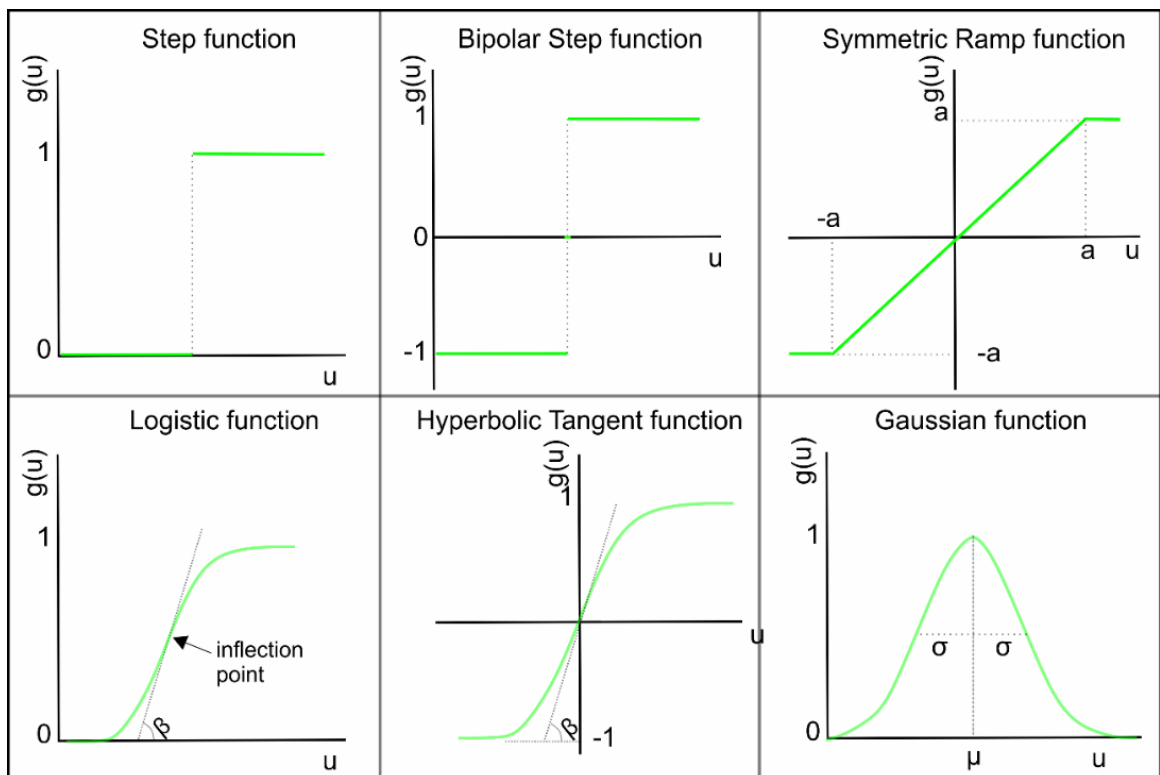
$$Y = g(u) = \frac{1 - e^{-\beta u}}{1 + e^{-\beta u}}$$

ο **Κανονική συνάρτηση** (gaussian function), η οποία είναι μια συνάρτηση με μέση τιμή (μ) και τυπική απόκλιση (σ), και για την οποία η έξοδος θα είναι ίδια για τα σημεία που βρίσκονται σε ίδια απόσταση από το μέσο της:

$$Y = g(u) = e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Από τις προηγούμενες συναρτήσεις η πιο γνωστή είναι η **σιγμοειδής ή λογιστική συνάρτηση** η οποία ανάλογα με τις εισόδους (x_i) και τα βάρη (w_i) παράγει την έξοδο του νευρώνα μέσω της σχέσης:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-\sum_i w_i x_i + w_0}}$$



Σχήμα 2-16: Οι πιο γνωστές συναρτήσεις ενεργοποίησης ενός νευρώνα (τροποποιημένο από Priddy & Keller, 2005; da Silva, 2017).

2.4.2.3 Κύριες αρχιτεκτονικές Τ.Ν.Δ

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Τ.Ν.Δ) αποτελείται από πολλούς νευρώνες οι οποίοι οργανώνονται σε επίπεδα. Ένα νευρωνικό δίκτυο έχει κατ'ελάχιστο **2 επίπεδα νευρώνων** (single-layer Feedforward ANN; Da Silva, 2017):

- **Επίπεδο εισόδου.** Αυτό το επίπεδο δέχεται πληροφορία (με τη βοήθεια νευρώνων) από τον εξωτερικό κόσμο η οποία μπορεί να αποτελείται από δεδομένα, σήματα, μετρήσεις ή άλλα στοιχεία εισόδου.

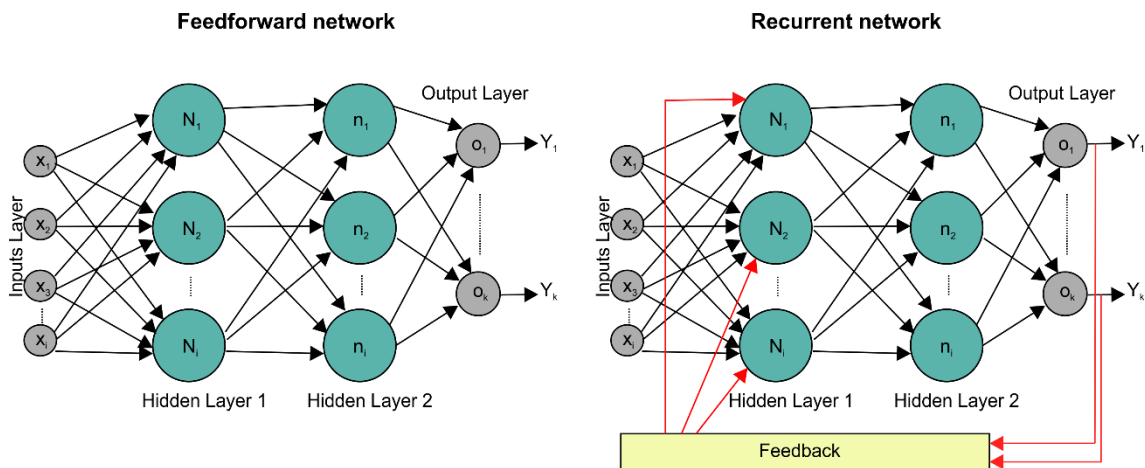
- **Ενδιάμεσο επίπεδο.** Εκτός από το επίπεδο εισόδου υπάρχει άλλο ένα επίπεδο το οποίο επεξεργάζεται τις εισόδους και εξάγει το αποτέλεσμα, δηλαδή είναι ταυτόχρονα και επίπεδο εξόδου.

Ανάλογα με την οργάνωση των νευρώνων στο προκύπτουν διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα τα πιο σημαντικά εκ των οποίων είναι:

- **ΤΝΔ ενός ή πολλαπλών επιπέδων με απλή τροφοδότηση** (feedforward ANN). Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ νευρώνων ενός επιπέδου με τους νευρώνες του προηγούμενου. Ένα ΤΝΔ ενός επιπέδου, έχει μόνο 2 επίπεδα (input, output), με χαρακτηριστικά παραδείγματα το **Perceptron και το ADALINE**. Ένα ΤΝΔ πολλαπλών επιπέδων έχει τουλάχιστον ένα κρυφό επίπεδο νευρώνων, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το Multilayer Perceptron και το Radial Basis Function.

- **ΤΝΔ με ανατροφοδότηση** (recurrent or feedback ANN) στα οποία υπάρχουν συνδέσεις ανάμεσα στους νευρώνες ενός επιπέδου και του προηγούμενου (Σχήμα 2-17). Αυτά τα δίκτυα είναι ιδανικά για τη μελέτη συστημάτων που μεταβάλλονται στο χρόνο πχ για την ανάλυση χρονοσειρών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το δίκτυο **Hopfield και το δίκτυο Perceptron με αλληλεπίδραση μεταξύ νευρώνων** διαφορετικών επιπέδων.

- **ΤΝΔ με πλέγμα** (mesh ANN). Σε αυτά τα δίκτυα η χωρική θέση των νευρώνων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαδικασία προσαρμογής των συναπτικών βαρών και των άλλων παραμέτρων τους όπως του κατωφλίου (threshold), τα οποία θα δούμε με λεπτομέρειες σε επόμενο κεφάλαιο. Το δίκτυο Kohonen (Σχήμα 2-13) είναι το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα ενός τέτοιου δικτύου. Έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών για παράδειγμα στην ομαδοποίηση δεδομένων, αναγνώριση προτύπων, γράφους κλπ.



Σχήμα 2-17: Οι σημαντικότερες κατηγορίες νευρωνικών δικτύων: (α) νευρωνικά δίκτυα απλής τροφοδότησης και (β) νευρωνικά δίκτυα με ανατροφοδότηση.

2.4.2.4 Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων

Το σημαντικότερο ίσως χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η δυνατότητα **εκπαίδευσης** τους. Έτσι μαθαίνουν καθώς νέα δεδομένα παρουσιάζονται σε αυτά και αναπροσαρμόζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά τους (π.χ. συναπτικά βάρη), μέσω ενός αλγορίθμου εκπαίδευσης, ώστε να προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα μέσω των οποίων εκπαιδεύονται, και να μπορεί να γενικεύσει καλύτερα σε νέα δεδομένα (da Silva, 2017). Υπάρχουν δυο **βασικοί τύποι εκπαίδευσης**:

- **Επιβλεπόμενη** (supervised learning). Όταν γνωρίζουμε τις τιμές εξόδου, για ένα συνδυασμό εισόδων τότε το νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιεί αυτή τη πληροφορία για να μάθει και να προσαρμοστεί στα δεδομένα. Το δίκτυο αναπροσαρμόζει συνεχώς τα βάρη του και τις τιμές κατωφλίου του, μέχρι ένα σημείο στο οποίο η διαφορά ανάμεσα στις πραγματικές τιμές και τις προβλεπόμενες τιμές να βρίσκεται εντός ενός αποδεκτού ορίου. Πολλοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την επιβλεπόμενη εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου (π.χ. Hebb's rule; 1949).

- **Μη επιβλεπόμενη** (unsupervised learning). Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο δεν απαιτείται η γνώση της εξόδου για την εκπαίδευση του δικτύου. Το νευρωνικό δίκτυο αναδιοργανώνεται μόνο του, βάση των χαρακτηριστικών των εισόδων και των ομοιοτήτων που αναγνωρίζει ανάμεσα σε διαφορετικά αντικείμενα. Χρησιμοποιείται σε προβλήματα συσταδοποίησης όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο με λεπτομέρειες.

Κάποιοι άλλοι τύποι εκπαίδευσης που συναντώνται συχνά είναι η εκπαίδευση **'online'** και **'offline'**, στις οποίες είτε η αναπροσαρμογή των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου γίνεται μετά την εισαγωγή ενός αντικειμένου σε αυτό, ή μετά την εισαγωγή και την

αναγνώριση όλων των αντικειμένων εκπαίδευσης. Τα πρώτα χρειάζεται να αναγνωρίσουν αρκετά αντικείμενα πριν αρχίσουν να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα (Reed & Marks, 1999) ενώ τα δεύτερα, χρειάζονται τουλάχιστον μια εποχή (επανάληψη) κατά την οποία αναγνωρίζουν όλα τα αντικείμενα και αναπροσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά τους τόσες φορές όσες και ο αριθμός των χαρακτηριστικών.

2.4.2.5 Ανταγωνιστικά δίκτυα & Αυτοοργανούμενοι χάρτες (SOM)

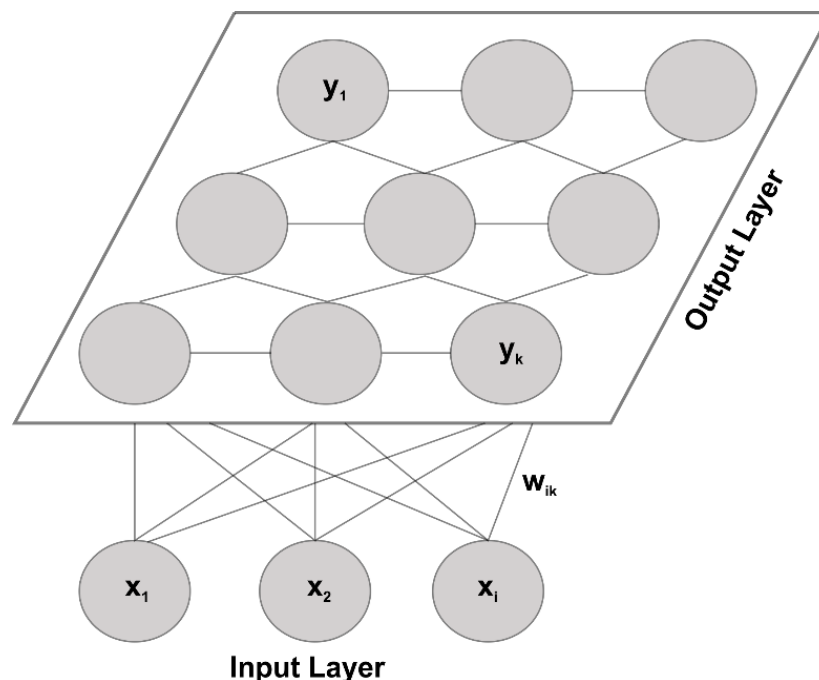
Πολλά προβλήματα, αφορούν την αντιστοίχιση δεδομένων με πολλές διαστάσεις σε δύο η και περισσότερες διαστάσεις, εκ των οποίων η πιο γνωστές είναι η **ανάλυση κύριων συνιστωσών** (principal component analysis – PCA; Pearson, 1901) και οι **αυτοοργανούμενοι χάρτες** (self-organising maps – SOM; Kohonen, 1982) . Η δεύτερη προσέγγιση, οργανώνει τους νευρώνες σε μια **αρχιτεκτονική πλέγματος** (mesh architecture), εμφανίζει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα και είναι ικανή να επιλύσει πιο πολύπλοκα προβλήματα καθώς: (α) μπορεί να διακρίνει τις διάφορες ομάδες πιο αποτελεσματικά (Reusch et al., 2007), (β) βοηθάει τον ερευνητή να αναγνωρίσει οπτικά τις ομάδες σημείων με όμοια χαρακτηριστικά (Flexer, 2001), (γ) μπορεί να αναγνωρίσει ομάδες ακόμα και όταν τα δεδομένα δεν είναι γραμμικά ή έχουν πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα (Aguado et al., 2008). Έτσι η **μέθοδος “SOM”** είναι κατάλληλη για ένα πλήθος προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων που αναλύουν γεω-χωρικά δεδομένα (Gorricha & Lobo, 2012; Li & Juhola, 2014).

Τα δίκτυα αυτά έχουν εμπνευστεί από την λειτουργία του εγκεφαλικού φλοιού όπου μια συγκεκριμένη περιοχή του αντιστοιχεί στην απόκριση σε ένα συγκεκριμένο ερέθισμα (π.χ. οπτικό ακουστικό) και έχει πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών σε πολλά διαφορετικά γνωστικά πεδία (Nunes da Silva et al., 2017), αλλά μπορεί να επιλύσει καλύτερα προβλήματα ομαδοποίησης ή αναγνώρισης μοτίβων. Ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των αρχιτεκτονικών κανάβου, στις οποίες η θέση των νευρώνων επηρεάζει άμεσα την προσαρμογή των συναπτικών βαρών και των κατωφλίων (synaptic weights and thresholds).

Το SOM αποτελεί ένα **νευρωνικό δίκτυο** το οποίο είναι **ανταγωνιστικό** (δηλαδή οι νευρώνες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιος θα επικρατήσει – “winner takes all”) και χωρίς επίβλεψη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για “χαρτογραφήσει” διανυσματικά μεγέθη n-διαστάσεων σε ένα πλέγμα νευρώνων 2 διαστάσεων ή αλλιώς σε ένα χάρτη και έτσι είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ως μια μέθοδος συμπίκνωσης των διαστάσεων των δεδομένων (Kohonen,

2001; Aguado et al., 2008). Το δίκτυο αυτό αναπτύχθηκε για τη μελέτη πολύπλοκων δεδομένων τα οποία δεν είναι γραμμικά και για αυτό το λόγο πλεονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο PCA στην ανάλυση τους. Επιπλέον συνεχώς αναπτύσσονται παραλλαγές του SOM, ή υβριδικά συστήματα βασισμένα στο SOM τα οποία έχουν πολλές εφαρμογές (π.χ. Fritzke, 1994; π.χ. Koikkalainen & Oja, 1990; Alahakoon et al., 2000; Cuadros-Vargas et al., 2002; Ismail et al., 2011; Santana et al., 2017).

Βασικός σκοπός ενός τέτοιου δικτύου είναι να “μάθει” από τα δεδομένα και να δημιουργήσει ένας χάρτη χαρακτηριστικών τα οποία προβάλλονται μέσω της αναδιανομής των νευρώνων σε ένα δισδιάστατο πλέγμα γνωστό και ως “SOM”. Έτσι σχηματίζεται ένας **τοπολογικός χάρτης** ο οποίος δείχνει τις σχέσεις μεταξύ των προτύπων εκπαίδευσης του δικτύου. Κάθε περιοχή του τοπολογικού χάρτη χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες, οι οποίες την καθιστούν ανεξάρτητη περιοχή σε σχέση με τις υπόλοιπες. Παρόλαυτα η ερμηνεία του τελικού αποτελέσματος δεν είναι εύκολη (Tan & George, 2004) , κάτι που ισχύει και για άλλους τύπους νευρωνικών δικτύων καθώς αυτά συμπεριφέρονται ως **μαύρο κουτί** (black box).



Σχήμα 2-18: Δομή ενός δικτύου SOM (Τροποποιημένο από Jaramillo et al., 2013)

Το βασικό χαρακτηριστικό του **SOM** αλλά και των άλλων ανταγωνιστικών δικτύων, είναι ο συναγωνισμός μεταξύ των νευρώνων για την επιλογή του **νικήτη** (“**winner takes all**”). Σε αυτή τη μέθοδο έχουμε μια διαφορετική προσέγγιση εκμάθησης σε σχέση με άλλα δίκτυα οπισθοδιάδοσης όπου ο βασικός στόχος είναι η αντιστοίχιση εισόδων-εξόδων με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί το σφάλμα. Στην ανταγωνιστική μάθηση η συνάρτηση

ενεργοποίησης του νευρώνα αυξάνει ανάλογα με την ομοιότητα που έχουν το διάνυσμα βαρών του νευρώνα με το διάνυσμα των εισόδων. Το διάνυσμα των βαρών έχει τις ίδιες διαστάσεις με το διάνυσμα των εισόδων, και με τη μέτρηση για παράδειγμα της **ευκλίδειας απόστασης** αναγνωρίζεται η ομοιότητα ανάμεσα στα δυο διανύσματα. Με αυτό τον τρόπο σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ένας μόνο νευρώνας ενεργοποιείται, δηλαδή επικρατεί, και μετακινείται πιο κοντά προς την συγκεκριμένη είσοδο μέσω της αναπροσαρμογής των βαρών του. Η **αναπροσαρμογή** αυτή είναι αναλογική των εισόδων, και μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε επόμενη επανάληψη να επιτύχει ακόμα καλύτερη προσαρμογή στο κριτήριο που χρησιμοποιεί το δίκτυο για τον νικητή (Aggarwal, 2018). Σε κάποιες παραλλαγές της βασικής μεθόδου, επιτρέπεται και η αναπροσαρμογή άλλων νευρώνων σε κάθε βήμα ανάλογα με την **τοπολογική σχέση γειτονίας** σε σχέση με το νικητή νευρώνα. Ένας βασικός αλγόριθμος ανταγωνιστικής μάθησης ενός νευρωνικού δικτύου περιγράφεται ακολούθως (βασισμένος σε Nunes da Silva et al., 2017):

Εκπαίδευση ανταγωνιστικού δικτύου (Training)

1. Λήψη δειγμάτων εκπαίδευσης (x^k) από τον πληθυσμό
2. Αρχικοποίηση του νευρωνικού δικτύου. Κανονικοποίηση των τιμών, αρχικοποίηση των βαρών των n νευρώνων, τα οποία αρχικά λαμβάνουν λαμβάνουν τις τιμές των πρώτων n δειγμάτων, προσδιορισμός του συντελεστή 1 και έναρξη του μετρητή των επαναλήψεων ή αλλιώς εποχών (epoch counter).
3. Επανάληψη των κυρίως βημάτων του αλγορίθμου για όλα τα δείγματα σε κάθε εποχή:
 - a. Υπολογισμός ευκλίδειας απόστασης ανάμεσα σε x^k και w^i
 - b. Εύρεση του νικητή νευρώνα
 - c. Προσαρμογή των βαρών του νευρώνα και κανονικοποίηση του.
4. Όταν τα βάρη δεν αλλάζουν σημαντικά → ΤΕΛΟΣ

Αλγόριθμος 2-1: Διαδικασία εκπαίδευσης ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου

Κατά την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου υπάρχουν πολλοί κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν για να **προσδιοριστεί ο νικητής νευρώνας** (για το εξεταζόμενο δείγμα της εισόδου), μια εκ των οποίων είναι το κριτήριο της απόστασης ανάμεσα στο διάνυσμα του βάρους ενός νευρώνα (w^i) και του διανύσματος της εισόδου (x^k):

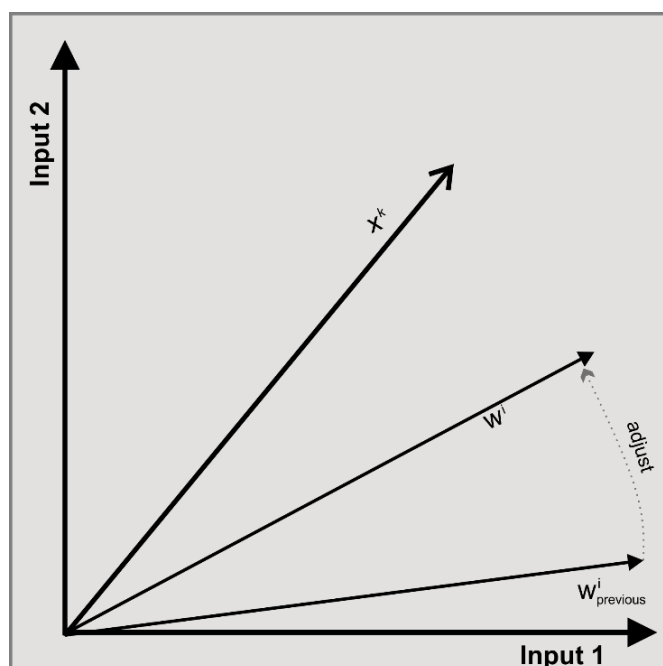
$$distance_i^k = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j^k - w_j^i)^2}$$

Έπειτα το **βάρος του νικητή νευρώνα αναπροσαρμόζεται**:

$$w^i = w_{previous}^i + l \cdot (x^k - w_{previous}^i)$$

όπου l ένας συντελεστής ρυθμού εκμάθησης (learning rate), με τιμή συνήθως πολύ μικρότερη από 1, τιμή η οποία σε κάποιες μεθόδους μειώνεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου (Aggarwal, 2018).

Μετά το τέλος του αλγορίθμου, για κάθε νευρώνα, τοποθετούμε το διάνυσμα βάρους του στο κέντρο της ομάδας που αντιπροσωπεύει (δηλαδή των διανυσμάτων εισόδου στα οποία ο νευρώνας αυτός είναι κοντά), δημιουργώντας έτσι **συμπλέγματα** (clusters) τα οποία συσχετίζονται άμεσα με το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε. Είναι προφανές ότι ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων εξόδου του δικτύου λαμβάνουμε αντίστοιχα ίδιο αριθμό συμπλεγμάτων και συνεπακόλουθα τιμών εξόδου για τα προς ομαδοποίηση δεδομένα. Σε συνδυασμό τη **γνώση των ειδικών** (expert knowledge) ή/και στατιστικών μεθόδων όπως η **ιεραρχική ταξινόμηση** μπορούν τα συμπλέγματα αυτά να μειωθούν περαιτέρω ή να αναγνωριστεί τι αντιπροσωπεύουν στην πραγματικότητα, διαδικασία η οποία σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι εύκολη.



Σχήμα 2-19: Διαδικασία αναπροσαρμογής βαρών νικητή νευρώνα (τροποποιημένο από Nunes da Silva et al., 2017)

Μετά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, μπορούν να εισαχθούν νέα δεδομένα και να υπολογιστεί η ομάδα στην οποία αυτά ταξινομούνται μέσω της **προσομοίωσης** (simulation) από το ανταγωνιστικό νευρωνικό δίκτυο, απλά καθορίζοντας ποιος είναι ο νικητής νευρώνας σε σχέση με την είσοδο δηλαδή :

Λειτουργία προσομοίωσης αλγορίθμου ταξινόμησης με τη χρήση ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου (Simulation)

1. Εισαγωγή δείγματος προς ταξινόμηση (x) και κανονικοποίηση του.
2. Εισαγωγή όλων των διανυσμάτων των βαρών (w^i) των νευρώνων του εκπαιδευμένου δικτύου.
3. Για κάθε νευρώνα υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα σε x και w^i
4. Εύρεση του νικητή νευρώνα, συγκρίνοντας τις παραπάνω αποστάσεις και επιλέγοντας τη μικρότερη.
5. Σύσχέτιση του δείγματος προς ταξινόμηση (x) με μια ομάδα, η οποία αντιστοιχεί στο σύμπλεγμα που εκπροσωπείται από τον νικητή νευρώνα.
6. Έξοδος αποτελέσματος → ΤΕΛΟΣ

Αλγόριθμος 2-2: Διαδικασία εκπαίδευσης ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου

2.4.2.6 Εκτίμηση διάβρωσης μέσω νευρωνικών δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ποικίλους τρόπους για την εκτίμηση της **διάβρωσης**. Μπορούν είτε να βελτιώνουν κάποιο υποσύστημα ενός υπάρχοντος μοντέλου υπολογισμού της εδαφικής διάβρωσης είτε να αποτελούν **αυτόνομα εργαλεία** για τον συνδυασμό των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο με σκοπό την εκτίμηση της επικινδυνότητας στη διάβρωση. Τα τελευταία μάλιστα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τη γνώση των ειδικών με παρόμοιο τρόπο όπως και στα ασαφή συστήματα για τη λήψη του τελικού αποτελέσματος. Στη διάβρωση τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες, ως **εναλλακτικές προσεγγίσεις** σε παραδοσιακές μαθηματικές μεθόδους, κυρίως για την αναγνώριση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διεργασιών και την εκτίμηση της τρωτότητας μιας περιοχής (π.χ. Harris & Boardman, 1998; Rosa et al., 1999). Επιπλέον, και όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, τα ΤΝΔ μπορούν να εκτιμήσουν τη συνολική ποσότητα του διαβρωμένου υλικού σε μια περιοχή μελέτης, όπως έδειξαν οι Licznar & Nearing, 2003 οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που

χρησιμοποίησαν ένα απλό ΝΔ ενός επιπέδου για την ποσοτικοποίηση της διάβρωσης. Η χρήση των ΤΝΔ για την εκτίμηση της τρωτότητας μιας περιοχής ή για την ποσοτικοποίηση της διάβρωσης τα τελευταία χρόνια αυξάνεται και χρησιμοποιούνται πολλές διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα για την εκτίμηση της σε διαφορετικές κλίμακες (περιφερειακό επίπεδο, επίπεδο υδρογραφικής λεκάνης και σε υποπεριοχές της λεκάνης). Η κατάλληλη μέθοδος επιλέγεται για κάθε περιοχή μελέτης και εκτιμάται η διάβρωση (π.χ. Chen et al., 2011; Yusof et al., 2014; Gholami et al., 2018; Sarkar & Mishra, 2018; μέσω διαφόρων τύπων νευρωνικών δικτύων όπως είναι οι αυτοοργανούμενοι

Η μελέτη τόσο των υδρολογικών όσο και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών, μέσω κλασικών ή μοντέρνων μεθόδων είναι εξαιρετικά σημαντική κατά τη **μελέτη** αυτών των φαινομένων και την **δημιουργία μοντέλων και χαρτών επικινδυνότητας** (Minns & Hall 1996, Dawson & Wilby 1998, Campolo et al. 1999, Liong et al. 2000, Imrie et al. 2000, Davis 2001, Werner et al. 2005, Haruarachchi et al. 2011, Merkurjeva 2015). Η παραγωγή **τους περιλαμβάνει** διαδοχικά στάδια, όπως συγκέντρωση δεδομένων, αναγνώριση των μεταβλητών εισόδου/εξόδου, καθορισμό των κανόνων μεταξύ των μεταβλητών, ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (Gournelos et al 2004). Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας διάφορων φυσικών καταστροφών χρησιμοποιούνται παραδοσιακές μέθοδοι για το συνδυασμό των μεταβλητών μέσω Γ.Σ.Π. (Brundsen et al. 1975, Malgot & Mahr 1979, Ives & Messerli 1981, Carrara 1983, Carrara et al. 1991, Marinis et al. 1997), καθώς και **συστήματα τεχνητής νοημοσύνης**, τα οποία έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να εφαρμοστούν για την ανάλυση διαδικασιών που δε μπορούν να προσεγγιστούν αιτιοκρατικά, και χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια (Binagli et al. 1998, Szymczyk & Szymczyk 2005, Shu & Ouarda 2008, Dieu et al. 2012, Sun et al. 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιοχή Μελέτης

3.1 Γεωγραφία

Η Ελλάδα είναι το ακρωτήριο της **Βαλκανικής χερσονήσου**, και περιβάρεται από τμήματα της **Ανατολικής Μεσογείου** (Ιόνιο Πέλαγος, Αιγαίο Πέλαγος κ.α.). Η Σάμος βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του **Αιγαίου πελάγους**, και ειδικότερα στο ανατολικότερο τμήμα του Ικάριου πελάγους κοντά στα παράλια της Μικράς Ασίας μεταξύ των παραλλήλων $37^{\circ}48' \text{B}$ και $37^{\circ} 38' \text{B}$ και των μεσημβρινών $26^{\circ} 33' \text{E}$ και $27^{\circ} 04' \text{E}$. Ανατολικά της βρίσκεται η Μικρά Ασία από την οποία χωρίζεται με τον πορθμό της Μυκάλης (ή επταστάδιο πορθμό), με ελάχιστο πλάτος 1,650 μέτρα περίπου. Βόρεια βρίσκεται η χερσόνησος της Ερυθραίας, βορειοδυτικά η Χίος, δυτικά η Ικαρία, βορειοδυτικά το σύμπλεγμα των Φούρνων και νότια τα Δωδεκάνησα, από τα οποία τα πλησιέστερα είναι το Αγαθονήσι οι Αρκοί και η Πάτμος.



Σχήμα 3-1: Η θέση της Σάμου στον Ελλαδικό χώρο

Είναι το όγδοο σε μέγεθος νησί της Ελλάδας και η έκτασή της είναι 477,4 km². Το 69.6% της επιφάνειας της ανήκει σε ορεινές περιοχές, το 22%, σε ημιορεινές ενώ μόλις το 8.4%, σε πεδινές. (Vasilopoulos,2008). Τα κοντινότερα νησιά είναι, οι Φούρνοι σε απόσταση 3.5 ν.μ, η Ικαρία σε απόσταση 10 ν.μ, η Πάτμος απέχει 19 ν.μ και η Χίος 35,7 ν.μ .

Το **σχήμα του νησιού** είναι μακρόστενο με διεύθυνση του μεγάλου άξονα από Δυτικά προς Ανατολικά. Το μέγιστο μήκος του νησιού, είναι 44.3km (από το ακρωτήριο Κατάβαση μέχρι το ακρωτήριο Γάτος), ενώ το πλάτος του νησιού, από βορρά προς νότο, είναι 19km (στο κεντρικό τμήμα του νησιού). Το συνολικό μήκος της ακτογραμμής της Σάμου ανέρχεται σε 159 χιλιόμετρα.

Η Σάμος έχει 32,974 κατοίκους (απογραφή 2011) και μετά την συνένωση των δήμων Βαθέος, Καρλοβασιού, Πυθαγορείου και Μαραθοκάμου (από το πρόγραμμα Καλλικράτης) πλέον αποτελείται από έναν δήμο, το Δήμο Σάμου, με πρωτεύουσα την Σάμο και ιστορική έδρα το Βαθύ. (<http://el.wikipedia.org>). Οι μεγαλύτερες δημοτικές ενότητες από άποψη πληθυσμού είναι η δημοτική ενότητα Καρλοβασιού (6,869 κατοίκους), η δημοτική ενότητα Σάμου (6,251 κατοίκους), η δημοτική ενότητα Βαθέος (3,147 κατοίκους), η δημοτική ενότητα Μυτιληνίων (2,107 κατοίκους), η δημοτική ενότητα Μαραθοκάμπου (1,900 κατοίκους) και η δημοτική ενότητα Πυθαγορείου (1,500 κατοίκους). Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ο πληθυσμός πολλαπλασιάζεται εξαιτίας του τουρισμού.

3.2. Κλίμα

Στα βόρεια τμήματα της Ελλάδας έχουμε παρόμοιο κλίμα με αυτό της ΝΑ Ευρώπης ενώ στα νότια τμήματα της, επειδή εκτείνονται βαθιά μέσα στη Μεσόγειο **επικρατεί το εύκρατο Μεσογειακό κλίμα**, το οποίο χαρακτηρίζεται από ήπιους και υγρούς χειμώνες και σχετικά θερμά και παρατεταμένα και ξηρά καλοκαίρια. Η οροσειρά της Πίνδου χωρίζει την χώρα σε δυο κλιματικές υπο-περιοχές (Pnevmatikos& Katsoulis, 2006), με το δυτικό κομμάτι το οποίο επεκτείνεται προς το Ιόνιο Πέλαγος να δέχεται μεταξύ 357 mm και 1,323 mm ύψος ετήσιας βροχόπτωσης (έως 2,000 mm σε κάποια ορεινά τμήματα; Fotiadi et al., 1999), ενώ το ανατολικό κομμάτι (προς το Αιγαίο Πέλαγος) χαρακτηρίζεται από ξηρότερο κλίμα (324 έως 777 mm/ έτος).

Η Σάμος βρίσκεται στα νοτιοανατολικά της χώρας, περιβρέχεται από το Αιγαίο και χαρακτηρίζεται από **εύκρατο Μεσογειακό κλίμα**. Η **έντονη μορφολογία** του νησιού έχει ως αποτέλεσμα σε πολύ κοντινή απόσταση να έχουμε την παρουσία ενός αξιοσημείωτου εύρους μικροκλιμάτων, δεδομένου του μεγέθους της. Οι ορεινοί όγκοι δέχονται σημαντικό

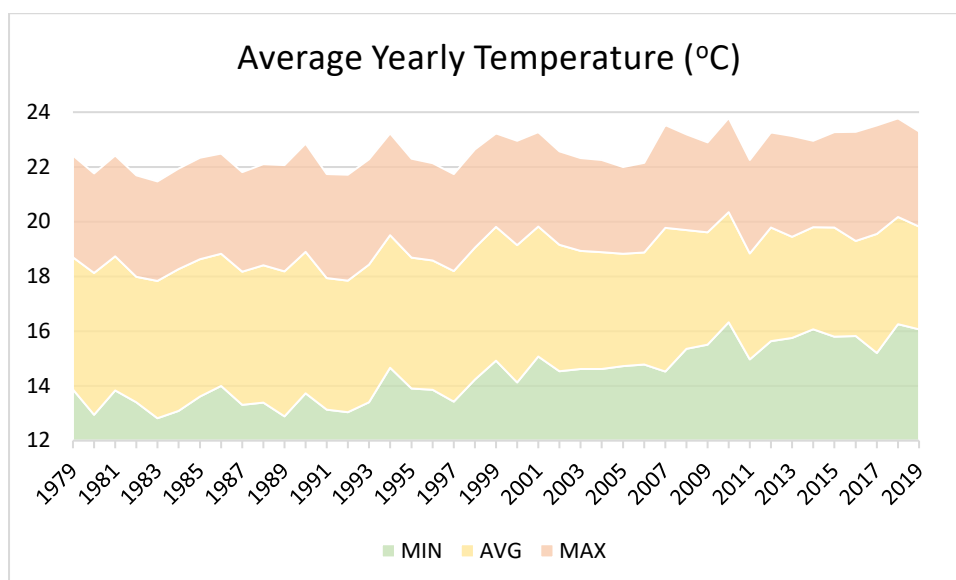
όγκο κατακρημνισμάτων κατά την υγρή περίοδο, ενώ και οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές. Τα πεδινά τμήματα διακρίνονται σε βόρεια και νότια. Εξαιτίας της διεύθυνσης των ανέμων (επικρατούν οι βοριάδες) και της μορφολογίας το βόρειο τμήμα έχει γενικά ηπιότερο κλίμα (πιο θερμό το χειμώνα με αρκετές βροχοπτώσεις αλλά και πιο δροσερό το καλοκαίρι) σε σχέση με το νοτιότερο.

Στο νησί λειτουργούν μετεωρολογικοί σταθμοί, από διαφορετικούς οργανισμούς και σε διαφορετικές περιοχές (στο Καρλόβασι σταθμός του Αστεροσκοπείου, στο Αεροδρόμιο σταθμός της Ε.Μ.Υ., καθώς και ένα δίκτυο σταθμών από τη διεύθυνση γεωργίας Σάμου), οι περισσότεροι εκ των οποίων όμως οι περισσότεροι είτε δεν παρέχουν συνεχή δεδομένα είτε λειτουργούν για μικρό σχετικά χρονικό διάστημα. Για τον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων του νησιού χρησιμοποιούνται δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό της Ε.Μ.Υ. στη Σάμο, ο οποίος παρέχει συνεχόμενα δεδομένα για μια πολύ μεγάλη περίοδο (ξεπερνάει τα 40 έτη). Ο σταθμός αυτός είναι εγκατεστημένος στο αεροδρόμιο της Σάμου, στη Νοτιοανατολική πλευρά του νησιού (κοντά στο Πυθαγόρειο), σε γεωγραφικό πλάτος 37°42', γεωγραφικό μήκος 26°55' και σε υψόμετρο 11 μέτρων.

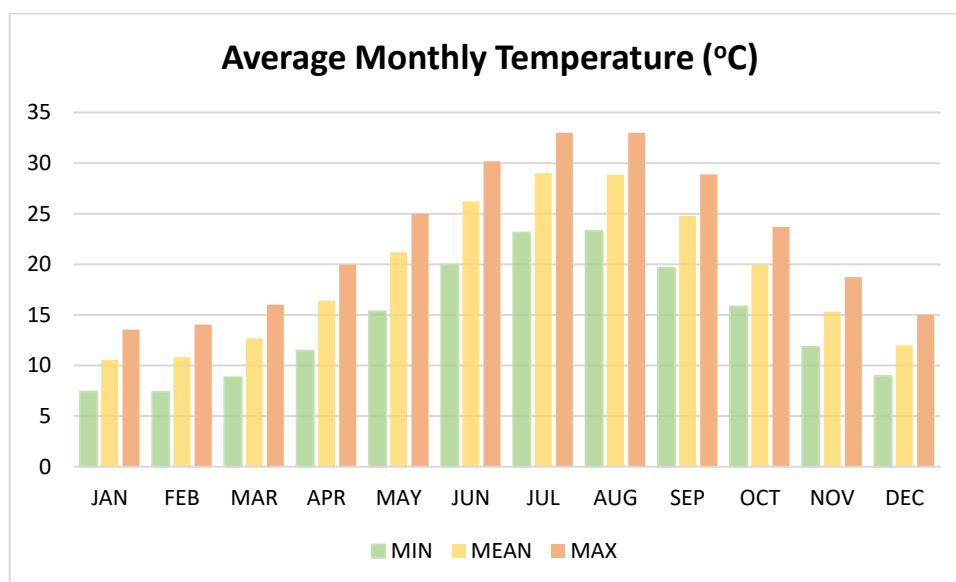
3.2.1 Θερμοκρασία

Για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου έχει παρατηρηθεί από διάφορους ερευνητές μια **τάση θέρμανσης** από τα μέσα της δεκαετίας τους 1980 και μετά, τάση η οποία αναμένεται να αυξηθεί τον 21ο αιώνα (π.χ. Bethoux et al., 1990; Kirtman et al., 2013). Από την ΕΜΥ συγκεντρώθηκαν τα στοιχεία για τα έτη 1979 έως και 2019. Η μέση θερμοκρασία για την περιοχή όπως μετρήθηκε στο συγκεκριμένο σταθμό μέτρησης της Ε.Μ.Υ για τα έτη 1979-2019 είναι 18,98°C. Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 3-10 έχουμε μια βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας, και την δεκαετία 2010-2019 η μέση θερμοκρασία ήταν 19.68°C ενώ τη δεκαετία 1980-1989 ήταν 18.37 °C.

Στη συγκεκριμένη περιοχή η θερμοκρασία διατηρείται σε ψηλά επίπεδα από τον Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο (Σχήμα 3-11), ενώ την ίδια περίοδο οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται τους μήνες Ιούλιο (29 °C) και Αύγουστο (28.9 °C) μέγιστη τιμή τον μήνα Ιούλιο με μέση μέγιστη θερμοκρασία τους 29,0 °C. Οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται κατά τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο με τιμή 10.6 °C και 10.8 °C αντίστοιχα.



Σχήμα 3-2: Μέση Ετήσια θερμοκρασία για τα έτη 1979-2019 (πηγή πρωτογενών δεδομένων: E.M.Y.)

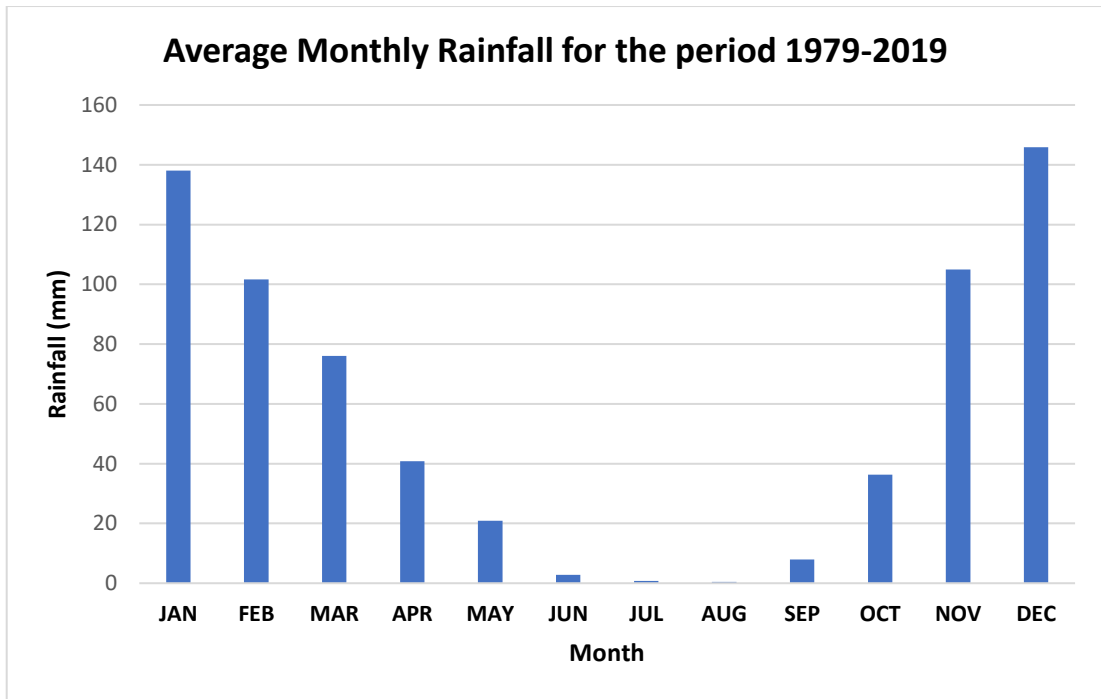


Σχήμα 3-3: Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία (πηγή δεδομένων : E.M.Y)

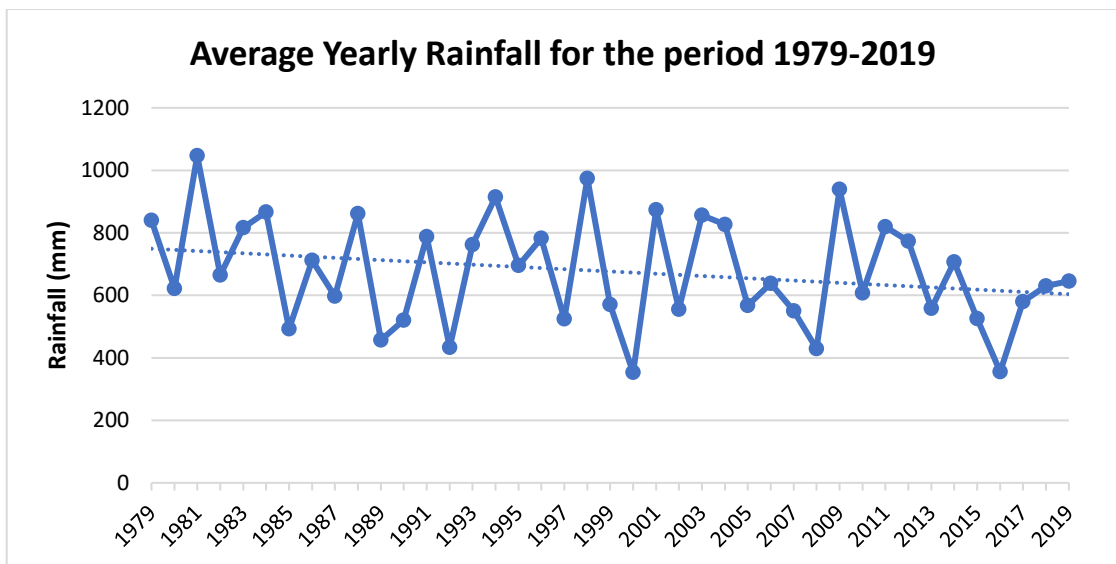
3.2.2 Βροχόπτωση

Για την περίοδο 1979-2019 τα στοιχεία για την βροχόπτωση από τον μετεωρολογικό σταθμό της Σάμου δείχνουν ότι μέγιστες τιμές βροχόπτωσης έχουμε τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 138 mm και 145.9 mm αντίστοιχα, ενώ ελάχιστες τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο με μέσο μηνιαίο ύψος

βροχής 0.7 και 0.4 mm αντίστοιχα. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 676.51 mm/έτος, ενώ φαίνεται ότι υπάρχει μια **τάση μείωσης** του με το χρόνο (Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-4: Μέση μηνιαία βροχόπτωση για τα έτη 1979-2019 (πηγή πρωτογενών δεδομένων: E.M.Y.)



Σχήμα 3-5: Ετήσιο ύψος βροχής για την περίοδο 1979-2019 (πηγή πρωτογενών δεδομένων: E.M.Y.)

3.2.3 Άλλες κλιματικές παράμετροι

Η περιοχή μελέτης επηρεάζεται από ανέμους, κυρίως βοριάδες. Οι επικρατούντες άνεμοι είναι οι **Βόρειοι** με ετήσια συχνότητα 42% και ακολουθούν οι Νότιοι με συχνότητα 10% ,ενώ νηνεμία επικρατεί στο 22% του έτους (σύμφωνα με την Ε.Μ.Υ). Η **μέγιστη ένταση** των ανέμων είναι 10 Beaufort ενώ η μέση ένταση για όλο το έτος είναι 3 Beaufort.

Η μέση σχετική υγρασία είναι 60,5%. Ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές με μέση σχετική υγρασία 69,2% και 71,8% αντίστοιχα, ενώ οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο με σχετική υγρασία 43,7% και 45,1% αντίστοιχα.

3.3. Γεωλογία

Η γεωλογία της Σάμου έχει γίνει αντικείμενο μελέτης από τα μέσα του 19ου αιώνα. Οι Spratt (1847), Nasse (1875) και Stefani et al ήταν οι πρώτοι που έδωσαν κάποιες πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία της περιοχής. Ο Schlosser (1904) μελέτησε τα παλαιοντολογικά ευρήματα της Σάμου. Ο Butz (1912) μελέτησε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη γεωλογία της περιοχής και πιο συγκεκριμένα τα ηφαιστειακά πετρώματα της νήσου. Ο Schneider (1914) ακολούθησε εξετάζοντας κυρίως τους κρυσταλλικούς σχιστολίθους. Ο Karageorgiou (1947) εξέτασε τα ηφαιστειακά πετρώματα στην περιοχή του Πλατάνου, ο Phillipson (1959) μελέτησε την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, ενώ ο Guernet (1972) συσχέτισε τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σάμου με τα αντίστοιχα της Νότιας Εύβοιας και Αττικής.

Ο Theodoropoulos (1979, a,b) συνέταξε **γεωλογικό χάρτη της νήσου κλίμακας 1:50.000**, μελέτησε το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Σάμου και προσδιόρισε την ηλικία των ηφαιστειακών πετρωμάτων, ενώ ο Papanikolaou (1979) μελέτησε τις φάσεις παραμόρφωσης του μεταμορφωμένου υποβάθρου και διέκρινε τις **4 ενότητες** των οποίων προσδιόρισε τη θέση και την λιθολογία: Κερκετέα, Αμπέλου, Βουρλιωτών και Καλλιθέας. Ο Okrusch et al (1984) ασχολήθηκε με τα **μεταμορφωμένα πετρώματα** της Σάμου. Οι Zagourogliou & Papazeti (1980) και Zagourogliou & Stamatakis (1984) ασχολήθηκαν με εμφανίσεις βιομηχανικών ορυκτών στο νησί. Οι Stamatakis et al (1989) και Owen et al (2011) μελέτησαν λιμναίες φάσεις που βρίσκονται στις **νεογενείς λεκάνες** του νησιού.

3.3.1 Κατηγορίες Πετρωμάτων

Το νησί της Σάμου, αποτελείται κυρίως από μάρμαρα, δολομίτες, κερατόλιθους, χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα καθώς και υπερμαφικά πυριγενή πετρώματα. (Ring et al 2007).

Συναντάμε πετρώματα από όλες τις κατηγορίες πετρωμάτων τόσο ιζηματογενή, πυριγενή όσο και μεταμορφωμένα.

3.3.1.1. Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα καταλαμβάνουν το 30% περίπου της επιφάνειας της Σάμου και βάσει την ηλικία τους μπορούν να χωρισθούν σε:

- **Μεσοζωικοί σχηματισμοί.** Είναι οι ασβεστόλιθοι ‘Καλλιθέας’ (Theodoropoulos, 1979). Στη βάση τους είναι λευκοί ή ροδόχροιοι, άστρωτοι,

λεπτοκρυσταλλικοί και γενικά πολύ τεκτονισμένοι. Στους ανώτερους ορίζοντες μεταπίπτουν σε δολομιτικούς βιτουμενιούχους τεφρούς έως μελανότεφρους ή αγκεριτωμένους, μεσο-παχυστρωματώδεις, έντονα καρστικοποιημένους (Ανωτριάδικη μέχρι Ιουρασική ηλικία).

• **Νεογενείς σχηματισμοί.** Οι νεογενείς σχηματισμοί χωρίζονται σε τρεις ενότητες (Theodoropoulos, 1979):

○ **Κατώτερη σειρά:** Αποτελείται από ασβεστόλιθους τραβερτινοειδείς, λιμναίας φάσης, και από μάργες λεπτοστρωματώδεις μέσα στις οποίες παρεμβάλλονται άργιλοι και λατυποπαγή. Το πάχος της σειράς αυτής φτάνει τα 650m και είναι Μειοκαινικής ηλικίας.

○ **Ενδιάμεση σειρά:** Ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις λατυποπαγών, κροκαλοπαγών, πηλών, αργίλων, τόφφων σε εναλλαγές, καθώς και ψαμίτες, μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Έχει πάχος 400 μέτρα και ηλικία Μειοκαινική, ενώ εδώ βρίσκουμε την γνωστή Πικερμική Πανίδα (Solunias, 1981).

○ **Ανώτερη σειρά:** Τραβερτινοειδείς και μαργαϊκοί σχιστόλιθοι λιμναίας φάσης με συχνές παρεμβολές φακών από μάργες, πηλούς και τοφφίτες. Έχει πάχος περί τα 250m και Πλειοκαινική ηλικία.

• **Τεταρτογενείς σχηματισμοί.** Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί περιλαμβάνουν τις χερσαίες αποθέσεις (πλευρικά κορήματα, αλλουβιακές προσχώσεις των πεδινών περιοχών), τις αποθέσεις των κοιτών και των αναβαθμίδων και τις παράκτιες άμμους και εμφανίζονται κυρίως κοντά στο υδρογραφικό δίκτυο.

3.3.1.2. Μεταμορφωμένα πετρώματα

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα (Theodoropoulos, 1979) διαχωρίζονται βάση της στρωματογραφίας τους σε τρεις σειρές, οι οποίες είναι:

• Η **κατώτερη σειρά** που περιλαμβάνει:

○ Τα **μάρμαρα του Κερκετέα** (δολομιτικά, λευκά, μεσοπλακώδη έως παχυπλακώδη και έντονα διερρηγμένα) που εντοπίζονται στο δυτικό τμήμα της Σάμου.

○ Οι **σχιστόλιθοι Μαραθόκαμπου-Κοσμαδαίων** (μοσχοβιτικοί, χαλαζιακοί, χλωριτικοί και ασβεστιτικοί, με παρεμβολές και ενστρώσεις πράσινων μαρμάρων και σιπολινών).

• Η **ενδιάμεση σειρά** που αποτελείται από:

○ Τους **σχιστόλιθους Αμπέλου**, (μαρμαρυγιακοί, μοσχοβιτικοί, χαλαζιακοί, χλωριτικοί, επιδοτιτικοί - μοσχοβιτικοί κ.α.), με παρεμβολές μάρμαρων, ηφαιστειακών

πετρωμάτων καθώς και οφιολίθων (σερπεντινίτες - περιδοτίτες) και καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του κεντρικού τμήματος της Σάμου.

- Τα **μάρμαρα Βουρλιωτών - Συρράχου**, που εντοπίζονται σε περιοχές του κεντρικού και ανατολικού τμήματος της νήσου, σε συμφωνία με τους σχιστόλιθους της Αμπέλου. Μεταξύ των μαρμάρων του κεντρικού τμήματος του νησιού και εκείνων του ανατολικού παρεμβάλλονται τα ιζήματα της Νεογενούς λεκάνης των Μυτιληνίων.

- **Ανώτερη σειρά** η οποία αποτελείται από τους σχιστόλιθους Κοτσικιά - Ψιλής Αμμου, (κυρίως χλωριτικοί, μοσχοβιτικοί, σερικιτικοί, χαλαζιακοί, ασβεστιτικοί) με παρεμβολές δολομιτικών μαρμάρων και ενστρώσεις μοσχοβιτικών κυρίως σχιστολίθων.

3.3.1.3. Πυριγενή πετρώματα

Κατέχουν περίπου το 5% της επιφάνειας του νησιού και διακρίνονται σε:

- **Ηφαιστειακά πετρώματα.** Βρίσκονται κυρίως στο βόρειο-κεντρικό τμήμα της Σάμου, στην περιοχή του Πύργου καθώς και στις παρυφές των νεογενών λεκανών. Αποτελούνται κυρίως από βασάλτες, ρυόλιθους, τραχίτες, τραχιανδεσίτες και δακίτες και είναι υπεύθυνα για τη γένεση μίας μεταλλοφορίας μικτών θειούχων μεταλλευμάτων (κυρίως γαληνίτη). Η ηλικία τους είναι **Μειοκαινική**, καθώς παρεμβάλλονται στα νεογενή ιζήματα μειοκαινικής ηλικίας (Theodoropoulos, 1979).

- **Βασικά εκρηξιγενή πετρώματα.** Τα βασικά εκρηξιγενή πετρώματα συναντώνται κυρίως στο δυτικό τμήμα του νησιού και πιο συγκεκριμένα, πάνω από τα μάρμαρα του Κερκετέα καθώς και στην περιοχή της Καλλιθέας. Πρόκειται για υποθαλάσσιες εκχύσεις βασικής σύστασης (σπιλίτες - διαβάσες) με ενστρώσεις ασβεστολίθων, **ηλικίας Μ.-Αν. Τριαδικού** (βρέθηκαν οστρακόδη, γαστερόποδα, ακτινόζωα , Diplopoda sp.), ηλικία που φαίνεται να έχουν και τα εκρηξιγενή πετρώματα.

- **Υπερβασικά πετρώματα.** Περιλαμβάνουν περιδοτίτες με μακροσκοπικά διακριτούς πυρόξενους, που εντοπίζονται μέσα στους σχιστόλιθους της σειράς της Αμπέλου, καθώς και στα κλαστικά ιζήματα της επωθημένης ενότητας.

- **Φλεβικά πυριγενή πετρώματα.** Βρίσκονται στη βορειοδυτική ακτή της νήσου στην περιοχή του χωριού Καλλιθέα. Πρόκειται για ένα σύστημα φλεβών, με πάχος από λίγα cm μέχρι 2m, που αλληλοτέμνονται και διασχίζουν τους ανώτερους ορίζοντες των μαρμάρων του Κερκετέα και τους υπερκείμενους σχιστόλιθους του Μαραθόκαμπου - Κοσμαδαίων. Είναι κυρίως φλέβες γρανιτικής, γρανοδιοριτικής και διοριτικής σύστασης ως και απλίτες. Τα παραπάνω είναι πιθανόν να αποτελούν αποφύσεις ενός μη ορατού πλουτωνίτη (Theodoropoulos, 1979). Σύμφωνα με τους Mezger et al (1985) πρόκειται για μια

Μειοκαινική γρανοδιοριτική διείσδυση που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου

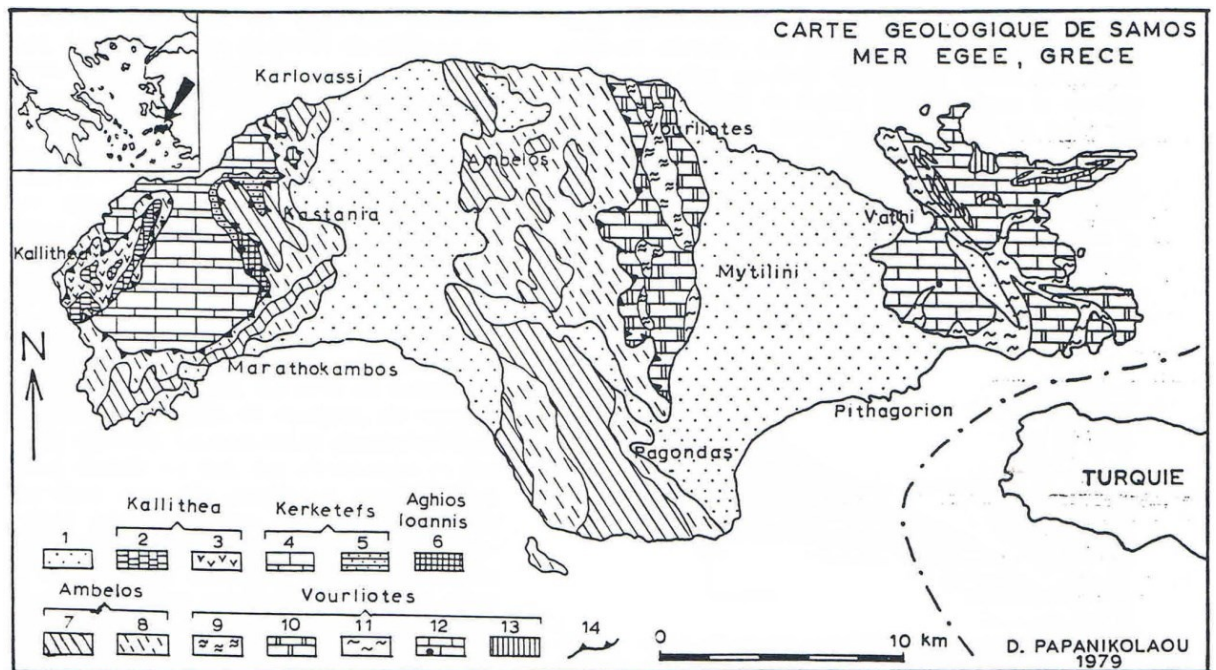
3.3.2 Η δομή της Σάμου

Το νησί αποτελείται από **τέσσερις τεκτονικές ενότητες μεταμορφωμένων πετρωμάτων και ένα νεότερο επωθημένο κάλυμμα από μη μεταμορφωμένα πετρώματα** (Paranikolaou, 1979). Τα μεταμορφωμένα πετρώματα του νησιού αποτελούνται από μάρμαρα , πυριτικά μάρμαρα, σιπολίτες, δολομίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθους φυλλίτες και μεταμορφωμένα βασικά και υπερβασικά πετρώματα (Theodoropoulos 1979, Paranikolaou 1979, Okrush 1984, Mezger and Okrusch 1985). Το αμεταμόρφωτο κάλυμμα του νησιού βρίσκεται στα δυτικά του και αποτελείται από σπιλίτες, διαβάσες, περιδοτίτες, κλαστικά ιζήματα, πυριτόλιθους και ασβεστόλιθους, ενώ μια αξιόλογη εμφάνιση όξινων φλεβικών πετρωμάτων φαίνεται ότι έχει διεισδύσει πριν από την επώθηση των μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων στο δυτικό άκρο του νησιού (Theodoropoulos 1979, Paranikolaou 1979, Mezger et al 1985, Mezger and Okrusch 1985). Ανάμεσα στους ορεινούς όγκους, με αμεταμόρφωτα ιζήματα του Μειοκαίνου ,τα οποία επικάθονται ασύμφωνα πάνω στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο, στα οποία βρίσκουμε επίσης κάποιες διεισδύσεις ηφαιστειακών.

Στον Γεωλογικό χάρτη της Σάμου, ο Theodoropoulos (1979) διέκρινε μια αλλόχθονη ενότητα από μη μεταμορφωμένα πετρώματα ηλικίας Μ. Τριαδικό-Αν. Ιουρασικό, ενώ τα μεταμορφωμένα πετρώματα (αυτόχθονο) τα κατηγοριοποίησε σαν μια συνεχή σειρά. Ο Paranikolaou (1979) διέκρινε τα αυτόχθονα μεταμορφωμένα πετρώματα σε τέσσερις τεκτονικές ενότητες, οι οποίες βρίσκονται κάτω από την αμεταμόρφωτη ενότητα της Καλλιθέας. Οι τέσσερις μεταμορφωμένες ενότητες είναι:

- **Ενότητα Κερκετεα**
- **Ενότητα Αγίου Ιωάννη**
- **Ενότητα Βουρλιωτών**
- **Ενότητα Αμπέλου**

Από δυτικά προς ανατολικά συναντάμε την ενότητα Καλλιθέας, Κερκετέα, Άγιου Ιωάννη, Αμπέλου και Βουρλιωτών όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3-5**



Σχήμα 3-6: Γεωλογικός χάρτης της Σάμου (Ραπανικόλαου, 1979)

1: αποθέσεις του Νεογενούς, 2: ασβεστόλιθοι Αν. Τριαδικού - Ιουρασικού, 3: σπιλίτες, διαβάσες, ραδιολαρίτες, ψαμμίτες και ασβεστόλιθοι του Μέσου - Άνω Τριαδικού, 4: μάρμαρα Κερκετέα, 5: φυλλίτες Κερκετέα, 6: μεταμορφωμένα βασικά εκρηξιγενή Αγ. Ιωάννη, 7: μάρμαρα Αμπέλου, 8: Σχιστόλιθοι Αμπέλου, 9: κατώτεροι σχιστόλιθοι Βουρλιωτών, 10: κατώτερα μάρμαρα Βουρλιωτών, 11: ενδιάμεσοι σχιστόλιθοι Βουρλιωτών, 12: ανώτερα μάρμαρα Βουρλιωτών, 13: ανώτεροι σχιστόλιθοι Βουρλιωτών, 14: επόθηση. (Ραπανικόλαου, 1979).

3.3.2.1 Μεταμορφωμένες ενότητες

A. Ενότητα Κερκετέα

Η ενότητα Κερκετέα αποτελεί την κατώτερη σειρά πετρωμάτων στη Σάμο και απαντάται στο δυτικό τμήμα της νήσου με τη μορφή τεκτονικού παραθύρου (Παπανικολαου,1986). Η ενότητα του Κερκετέα είναι ομόλογη με τις μεταμορφωμένες σειρές της γεωτεκτονικής ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης(Ολύμπου, Αλμυροποτάμου) καθώς και με τη λεγόμενη μάζα του Μεντερές στην Τουρκία (Παπανικολάου,1986), χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές παραγενέσεις πρασινοσχιστολιθικής φάση. Η μεταμόρφωση πολύ πιθανό να έλαβε χώρα πριν 40. Εκ. χρόνια. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η θερμοκρασία μεταμόρφωσης μειώνεται όσο μετατοπιζόμαστε προς τα ανατολικά .

Αποτελείται από μάρμαρα, και φυλλίτες (Papanikolaou, 1979). Τα μάρμαρα είναι συχνά δολομιτικά - λευκά με κάποιες γκρι-μπλε ενδιαστρώσεις. Το πάχος τους ξεπερνάει τα 1000 μέτρα, κάτι που είναι εμφανές καθώς συνιστούν σχεδόν εξολοκλήρου το όρος Κερκετέας.

Στην κορυφή τους βρίσκουμε ένα στρώμα πάχους 50 μέτρων κιτρινωπού φυλλίτη με μικρές εμφανίσεις ψαμιτών. Η ορυκτολογική σύσταση αυτού του στρώματος καθώς και η γενικότερη μορφή του, επιτρέπει να το θεωρήσουμε σαν ένα μεταφλύσχη. (Papanikolaou, 1979).

B. Ενότητα Αγ. Ιωάννη

Αυτή η ενότητα συναντάται σαν μια μεγάλη εμφάνιση εκρηξιγενών μεταξύ των μαρμάρων του Κερκετέα και της ενότητας Αμπέλου. Εκτείνεται από τις ΝΑ παρυφές του Κερκετέα μέχρι και ΝΔ της Καστανιάς. Με πάχος πάνω από 200 μέτρα αποτελείται από μεταμορφωμένα βασικά εκρηξιγενή πετρώματα (σπιλίτες, διαβάσες), χρώματος πράσινου-κοκκινοπράσινου, και παρουσιάζει μια εμφανή διαφορά στο βαθμό της μεταμόρφωσης σε σχέση με άλλες ενότητες ,και ειδικότερα με τους φυλλίτες του Κερκετέα. Υπάρχουν εμφανίσεις κρυστάλλων γλαυκοφανή (χαμηλή θερμοκρασία, υψηλή πίεση) που προκύπτουν από μεταμόρφωση βιοτίτη (φτωχό σε TiO_2 και πλούσιο σε Fe^{+++}), παρόλα αυτά όμως έχουμε εμφανίσεις και των αρχικών ορυκτών (άστριοι, πυροξενοι, μοσχοβίτης, βιοτίτης και χαλαζίας). (Papanikolaou, 1979). Μέσα στα εκρηξιγενή εμφανίζονται μικρά στρώματα ασβεστολίθων, όπου έχουν βρεθεί απολιθώματα Μ.Αν-Τριαδικού (Theodoropoulos,1979).

Γ. Ενότητα Αμπέλου

Αυτή η ενότητα εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα του νησιού καθώς και στο Δυτικό τμήμα προς τις παρυφές του Κερκετέα. Η ενότητα της Αμπέλου είναι ομόλογη με την ενότητα Βόρειων Κυκλάδων και τις ομόλογες της (Παπανικολάου, 1986). Χαρακτηρίζεται από έντονη μεταμόρφωση (υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι στις προηγούμενες ενότητες). Η σειρά αποτελείται από εναλλαγή στρωμάτων μαρμάρων, σιπολινών και σχιστόλιθων. Η στρωματογραφική τους σειρά είναι δύσκολο να καθοριστεί λόγω των εναλλαγών και επαναλήψεων των στρωμάτων, λόγω ισοκλινών πτυχώσεων.

Η γεωτεκτονική αυτή ενότητα αποτελείται από: (α) Μάρμαρα Παρυφών Κερκετέα, (β) Σχιστόλιθοι Μαραθοκάμπου- Κοσμαδαίων, (γ) Σιπολίνες - Σιπολινομάρμαρα παρυφών Κερκετέα, (δ) Μάρμαρα Αμπέλου, (ε) Σχιστόλιθοι Αμπέλου (Theodoropoulos, 1979).

Οι εμφανίσεις μαρμάρων είναι πλούσιες σε πυριτόλιθους, με κάποιες πράσινες και μωβ εμφανίσεις οριζόντων, σε εναλλαγή με τα συνήθη γκρι ή λευκά στρώματα. (Papanikolaou, 1979). Είναι έντονα τεκτονισμένα και πτυχωμένα. Τα μάρμαρα Αμπέλου είναι μεσοστρωματώδη, μερικώς καρστικοποιημένα, και κάποιες φορές δολομιτικά. Στη περιοχή των Σπαθαραίων όπου το πάχος τους υπερβαίνει τα 300 μέτρα, γίνονται μέσο-παχυστρωματώδεις. Τα μάρμαρα παρυφών Κερκετέα στα δυτικά, έχουν πάχος περίπου 200 μέτρα (Αγία Κυριακή-Καρλόβασι) και είναι λεπτο-μεσοστρωματώδη.

Στους πρόποδες του Κερκετέα, συναντάμε σιπολίνες-σιπολινομάρμαρα, με τη μορφή ενδιαστρώσεων μέσα στους σχιστόλιθους Μαραθοκάμπου-Κοσμαδαίων, με χρώμα γκρι-καφέ και κάποιες φορές πρασινωπό. Νότια από το χωριό Κοσμαδαίοι υπάρχουν μικρές εμφανίσεις Λειμωνίτη πάχους μισού μέτρου. (Theodoropoulos, 1979)

Οι σχιστόλιθοι αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του κεντρικού τμήματος της Σάμου. Η ορυκτολογική σύσταση τους ποικίλει. Υπάρχουν γενεσιακοί σχιστόλιθοι (ασβεστίτικοι και μοσχοβίτικοί), χαλαζιακοί μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι, αμφιβολιτικοί επιδοτιτικοί σχιστόλιθοι, καθώς και σχιστόλιθοι (επίδοτιτικοί, μοσχοβίτικοί και γλαυκοφανιτικοί). Σε πολλά σημεία παρατηρούνται συγκεντρώσεις μαγγανίου, στη βάση της στρωματογραφικής σειράς της Αμπέλου τονίζοντας τη διαφορά ανάμεσα στα μάρμαρα της Αμπέλου και τους φυλλίτες της ενότητας του Κερκετέα (Papanikolaou, 1979). Οι σχιστόλιθοι Αμπέλου έχουν πάχος που ξεπερνάει τα 2500 μέτρα ενώ εκτός από τα ορυκτά που αναφέρθηκαν, υπάρχουν εμφανίσεις υπερμαφικών ορυκτών μέσα σε αυτούς. Τα βασικά εκρηξιγενή πετρώματα που περιγράφονται από τους Butz (1912) και Guernet (1972) βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης της ενότητας, η οποία έχει χαρτογραφηθεί με λεπτομέρεια. Οι Σχιστόλιθοι Μαραθοκάμπου- Κοσμαδαίων, βρίσκονται με ασυνεχή επαφή επάνω στα μάρμαρα Κερκετέα, και είναι κυρίως μοσχοβιτικοί, χαλαζιακοί, χλωριτικοί και ασβεστίτικοί, ενώ

εναλλάσσονται συνεχώς με τοπικές εμφανίσεις πρασινιτών, μαρμάρων και σιπολινών. Το πάχος τους είναι περίπου 600 μέτρα στις δυτικότερες εμφανίσεις, ενώ στην περιοχή του Μαραθοκάμπου φτάνει τα 1500 μέτρα. (Theodoropoulos, 1979)

Δ. Ενότητα Βουρλιωτών

Η ενότητα Βουρλιωτών βρίσκεται στο ανατολικό μέρος του νησιού, και είναι υπερκείμενη της ενότητας Αμπέλου.

Η ενότητα Βουρλιωτών αποτελείται από 2 ορίζοντες μαρμάρων (μάρμαρα Βουρλιωτών-Συρράχου και μάρμαρα Ζωοδόχου Πηγής) και τρεις ορίζοντες σχιστολίθων:

- **Εμφανίσεις μαρμάρων.** Στη περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής (ανατολικά) τα ανώτερα μάρμαρα (μάρμαρα Ζωοδόχου Πηγής) είναι πτυχωμένα με ισοκλινείς πτυχές (Papanikolaou, 1979), συνήθως είναι μεσοπλακάδεις και στα ανώτερα τους τμήματα λεπτοπλακάδεις(μεταβαίνουν και σε σιπολινομάρμαρα), χρώματος ανοιχτό γκρι-γκριμάυρο, κάποιες φορές με πυριτιόλιθους. (Theodoropoulos, 1979). Σε συγκλινικές μορφές βρίσκουμε σχιστόλιθους και τους ανώτερους χαλαζίτες (μεταφλύσχης). (Papanikolaou, 1979). Υπάρχουν κοιτάσματα σμύριδας τα οποία βρίσκονται στη βάση τους. Το μέγιστο πάχος των μαρμάρων φτάνει τα 500 μέτρα.

Τα κατώτερα μάρμαρα Βουρλιωτών - Συρράχου συνιστούν το ανατολικό άκρο του ορεινού όγκου που βρίσκεται στο κέντρο του νησιού (όρος Άμπελος) καθώς και το ΝΑ μέρος του νησιού όπου βρίσκεται το τεκτονικό κέρασ "Σύρραχος". Το πάχος τους είναι 1000 μέτρα στο κεντρικό τμήμα και 400 μέτρα στην ΝΑ περιοχή. Το χρώμα τους συνήθως είναι λευκό-γκρι, είναι μέσο-παχύστρωματώδη, πολύ συχνά δολομιτωμένα μερικώς καρστικοποιημένα και μικροπτυχωμένα. Ακριβής στρωματογραφική συσχέτιση ανάμεσα στα μάρμαρα των δυο περιοχών δε μπορεί να γίνει καθώς παρεμβάλλεται μια νεογενής λεκάνη, αλλά θεωρείται ότι τα μάρμαρα Συρράχου είναι τα ανώτερα μέλη της σειράς μαρμάρων Βουρλιωτών-Συρράχου.

- **Εμφανίσεις σχιστολίθων.** Οι ανώτεροι σχιστόλιθοι εμφανίζονται στην περιοχή της Ζωοδόχου Πηγής (ΒΑ), στο γεωλογικό χάρτη αναφέρονται σαν ενστρώσεις στα μάρμαρα Ζωοδόχου Πηγής. Οι σχιστόλιθοι Κότσικα-Ψιλής Άμμου, είναι οι ενδιάμεσοι σχιστόλιθοι (ανάμεσα στα ανώτερα και κατώτερα μάρμαρα) και είναι η σημαντικότερη εμφάνιση σχιστολίθων της ενότητας. Έχουν χρώμα κοκκινωπο με χαλαζίτες μεγάλου μεγέθους πλούσιους σε ασβεστιτικά, καθώς και κιτρινωπο με βολαστονίτη και αμβιβολίτη (Papanikolaou, 1979). Συναντάμε ενστρώσεις μαρμάρων, σιπολινών και ανγκεριτών στην

περιοχή "Κοτσικιά" που έχουν πάχος 10 μέτρα. Το πάχος των σχιστολίθων φτάνει τα 400 μέτρα στην περιοχή της Ψιλής άμμου (Theodoropoulos, 1979).

Οι κατώτεροι σχιστόλιθοι είναι πολύ πλούσιοι σε χλωριτικά ορυκτά, βρίσκονται κάτω από τα μάρμαρα Βουρλιωτών-Συρράχου και εμφανίζονται με τη μορφή ενστρώσεων στα μάρμαρα Βουρλιωτών-Συρράχου στο Νοτιοανατολικό άκρο του νησιού.

Η επιφάνεια ολίσθησης της ενότητας Βουρλιωτών πάνω στην ενότητα Αμπέλου παρατηρείται κατά μήκος της κοιλάδας του Αγ. Κωνσταντίνου μέχρι και την κορυφή του όρους Άμπελος όπου τα κατώτερα μάρμαρα της ενότητας Βουρλιωτών βρίσκονται πάνω από τους σχιστόλιθους της Αμπέλου. Στη περιοχή του Αγ. Γεωργίου, μεταξύ των κατώτερων μαρμάρων Βουρλιωτών και των ανώτερων σχιστολίθων Αμπέλου παρατηρήθηκε ένα στρώμα πάχους 30 μέτρων, πράσινου χρώματος. Αυτά τα πετρώματα δε δείχνουν κανένα σημάδι μεταμόρφωσης, και η σχιστολιθική τους όψη φαίνεται να προέρχεται από τεκτονισμό. Αποτελούνται από πυρόξενους, αστρίους, χλωρίτη και ασβεστίτη. Η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίσης εμφανής στην άλλη πλευρά του νησιού στην περιοχή των Κοσμαδαραιών, όπου τα κατώτερα μάρμαρα της ενότητας Βουρλιωτών είναι έντονα τεκτονισμένα και έχουμε εμφάνιση λατυποπαγών.

3.3.2.2 Αμεταμόρφωτη ενότητα

Στο δυτικό μέρος του νησιού εμφανίζεται μία αμεταμόρφωτη ενότητα, η οποία ονομάζεται ενότητα Καλλιθέας, η οποία αποτελείται από δυο μεγάλα στρώματα:

- **Το κατώτερο στρώμα** ,έχει πάχος 400 μέτρα και αποτελείται κυρίως από βασικά εκρηξιγενή πετρώματα. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται μεγάλες μάζες σπιλίτη και διαβάση, μέσα στον οποίο βρίσκουμε ραδιολαρίτες, κάποια στρώματα ammonitico rosso , κάποιες εμφανίσεις ψαμμίτη και τέλος μια μικρή μάζα περιδοτίτη. Αυτή η κατώτερη σειρά χρονολογείται στο Μέσο-Ανώτερο Κρητιδικό (Theodoropoulos 1979), και πιο συγκεκριμένα στο Αν. Ανίσιο-Κατ. Λαδίνιο (Paranikolaou,1979).

- **Ο ανώτερος σχηματισμός** αποτελείται από συμπαγείς ασβεστόλιθους, ή ωολιθικούς ασβεστόλιθους , και κάποιες φορές δολομιτικούς πάχους περίπου 100-150 μέτρων . Η παρουσία Megalodon (κοντά στο χωριό Καλλιθέα) και Valvulinidae υποδεικνύει μια ηλικία Αν. Τριαδικό- Ιουρασικό. Είναι χρώματος λευκό - ροζ χωρίς εμφανή στρώση, και έντονα τεκτονισμένοι.

Η ενότητα ολισθαίνει είτε πάνω στην ενότητα Κερκετέα είτε πάνω στην ενότητα Αμπέλου και δεν είναι σαφής η επιφάνεια ολίσθησης.

3.3.3.Νεογενείς λεκάνες

Στο νησί της Σάμου υπάρχουν **δύο νεογενείς λεκάνες**. Οι δυο λεκάνες έχουν διεύθυνση B-N (Σχήμα 3-6) και οριοθετούνται από τους ορεινούς όγκους Κέρκετέα, Άμπελος και Καμάρας – Ζωοδόχου Πηγής. Οι λεκάνες αυτές βρίσκονται εκατέρωθεν του ορεινού όγκου της Αμπέλου: στα δυτικά της είναι η **λεκάνη του Καρλοβασίου (ή αλλιώς Καρλοβασίου – Μαραθοκάμπου)** και στα ανατολικά η **λεκάνη των Μυτιληνίων (Owen et al,2011) ή αλλιώς Ηραίου-Πυθαγορείου - Μυτιληνίων**. Η δημιουργία τους τοποθετείται στο Ανώτερο Νεογενές, κατά το οποίο οι δύο λεκάνες συνδέονταν μερικώς με τον διάυλο του Πύργου (Σχήμα 3-7), ενώ μια τρίτη μικρότερη σε έκταση νεογενής λεκάνη αναπτύσσεται με τη μορφή λωρίδας στην περιοχή του Παλαιοκάστρου. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στο ότι κατά το τέλος του Μειοκαίνου, επικρατούσαν θερμές και υγρές συνθήκες οι οποίες ευνόησαν τη δημιουργία αλμυρών και αλκαλικών λιμνών στις λεκάνες Καρλοβασίου - Μυτιληνίων (Stamatakis, 1986,1989b,2009). Οι προαναφερθείσες νεογενείς λεκάνες περιέχουν ανθρακικά ιζήματα , κροκαλολατυποπαγή, αργίλους, τόφφους και τοφφίτες, ηφαιστίτες και εβαπορίτες με ηλικία σχηματισμών Τορτόνιο ή νεότερο (Dermitzakis, Papanikolaou, 1981) που επικαλύπτουν ασύμφωνα το προ-νεογενές υπόβαθρο του νησιού (Σταματάκης,1986) .

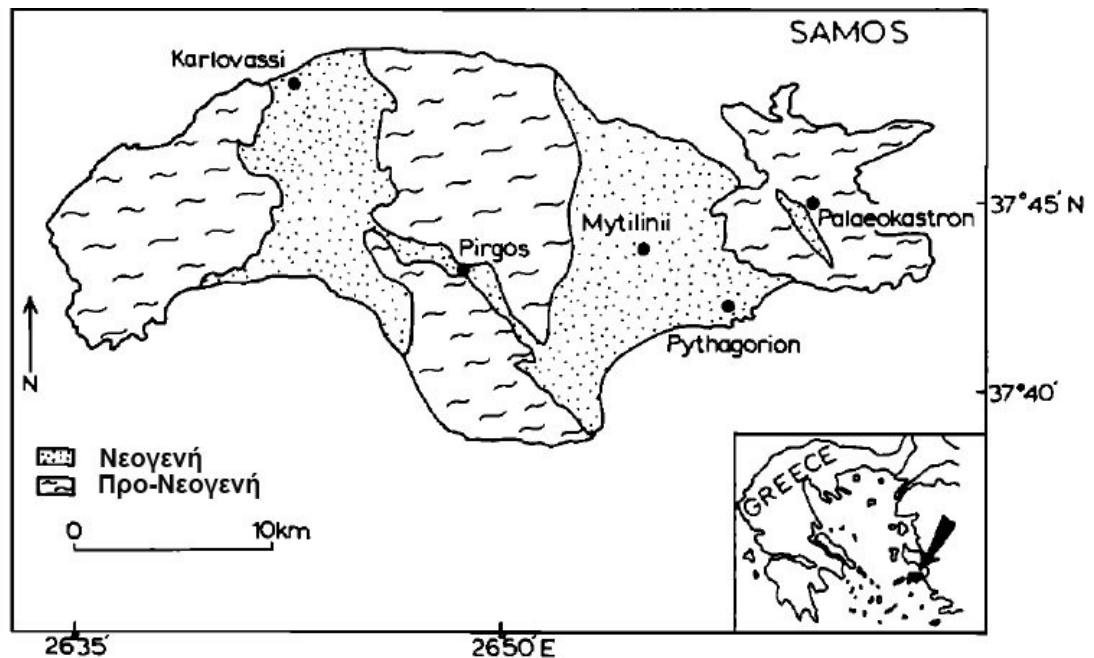
Οι λεκάνες Μυτιληνίων και Καρλοβασίου παρουσιάζουν ορισμένα **κοινά χαρακτηριστικά** , τα οποία είναι τα εξής:

- Πάνω από το βασικό κροκαλοπαγές αναπτύσσονται τρεις κύριοι σχηματισμοί , με ενδιάμεσο μέλος την κλαστική σειρά .
- Η κατώτερη νεογενής σειρά και στις δυο λεκάνες έχει υποστεί διαγενετική αλλοίωση , η οποία οφείλεται στην αλμυρότητα και αλκαλικότητα του πορικού ύδατος.
- Στα κατώτερα τμήματα της προαναφερόμενης σειράς συναντώνται λιγνιτικές ενδιαστρώσεις, δείγμα ενός αρχικά υγρού και θερμού κλίματος (Ioakim and Solunias, 1986) στην περιοχή, το οποίο στη συνέχεια έγινε ξηρό και θερμό.
- Μετά την απόθεση του κατώτερου σχηματισμού, ακολουθεί η ξήρανση των λιμνών και η ασύμφωνη τοποθέτηση της κλαστικής σειράς. Η ολική ξήρανση των λιμνών, είχε σαν αποτέλεσμα την απόθεση εβαποριτικών αλάτων στα ανώτερα στρώματα τους.
- Πάνω από την κλαστική σειρά έρχονται με επίκληση πλειοκαινικοί σχηματισμοί γλυκού νερού, οι οποίοι αποτέθηκαν και στην νεοδημιουργημένη λεκάνη του Παλαιόκαστρου.

- Η ίδια εξέλιξη λίμνης με αρχικά απόθεση λιγνιτών (υγρό και θερμό κλίμα, όξινο περιβάλλον) και στη συνέχεια απόθεση εβαποριτών και δημιουργία αυθιγενών ορυκτών λόγω αλμυρότητας και αλκαλικότητας των υδάτων (ξηρό και θερμό κλίμα, αλκαλικό περιβάλλον).

- Οι τόφφοι-τοφφίτες, περιέχουν αλκαλικούς αστρίους και στις δυο λεκάνες, σε όλη τη στρωματογραφική κολώνα, από το Τορτόνιο μέχρι το Πλειόκαινο, ενώ ο χαλαζίας συναντάται σε μικρότερο ποσοστό. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπήρχε κοινή πηγή τροφοδοσίας τους, η οποία λειτούργησε συνεχώς με μικρές μόνο διακοπές στην παραπάνω περίοδο.

- Τα ανώτερα μέλη της κατώτερης νεογενούς σειράς περιέχουν χερσαίους εβαπορίτες οι οποίοι είναι διαφορετικοί σε κάθε λίμνη, λόγω της διαφορετικής εξέλιξης τους. Η λεκάνη των Μυτιληνίων περιέχει νίτρο, συλβίνη και αλίτη ενώ η λεκάνη Καρλοβασίου γύψο, σελεστίνη και τεαρντίτη.



Σχήμα 3-7: Νεογενείς λεκάνες στο νησί της Σάμου. (Σταματάκης, 1989b)

Η γεωλογική εξέλιξη των δυο κύριων λεκανών του νησιού, φαίνεται να είναι παρόμοια. Και στις δυο λεκάνες εμφανίζεται η κατώτερη σειρά λιμναίων ιζημάτων, τόφφων – τοφφίτων, η οποία καλύπτεται από την κλαστική σειρά χερσαίων και ποταμοχειμμάρων αποθέσεων (ενδιάμεση σειρά) που περιέχει την γνωστή Πικερμική πανίδα θηλαστικών (Καραγεωργίου 1954, Theodoropoulos 1979, Meissner 1976, Solunias 1981, Weidmann et

al 1984). Η νεογενής ιζηματογένεση των δυο λεκανών κλείνει με την απόθεση των ιζημάτων και τόφφων του Πλειοκαίνου που χαρακτηρίζονται ως αποθέσεις γλυκών νερών (Καραγεωργίου 1947, Theodoropoulos, 1979).

Η **κλαστική σειρά** των δυο λεκανών έχει αναπτυχθεί πάνω στη διαβρωσιγενή επιφάνεια ανωμειοκαινικών λιμνών που υπέστησαν έντονη εξάτμιση, μέχρι την ολική ξήρανση. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εμφάνιση mudcracks και εβαποριτικών αλάτων τόσο στη λεκάνη του Καρλοβασίου, όσο και στη λεκάνη των Μυτιληνίων. (Σταματάκης, 1986). Η εξέλιξη της κάθε λεκάνης περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

3.3.3.1. Λεκάνη Καρλοβασίου

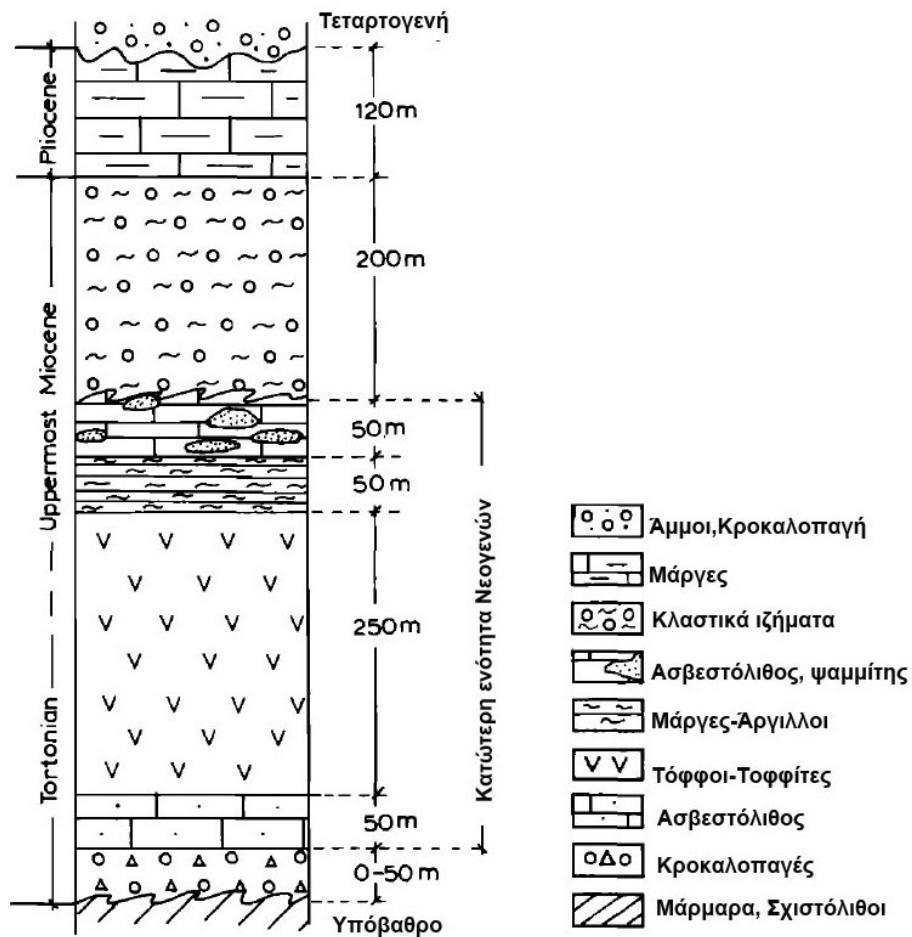
Από το Τορτόνιο - Μεσσήνιο, η λεκάνη στην οποία επικρατούσαν αλκαλικές συνθήκες γέμισε με βασικά κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθους, τέφρα και άλλα ηφαιστειακά, εβαπορίτες, μάργες, αργίλους και πυριτικούς ασβεστολίθους. Μέσω της ανύψωσης της περιοχής στο τελευταίο στάδιο του Μειοκαίνου, χερσαία ιζήματα και τόφφοι ανώτερης μειοκαινικής ηλικίας, καθώς και πλειοκαινικές μάργες αποτέθηκαν ασύμφωνα πάνω στα παλιότερα στρώματα.

Οι νεογενείς σχηματισμοί της δυτικής λεκάνης, όπως φαίνονται και στο **Σχήμα 2.3**, είναι οι εξής,:

- Στη βάση της λεκάνης συναντάμε ένα ερυθρό καφέ κροκαλοπαγές.
- Η **κατώτερη σειρά νεογενών** αποτελείται από: μάργες, ασβεστόλιθους, λατυποπαγή, ζεολιθικούς τόφφους και τοφφίτες καθώς και εβαπορίτες (Theodoropoulos, 1979; Σταματάκης, 1986; Stamatakis, 1989b; Stamatakis et al, 2009). Οι τόφφοι-τοφφίτες εναλλάσσονται συχνά με τα ιζήματα που έχουν κίτρινο-καφέ χρώμα έως και πράσινο, κάποιες φορές με γύψο (Σταματάκης, 1986). Απολιθωματοφόρα στρώματα ασβεστολίθων συναντώνται μεταξύ Μαραθοκάμπου και Κουμείκων σε εναλλαγή με πράσινους τοφφίτες. Στη βάση της σειράς υπάρχουν λιγνιτικές διαστρώσεις, κυρίως ανατολικά του Μαραθοκάμπου. Η σειρά έχει **πάχος περίπου 400 μέτρα**.
- Η **ενδιάμεση νεογενής σειρά**. Συναντώνται ερυθρά - πράσινα άστρωτα κροκαλολατυποπαγή, πηλοί, ψαμμίτες και ψαμμιτομάργες (**κλαστική σειρά Καρλοβασίου**), με **μέγιστο πάχος 200 μέτρα** (Theodoropoulos, 1989).

• Η ανώτερη νεογενής σειρά αποτελείται από: μάργες και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι γλυκού νερού με μέγιστο πάχος 120 μέτρα. Έχουν Πλειοκαινική ηλικία (Theodoropoulos, 1979, Stamatakis, 1979b)

Στα ανατολικά όρια των νεογενών αποθέσεων , αλλά και μέσα στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο συναντώνται ηφαιστίτες με όξινης έως βασικής σύστασης με μικρά ενδιάμεσης σύστασης σώματα λάβας να εμφανίζονται στα δυτικά (Karageorgiou, 1947; Robert & Catangrell, 1977; Theodoropoulos,1979)



Σχήμα 3-8: Στρωματογραφική κολώνα Νεογενών λεκάνης Καρλοβασίου (Stamatakis, 1989b) όπου διακρίνουμε τις κατώτερες λιμναίες αποθέσεις, τις μειοκαινικές χερσαίες-χειμαρώδεις αποθέσεις, και τις πλειοκαινικές αποθέσεις γλυκού.

3.3.3.2. Λεκάνη Μυτιληνίων

Η λεκάνη των Μυτιληνίων κυριαρχείται από ανω-μειοκαινικά λιμναία ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι), μάργες, δολομίτες καθώς και ιζηματα αποτελούμενα από διατομίτες, ποτάμιες αποθέσεις και πλειοκαινικούς τραβερτίνες και τόφους, με μικρές εμφανίσεις λιγνίτη στη βάση, ενώ το συνολικό πάχος των ιζημάτων είναι περίπου 650 μέτρα. (Solunias,1981, Meissner,1976, Theodoropoulos,1979, Weidmann et al,1984, Kostopoulos et al, 2003).

Τα ανώτερα Νεογενή ιζηματα της λεκάνης των Μυτιληνίων χωρίζονται σε βασαλτικά κροκαλοπαγή καθώς και σε τέσσερις λιμναίους-ποτάμιους σχηματισμούς. (Kostopoulos et al, 2003, Solunias,1981, Weidman et al, 1984, Ioakim and Solunias, 1986, Stamatakis et al, 1989c). Στα κατώτερα μέλη της σειράς έχουν διεισδύσει κοίτες βασαλτικής λάβας με επακόλουθο φαινόμενο τις τοπικές πυριτιώσεις.

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης των Μυτιληνίων αποτελούνται από **(Σχήμα 3-8)**:

- Στη βάση πάνω στο προνεογενές υπόβαθρο ένα βασικό κροκαλοπαγές-ψηφίτοπαγές, ερυθρού - καφέ χρώματος με κροκάλες μικρού μεγέθους (Stamatakis, 1986).

- Η **κατώτερη νεογενής σειρά** (Theodoropoulos,1979) με ηλικία Τορτόνια (Dermitzakis and Papanikolaou 1981), και πάχος περίπου 250 μέτρα αποτελείται από:

- Το σχηματισμό του Πυθαγορείου που βρίσκεται πάνω από τα κροκαλοπαγή με πάχος 200 μέτρα περίπου. Αποτελείται από βιτουμενιούχους - πορσελανώδεις ασβεστόλιθους (**ασβεστόλιθοι Πυθαγορείου**), πορσελανίτες, μάργες, ενώ στη βάση του διακρίνουμε τόφους-τοφίτες και διαστρώσεις λιγνιτών (**στρώματα Μαυρατζαίων**). Στο δυτικό άκρο της λεκάνης έχουμε διεισδύσεις ανδεδιτών-βασαλτών. (Meissner, 1976, Stamatakis,1986,1989c).

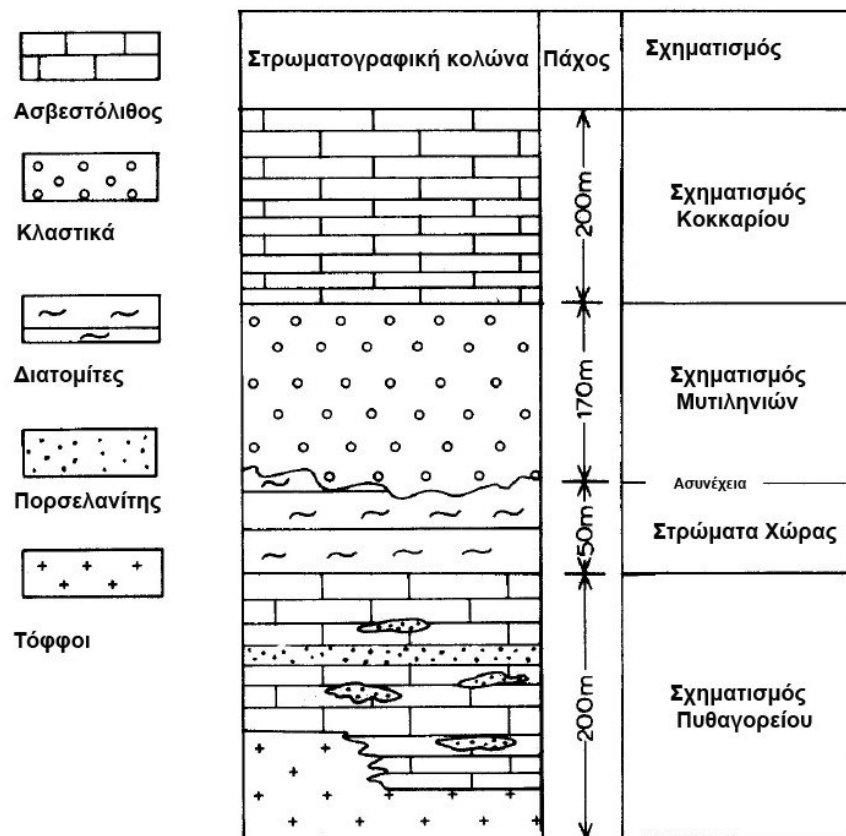
- Πάνω από τους ασβεστόλιθους Πυθαγορείου συναντάμε τα λεγόμενα **στρώματα της Χώρας**, ηλικίας Τουρόλιου, πάχους 50 μέτρων, τα οποία αποτελούνται από μάργες, τόφους και είναι εμπλουτισμένα σε διατομίτες, εμφανίζοντας μια φυλλοειδή μορφή. (Stamatakis, 1986, 1989c) . Οι Stamatakis και Zagourogliou(1984) αναφέρουν ότι συνιζηματογενείς εβαπορίτες (αλίτης συλβίτης και νιτρικά). βρίσκονται διάσπαρτοί τόσο στο σχηματισμό του Πυθαγορείου όσο και της Χώρας, κάτι που υποδεικνύει ενδιάμεσες φάσεις υψηλής αλατότητας κατά τη διάρκεια της απόθεσης.

- Η **ενδιάμεση ιζηματογενής σειρά** αποτελείται από τον **σχηματισμό των Μυτιληνίων** που βρίσκεται πάνω από τους σχηματισμούς της Χώρας , αποτελείται από 170 μέτρα κλαστικών (λιμναίες, χειμαρώδεις και χερσαίες αποθέσεις,

κροκαλολατυποπαγών ,αμμούχων μαργών, αργίλλων και τόφφων) μέσα στους οποίους βρίσκουμε απολιθώματα θηλαστικών του Τουρολίου (Stamatakis, 1989c, Kostopoulos et al 2003, Solounias and Ring 2007, Owen 2011).

Ανάμεσα στους σχηματισμούς της Χώρας και των Μυτιληνίων βρίσκουμε ένα στρωματογραφικό κενό, περίοδο κατά την οποία έχουμε διάβρωση , κάτι που δείχνει ότι έχουμε αποξήρανση της λίμνης κάποια στιγμή μέσα στο Ανώτερο Μειόκαινο (Owen,2011).

Ο **ανώτερος σχηματισμός** που συναντάμε είναι ο **σχηματισμός του Κοκκαρίου**. Πλειοκαινικές στρώσεις τόφφων και τραβερτίνη σχηματίζουν τον πάχους 200 μέτρων σχηματισμό. (Theodoropoulos,1979, Stamatakis,1986, Owen,2011).



Σχήμα 3-9: Στρωματογραφική κολώνα νεογενών στην λεκάνη των Μυτιληνίων (Stamatakis, 1989b).

3.3.4 Τεκτονική

Κατά τη διάρκεια του Νεογενούς, η Σάμος άνηκε σε μια εκτεταμένη χερσαία περιοχή όπου υπήρχαν τοπικά βυθίσματα, μεταξύ των ορεινών όγκων της Λυδοκυταρρικής μάζας (Μεντερές) της αλπικής ορογενετικής ζώνης (Meissner, 1976). Η παρουσία της Πικερμικής πανίδας στη Σάμο, Χίο, Μικρά Ασία, Κύμη, Πικέρμι δηλώνει μια πιθανά ασυνεχή επικοινωνία της Μικράς Ασίας με την Αττική- Ευβοια, παρόλη τη βύθιση του κεντρικού Αιγαίου κατά την ίδια περίοδο. (Dermitzakis and Papanikolaou 1981, Mistardis 1977)

Οι παραμορφώσεις που επηρέασαν την εξέλιξη των νεογενών σχηματισμών της Σάμου, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ενότητες με διευθύνσεις B 110° -130° , B 150°-110°, B70°-90° (Paranikolaou,1979).

Η κυριότερη φάση παραμόρφωσης αντιπροσωπεύεται από την B 110° -130° , η οποία έχει δώσει άξονες πτυχών και ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης. (Paranikolaou1979, Solunias 1981). Οι παραμορφώσεις αυτές είναι εντονότερες στη λεκάνη των Μυτιληνίων και ιδιαίτερα στα στρώματα Χώρας, πιθανόν λόγω της φύσης των σχηματισμών (εύκαμπτα στρώματα διατομιτών-διατομιτικών μαργών). Στην περιοχή Κοκκαρίου - Αυλακίων συναντώνται ανορθωμένα στρώματα διατομιτών και έντονες ρηγματώσεις.

Ο Angelier(1976) έχει διαπιστώσει δυο περιόδους συμπίεσης και εφελκυσμού στη Σάμο. Η πρώτη περίοδος αντιπροσωπεύει συνιζηματογενή τεκτονισμό, την ίδια περίοδο που γινόταν απόθεση ιζημάτων της κατώτερης σειράς, ενώ η δεύτερη περίοδος έλαβε χώρα κατά το Πλειόκαιο - Πλειστόκαινο. Μεταξύ των δυο περιόδων υπήρξε μια ανύψωση με ακόλουθη διάβρωση και στη συνέχεια απόθεση των κλαστικών σειρών του νησιού. Η εξέλιξη αυτή της Σάμου ακολούθησε της γενικότερη εξέλιξη του Αιγαίου όπου υπήρχαν ζώνες συμπίεσης και εφελκυσμού από το Άνω Μειόκαινο (Dewey and Sengor 1979, Stegena and Kolios 1982, Mercier 1981, Jacobshagen et al 1978).

Το **υπόβαθρο στην περιοχή μελέτης** αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, φυλλίτες και σερπεντινίτες) τα οποία ανήκουν σε ένα σύστημα τεσσάρων διαφορετικών τεκτονικών ενοτήτων (Stamatakis 1989,2008). Πάνω σε αυτό το σύστημα έχει επωθηθεί ένα αλλόχθονο αμεταμόρφωτο κάλυμμα το οποίο αποτελείται από διαβάσεις, περιδοτήτες, κερατόλιθους και ασβεστόλιθους. (Paranikolaou,1979, Theodoropoulos 1979, Mezger and Okrusch, 1985). Ακολουθούν οι νεογενείς σχηματισμοί οι οποίοι σε στρωματογραφική σειρά από τα κατώτερα στα ανώτερα περιλαμβάνουν: κροκαλοπαγή, λιμναίους ασβεστόχους σχηματισμούς, τόφφους, ποτάμιες και χερσαίες αποθέσεις.(Meissner, 1976, Theodoropoulos, 1979, Stamatakis and Zagkouroglou, 1984, Stamatakis, 1986, Kammas, 1998)

Η ανώτερη στρωματογραφική ενότητα αποτελείται από μια παχιά ιζηματογενή σειρά η οποία χαρακτηρίζεται από λευκό ασβεστόλιθο και δολομίτη, βιογενή πυριτικά ιζήματα τα οποία κυμαίνονται από ασβεστόχους διατομίτες μέχρι διατομιτικούς τοφφίτες(Stamatakis, 1987, Stamatakis et al, 1987).

Η τεκτονική δομή του νησιού κυριαρχείται από εφαπτομενικές κινήσεις, οι οποίες εκφράζονται με τη μορφή τεκτονικών καλυμμάτων (Angelier, 1976). Επίσης υπάρχουν

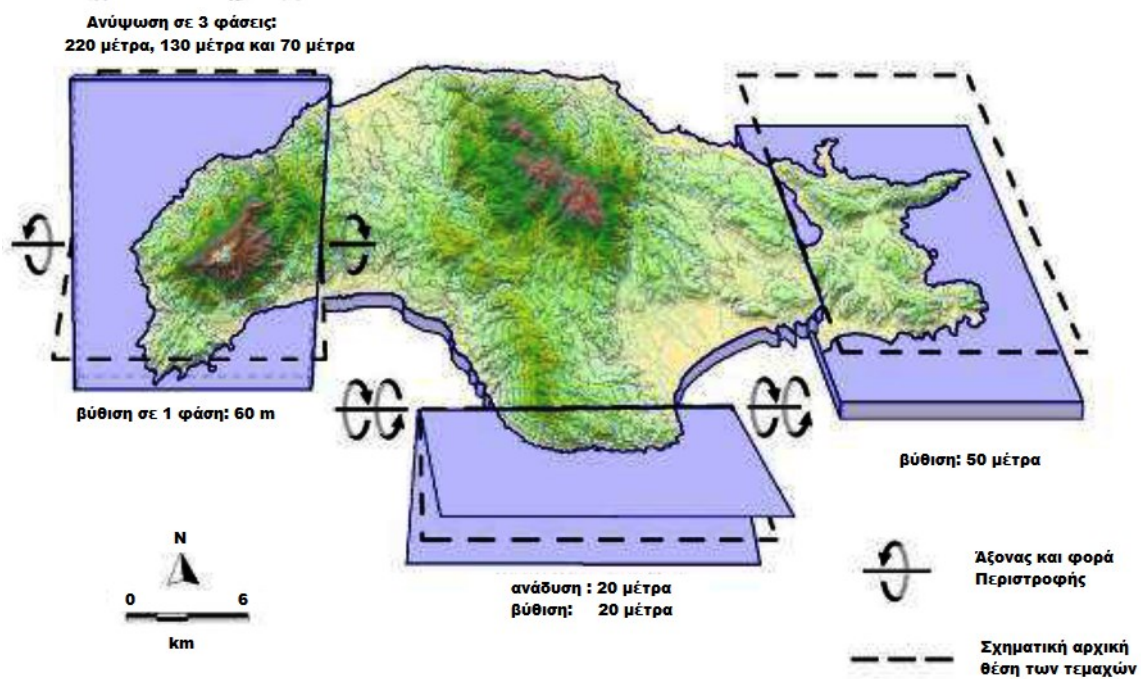
αρκετά ξεχωριστά νεοτεκτονικά γεγονότα τόσο πλαστικής όσο και ρηγματογενούς παραμόρφωσης. Η πλαστική παραμόρφωση εκφράζεται με τη μορφή ισοκλινών πτυχών διαφόρων διευθύνσεων (Kammas, 1998) , ενώ η ρηξιγενής παραμόρφωση από κανονικά ρήγματα ,τα οποία έχουν κυρίως ΒΒΔ-ΝΝΑ διευθύνσεις.

Σύμφωνα με τους Μούρτζα & Σταυρόπουλο (2001), ο οποίος μελέτησε την πρόσφατη τεκτονική εξέλιξη του νησιού η Σάμος αποτελείται από **τέσσερα τουλάχιστον διαφορετικά τεκτονικά τεμάχια** με διαφορετική τεκτονική συμπεριφορά (Σχήμα 3-10)

- Το δυτικό τέμαχος έχει περιστραφεί γύρω από έναν άξονα με διεύθυνση Α-Δ. Η βόρεια πλευρά έχει αναδυθεί στη διάρκεια τριών κυρίως παροξυσμικών φάσεων, το μέγεθος, το εύρος και η συχνότητα των οποίων διαφέρει. Αντίθετα με την βόρεια, η νότια πλευρά έχει βυθιστεί σε μια μόνο φάση. Αν και δεν υπάρχουν στοιχεία που να επιτρέπουν το συσχετισμό των παλαιών ακτογραμμών, το δυτικό τέμαχος φαίνεται ότι λειτούργησε ουσιαστικά ως τεκτονικό δίπολο μόνο κατά την τελευταία φάση, με ανύψωση κατά 0,70m της βόρειας και βύθιση κατά 0,60m της νότιας πλευράς του. Στη διάρκεια των δυο παλαιότερων φάσεων, η βόρεια πλευρά συμπεριφέρθηκε ως ανεξάρτητο τεκτονικό τέμαχος. Το τέμαχος αυτό περιστράφηκε γύρω από τον άξονα Α-Δ , σε δεξιόστροφη διεύθυνση, ενώ το νότιο τμήμα της δυτικής πλευράς έμεινε σταθερό. Προς τα ανατολικά το τέμαχος αυτό οριοθετείται από τη δυτική ρηξιγενή ζώνη της λεκάνης του Καρλοβασίου.

- Το νότιο τμήμα της κεντρικής Σάμου, αποτελεί ένα δεύτερο τεκτονικό τέμαχος που έχει υποστεί μια παλινδρομική κίνηση (ανάδυση, βύθιση) της τάξης των 0,20m γύρω από έναν άξονα με διεύθυνση Α-Δ. Η ανοδική κίνηση, θεωρείται παλαιότερη και η καθοδική νεότερη. Το προς βορρά όριο του τεκτονικού αυτού τεμάχους, φαίνεται να αποτελεί η Α-Δ διεύθυνσης ρηξιγενής ζώνη που περνάει από την θέση Λιμνονάκι, ενώ το ανατολικό και το δυτικό όριο του αποτελούν η ανατολική και η δυτική ρηξιγενής ζώνη της λεκάνης του Καρλοβασίου και των Μυτιληνίων αντίστοιχα.

- Το ανατολικό τέμαχος έχει υποστεί συνολικά μια βύθιση της τάξης των 0,50 m. Το προς τα δυτικά όρια του τεκτονικού τεμάχους, φαίνεται να αποτελεί η ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ρηξιγενής ζώνη Βαθέος- Ψιλής Άμμου.



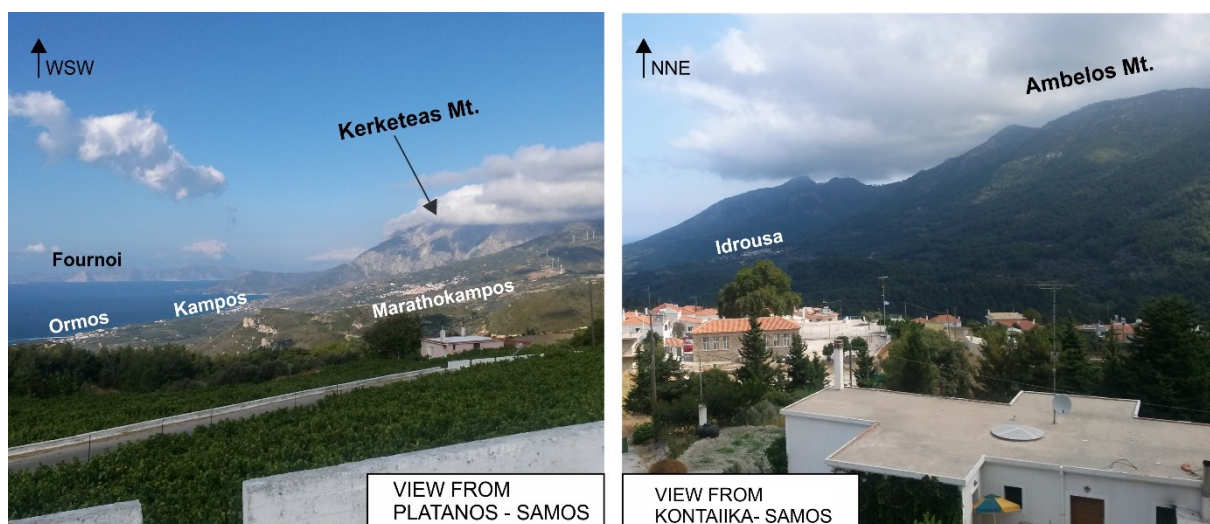
Σχήμα 3-10: Σχηματική απεικόνιση των τεκτονικών τεμαχών της Σάμου (Μούρτζας & Σταυρόπουλος, 1989, τροποποιημένο)

3.4 Γεωμορφολογία

3.4.1 Μορφολογία

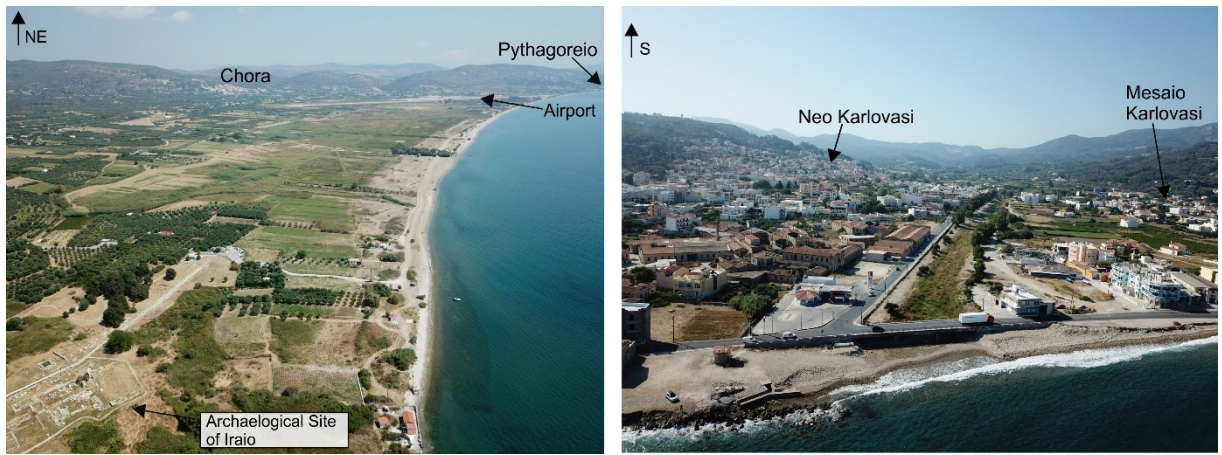
Η Σάμος είναι ορεινή και η μορφολογία του νησιού χαρακτηρίζεται από **δύο κύριους ορεινούς όγκους**. Το νησί χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη, από τον ορεινό όγκο της Αμπέλου (Καρβούνης), ο οποίος καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του νησιού, και έχει μέγιστο υψόμετρο 1160 μέτρα. Στο νότιο κεντρικό τμήμα, και σαν προέκταση της Αμπέλου υπάρχει ένας μικρότερος ορεινός όγκος, το όρος Μπουρνιάς (747 μ.). Στα δυτικά βρίσκεται ο μεγαλύτερος ορεινός όγκος του νησιού, ο Κερκετέας (1443 μ.). Στα ανατολικό άκρο του νησιού υπάρχει ένας χαμηλός ορεινός όγκος, ο ορεινός όγκος Καμάρας - Ζωοδόχου Πηγής (Σταματάκης ,1986) με υψόμετρο 433 m ο οποίος χαρακτηρίζεται από καρστικούς σχηματισμούς (Riedl, 1989) και ανάμεσα στους δυο κύριους ορεινούς όγκους, υπάρχουν διάσπαρτοι λοφώδεις σχηματισμοί.

Ο Κερκετέας αποτελείται από μάρμαρα, έχει απότομες κλίσεις και είναι γυμνός από βλάστηση, ενώ εμφανίζονται πολλές καρστικές γεωμορφές (υπάρχουν πολλές σπηλιές μικρές και μεγάλες, άλλες προσβάσιμες και άλλες όχι). Η Άμπελος αντίθετα αποτελείται κυρίως από σχιστόλιθους, έχει μεσαίες κλίσεις και πυκνή βλάστηση (Σχήμα 3-11).



Σχήμα 3-11: Οι δυο κυριότεροι ορεινοί όγκοι του νησιού: (α) Κερκετέας και (β) Άμπελος

Ανάμεσα στον Κερκετέα και την Άμπελο βρίσκεται η **λεκάνη Καρλοβασιού** (η οποία εκτείνεται από το Καρλόβασι μέχρι τον Μαραθόκαμπο). Ανατολικά του ορεινού όγκου της Αμπέλου βρίσκεται η μεγαλύτερη λεκάνη της περιοχής, **λεκάνη των Μυτιληνιών**, η οποία βρίσκεται στην Νοτιανατολική πλευρά του νησιού και περικλείεται από τα χωριά Χώρα, Πυθαγόρειο, Μύλοι και Παγώνδας. Οι νεοτεκτονικές αυτές λεκάνες έχουν διεύθυνση Βορράς-Νότος (Gournelos, 2001).



Σχήμα 3-12: Οι δυο μεγαλύτερες νεοτεκτονικές λεκάνες της Σάμου: (α) Μυτιληνίων-Πυθαγορείου-Ηραιού και (β) Καρλοβασίου

Ο μεγαλύτερος κόλπος της νήσου είναι αυτός της Σάμου, ενώ στα παράλια του νησιού υπάρχουν πολυάριθμοι μικρότεροι κόλποι. Η βαθυμετρία της περιοχής είναι ήπια στο μεγαλύτερο κομμάτι του νησιού με βάθη 50-200 μέτρα. Στο βόρειο κομμάτι του νησιού υπάρχει μια μεγάλη θαλάσσια λεκάνη βάθους μεγαλύτερου από 1000 μέτρα (Stiros, 1998).

3.4.2 Γεωμορφές

Η Σάμος επηρεάζεται έντονα από διαδικασίες διάβρωσης, αποσάθρωσης και καρστικοποίησης οι οποίες εξαρτώνται από τη βροχόπτωση, τη λιθολογία (οι σχιστόλιθοι διαβρώνονται πιο εύκολα από τους ασβεστόλιθους) και άλλους παράγοντες (βλάστηση, τεκτονική, ορυκτολογική σύσταση κ.α). Το έδαφος διαβρώνεται στα σημεία όπου έχουμε ροή νερού (ή πολύ δυνατούς ανέμους), δημιουργώντας μικρά ρέματα, με διαστάσεις κάποιων εκατοστών ("rills") ή ακόμα μεγαλύτερα όταν αυτά συνενώνονται ("gullies"). Οι αναβαθμίδες που υπάρχουν στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και η πυκνή βλάστηση σε μεγάλη έκταση του νησιού δεν επιτρέπουν τη δημιουργία αυτών των μορφών διάβρωσης. Αντίθετα σε καμένες εκτάσεις ευνοείται η εμφάνισή τους. Σε περιοχές όπου υπάρχει ζώνη ρηγμάτων, σχηματίζονται φαράγγια με μεγάλη κατά βάθος διάβρωση η οποία γίνεται κατά μήκος της ζώνης αυτής.

Παράλληλα συναντάμε εκτεταμένες περιοχές επιπέδωσης στις ορεινές περιοχές. Τέτοιες μορφές δημιουργούνται από την αποσάθρωση και τη διάβρωση σε χαμηλό υψόμετρο. Λόγω της έντονης τεκτονικής, έχουμε άνοδο της περιοχής της επιφάνειας επιπέδωσης σε μεγαλύτερο υψόμετρο, οπότε ξεκινάει και πάλι η διαδικασία της διάβρωσης με μικρότερο ρυθμό. Διακρίνονται 4 επιφάνειες στο νησί της Σάμου: (Vasilopoulos, 2008), η πρώτη σε υψόμετρο 1400 μέτρα στον Κερκετέα, η επόμενη σε υψόμετρο 800-1000 μέτρα στην

Αμπελο, έπειτα σε υψόμετρο 500-700 μέτρα στις ανατολικές παρυφές του Κερκετέα και τέλος σε υψόμετρο 200-450 μέτρα σε διάφορες περιοχές σε ολόκληρη τη Σάμο.

Καθώς το νησί χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες εμφανίσεις ανθρακικών πετρωμάτων εμφανίζονται και καρστικές γεωμορφές από τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων από το νερό, το οποίο περιέχει CO_2 ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$). Συναντάμε πολλές γεωμορφές όπως δακτυλογλυφές, αμαξοτροχιές, μικρά έγκοιλα, καταβόθρες, σπήλαια κ.α ειδικά στα δυο άκρα του νησιού (ανατολικό και δυτικό) όπου έχουμε μεγάλες εμφανίσεις ασβεστολίθων



Σχήμα 3-13 : Καρστικές γεωμορφές (καταβόθρες και σπήλαια) στο νησί της Σάμου

3.4.3 Υδρογραφικό δίκτυο

Η Σάμος δεν έχει σημαντικούς ποταμούς ή λίμνες. Οι περισσότεροι χείμαρροι διατηρούν νερό μόνο το χειμώνα, αλλά ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της υγρής περιόδου κάποιες χρονιές τα μεγαλύτερα ρέματα παρουσιάζουν μια μικρή παροχή, σε ορισμένα σημεία τους, ακόμα και τον Αύγουστο. Παροχή καθόλη τη διάρκεια του χρόνου παρατηρήθηκε μόνο στο 'Ποτάμι' το οποίο πηγάζει από τον Κερκετέα και βρίσκεται δυτικά του Καρλοβασιού. Τα σημαντικότερα ποτάμια της Σάμου είναι ο Ίμβρασος Ποταμός ο οποίος εκβάλλει στο Ηραίο αφού πρώτα διασχίσει την εκτεταμένη νεογενή λεκάνη των Μυτιληνίων-Πυθαγορείου-Ηραίου, ενώ στα βόρεια του νησιού και κοντά στο Καρλόβασι εκβάλλουν το Μεγάλο Ρέμα και το Φουρνιώτικο, αφού πρώτα διασχίσουν τη νεογενή λεκάνη του Καρλοβασιού, η οποία χωρίζεται σε δυο τμήματα.

Στο Βορειοδυτικό μέρος του νησιού, εξαιτίας του Κερκετέα ο οποίος χαρακτηρίζεται από πλαγιές με πολύ μεγάλες κλίσεις, σχηματίζονται μικρές υδρολογικές λεκάνες με έντονα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Οι χείμαρροι έχουν απότομες κλιθείς και μικρό σχετικά πλάτος και μήκος ενώ σχηματίζονται και ποτάμια αναβαθμίδες. Οι κοιλάδες των ποταμών

έχουν σχήμα V, υπάρχουν σημεία κάμψης σε πολλά σημεία του υδρογραφικού δικτύου, κάτι που αποδεικνύει ότι στα Βορειοδυτικά έχουμε δημιουργία ενός νέου ανάγλυφου εξαιτίας της τεκτονικής, ενώ η έντονη κατά βάθος διάβρωση είναι έκδηλη και σχηματίζει το ανάγλυφο της περιοχής.

Το κεντρικό τμήμα της Σάμου, περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο της Αμπέλου. Το ανάγλυφο είναι ορεινό, αλλά με μικρότερες κλίσεις από ότι στα Βορειοδυτικά, λόγω της διαφορετικής λιθολογίας και της πυκνότερης βλάστησης. Σχηματίζονται μεγαλύτερες υδρολογικές λεκάνες, τα ποτάμια έχουν μεγαλύτερο μήκος και πλάτος, εμφανίζουν μεσαίες κλίσεις και κοιλάδες σχήματος V. Στα χαμηλότερα τμήματα των ρεμάτων και όπου η μορφολογία το ευνοεί έχουμε σημαντικές αποθέσεις τεταρτογενών (λεκάνες Καρλοβασίου, Ηραίου, Μαραθοκάμπου).

Στο ανατολικό τμήμα (ορεινός όγκος Ζωοδόχου Πηγής) το ανάγλυφο είναι ήπιο με μικρές κλίσεις, ενώ το υδρογραφικό δίκτυο είναι περιορισμένο, λόγω της λιθολογίας στη περιοχή (καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι), η οποία ευνοεί την υπόγεια απορροή.



Σχήμα 3-14: Το υδρογραφικό δίκτυο σε κάποια από τα ρέματα της Σάμου, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετική ένταση διάβρωσης και διαφορετικό ανάγλυφο.

3.5. Έδαφος & Χρήσεις γης

Όσον αφορά τα εδάφη της Σάμου δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες μελέτες που να περιγράφουν τα εδάφη της, αλλά ο Χριστοδουλάκης (1986) αναφέρει ότι στο κεντρικό κομμάτι του νησιού αλλά και στο ανατολικό και δυτικό επικρατούν τα ποντζολικά εδάφη αλλά και τα όξινα δασικά εδάφη που σχηματίζονται πάνω σε μεταμορφωμένα πετρώματα, ενώ στις νεογενείς λεκάνες μεταξύ των ορεινών όγκων επικρατούν οι ρεντζίνες, τα δασικά εδάφη και τα “regosols” που σχηματίζονται από το αποσαθρωμένο υλικό των υψηλότερων τμημάτων. Σε μια νεότερη οι Yassoglou et al., 2017 έχουν μελετήσει σε για ολόκληρο τον Ελληνικό χώρο τα εδάφη σε μεγάλη κλίμακα και χωρίζουν τα εδάφη της Σάμου σε 4 κατηγορίες : εδάφη με χαμηλό βάθος το οποίο σχηματίζεται πάνω σε βραχώδες υπόστρωμα (leptosols), εδάφη σε πρωταρχικό στάδιο σχηματισμού χωρίς σαφείς ορίζοντες (cambisols), αργιλώδη εδάφη (luvisols) και στρωματοποιημένα εδάφη (fluvisols) που σχηματίζονται σε αλουβιακούς κώνους ή αλλουβιακές πεδιάδες. Άλλες βάσεις όπως το σύστημα εδαφολογικών δεδομένων (<https://iris.gov.gr/SoilServices/>) έχουν πληροφορίες για τη Σάμο αλλά για πολύ περιορισμένες πεδινές εκτάσεις στο νοτιο- ανατολικό τμήμα του νησιού.

Οι χρήσεις γης στο νησί της Σάμου μεταβάλλονται πολύ γρήγορα σε σχέση με τον χρόνο, εξαιτίας κυρίως της **ανθρώπινης δραστηριότητας και των δασικών πυρκαγιών**. Οι δασικές περιοχές έχουν μειωθεί αρκετά τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με κατοίκους της περιοχής η μεταβολή αυτή άρχισε εδώ και δεκαετίες καθώς στα μέσα του προηγούμενου αιώνα το μεγαλύτερο μέρος του Κερκετέα καλυπτόταν από δάση, αλλά επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές προκάλεσαν την απογύμνωση του στις νότιες παρυφές του. Από στατιστικά στοιχεία του πυροσβεστικού σώματος που δημοσιεύονται κατά καιρούς βλέπουμε ότι κατά τη δεκαετία 2000-2010 η Σάμος υπέστη πολύ μεγάλες πυρκαγιές που κατέκαψαν περισσότερα από 165.000 στρέμματα σε περισσότερες από 600 εκδηλώσεις πυρκαγιών. Από αυτά μάλιστα περίπου τα 145.000 αφορούν το καλοκαίρι του 2000. Τα τελευταία είκοσι χρόνια όμως έχουμε σημαντικά λιγότερες πυρκαγιές (π.χ. το 2010 και το 2015 όπου κάηκαν λίγες χιλιάδες στρέμματα), δίνοντας τη δυνατότητα στο δάσος να ανακάμψει.

Στην περιοχή συνυπάρχουν μεγάλες εκτάσεις χαμηλής βλάστησης (κυρίως θάμνοι και σκληροφυλλική βλάστηση), δασώδεις περιοχές (κωνοφόρα δένδρα κατά κύριο λόγο) και μεταβατικές περιοχές όπου συναντώνται και οι δύο τύποι βλάστησης. Ένα πολύ μεγάλο μέρος της περιοχής μελέτης χρησιμοποιείται για αγροτικές δραστηριότητες (είτε καλλιεργήσιμες εκτάσεις είτε με τη μορφή ελαιώνων ή αμπελώνων). Περιοχές με ελάχιστη ή καθόλου βλάστηση δεν είναι συχνές και απαντώνται κυρίως στα υψηλότερα σημεία του όρους Κερκετέα στα δυτικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία

Η εκτίμηση της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου για μια περιοχή είναι διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Τα δεδομένα δεν είναι πάντα αρκετά για να εφαρμοστούν πολύπλοκα μοντέλα, ενώ οι σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάβρωση και τις ποτάμιες πλημμύρες δεν είναι καλά καθορισμένες. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η ασαφής λογική ή/και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για τον πιο αποδοτικό συνδυασμό των παραγόντων ώστε να υπολογιστεί η διάβρωση και η πλημμυρική επικινδυνότητα στην περιοχή της Σάμου. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν παραδοσιακές μέθοδοι (όπως η εξίσωση ‘RUSLE’ και η ‘SCS’) είτε για τον υπολογισμό επιπλέον χρήσιμων παραμέτρων είτε για να γίνει σύγκριση με τις μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης, ενώ επιπλέον δημιουργήθηκε ένα ασαφές μοντέλο για την εκτίμηση του σημαντικότερου ίσως χαρακτηριστικού του εδάφους το οποίο επηρεάζει άμεσα τόσο την επιφανειακή απορροή όσο και τη διάβρωση, δηλαδή του πάχους του.

Αρχικά συγκεντρώνονται τα **πρωτογενή δεδομένα σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S)**. Ακολουθεί μια προ-επεξεργασία των δεδομένων αυτών (ψηφιοποίηση, γεωαναφορά, αλλαγή προβολικού συστήματος σε ΕΓΣΑ 87, έλεγχος ως προς την τοπολογία) και έπειτα ακολουθεί η κυρίως επεξεργασία τους μέσω Γ.Σ.Π οπότε δημιουργούνται τα δευτερογενή δεδομένα (π.χ. κλίση, δείκτης NDVI). Όλα τα δεδομένα οργανώνονται σε μια γεωβάση δεδομένων (geodatabase) σε περιβάλλον ARC GIS, ενώ για την παραγωγή των δευτερογενών δεδομένων χρησιμοποιούνται έτοιμα εργαλεία των λογισμικών ARC GIS, SAGA GIS, QGIS. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως θα αναλυθεί παρακάτω δημιουργούνται νέα εργαλεία σε περιβάλλον python (arcpy) είτε για τον υπολογισμό πολύπλοκων μορφομετρικών δεικτών όπως ο ‘HAND’ είτε για την υλοποίηση των ασαφών συστημάτων (σε συνδυασμό με τη γλώσσα προγραμματισμού ‘ANACONDA’ και τη βιβλιοθήκη ‘scikit-fuzzy’. Τα νευρωνικά δίκτυα υλοποιούνται σε περιβάλλον MATLAB και ‘R Programming Language’.

4.1. Πρωτογενή Δεδομένα

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα πρωτογενή δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν για την υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής. Τα δεδομένα αυτά είτε χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή δευτερογενών δεδομένων, είτε ως είσοδοι στα μοντέλα εκτίμησης της διάβρωσης, των υδρολογικών συνθηκών και του πλημμυρικού κινδύνου είτε για την περιγραφή των συνθηκών στην περιοχή μελέτης.

4.1.1 Τοπογραφικά δεδομένα

Καθώς τόσο η διάβρωση όσο και οι πλημμύρες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την **τοπογραφία της περιοχής**, δόθηκε μεγάλη προσοχή στην κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ- DEM). Έχοντας ως βάση το DEM του Κτηματολογίου (μέγεθος Κανάβου 5 x 5 m), το οποίο όμως για την περιοχή μελέτης δεν είναι πλήρες και δε καλύπτει κάποιες περιοχές (κυρίως στρατιωτικοί χώροι και το αεροδρόμιο) και σε συνδυασμό με δορυφορικές φωτογραφίες και άλλα δορυφορικά δεδομένα κατασκευάστηκε ένα επικαιροποιημένο DEM. Από τα 477.69 Km² της περιοχής μελέτης καλύπτονται τα 470.17 km² από το DEM του κτηματολογίου. Στο DEM βάσης κάποια τμήματα δεν είχαν τιμές υψομέτρου ('NO DATA') ενώ κάποια σημεία της ακτογραμμής είχαν ανακρίβειες (για παράδειγμα η Μαρίνα Πυθαγορείου με πρόσφατη κατασκευή έχει επεκτείνει την ακτογραμμή κατά μερικές δεκάδες μέτρα σε ένα σημείο).

Έτσι για να δημιουργηθεί ένα **πλήρες DEM**, για ολόκληρη την περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν **επιπλέον στοιχεία που ήταν διαθέσιμα** για να καλυφθούν οι εναπομένουσες περιοχές όπως:

- i. **Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000** της Γ.Υ.Σ. ο οποίος περιλαμβάνει ισουψείς και υψομετρικά σημεία κορυφών (έγινε ψηφιοποίηση τους σε περιβάλλον Γ.Σ.Π.
- ii. **Ψηφιακά μοντέλα εδάφους** που διατίθενται ελεύθερα:
 - ASTER με μέγεθος κανάβου 30 m x 30 m
 - SRTM με μέγεθος κανάβου 30 m x 30 m
 - EU-DEM με μέγεθος κανάβου 25 m x 25 m
- iii. **Δορυφορική εικόνα Worldview** (χωρική ακρίβεια για το παγχρωματικό κανάλι 0.46 μέτρα) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση της ακτογραμμής της περιοχής με βελτιωμένη ακρίβεια στις περιοχές που διαπιστώθηκαν διαφορές.

Τα παραπάνω συνδυάστηκαν σε **περιβάλλον G.I.S.** για τη δημιουργία του τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους 5m x 5m ως εξής:

- Αρχικά οριοθετήθηκε η περιοχή μελέτης με επικαιροποίηση και βελτίωση της ακτογραμμής η οποία αντιπροσωπεύει το μηδενικό υψόμετρο.

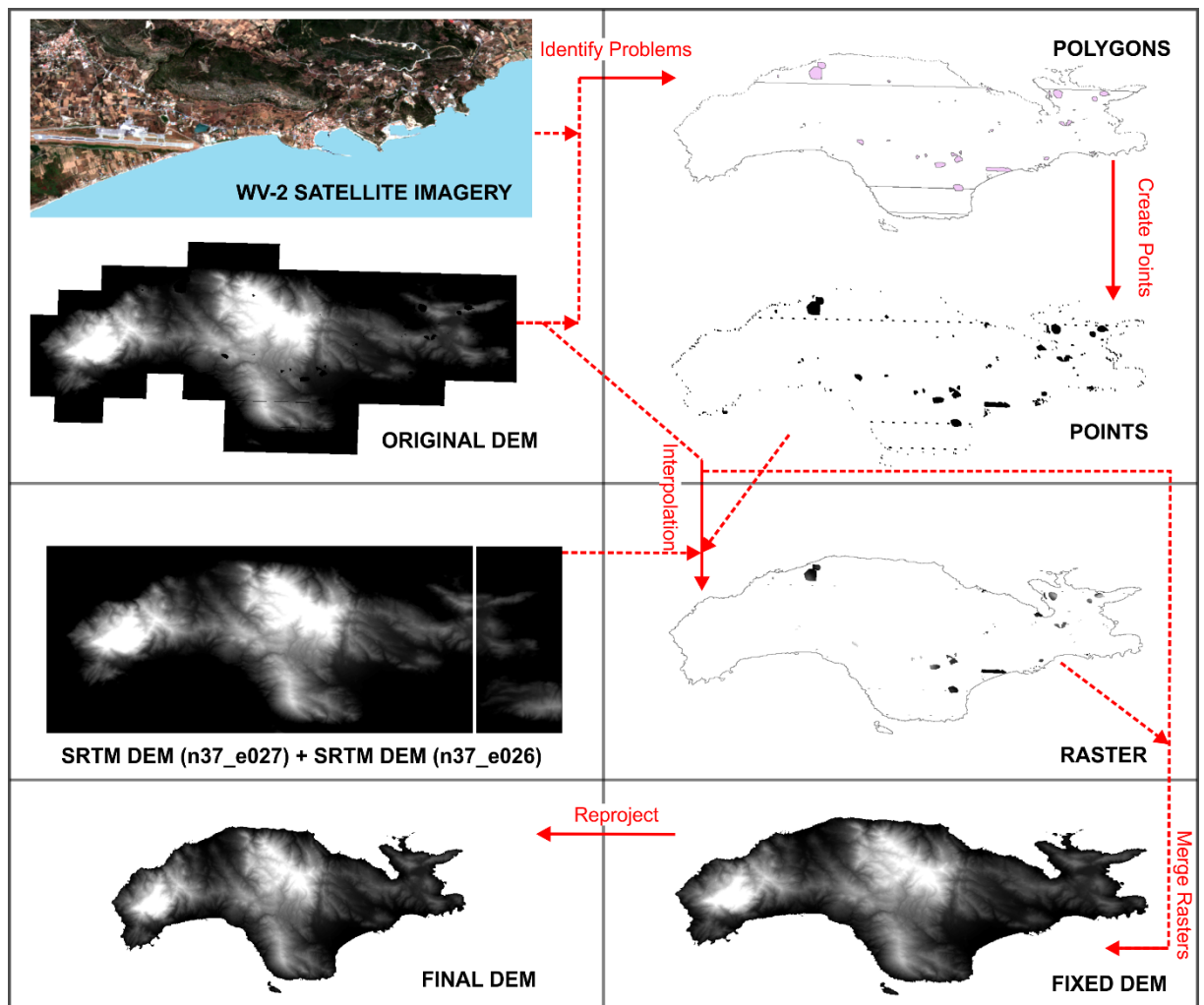
- Μέσω Γ.Σ.Π. ανιχνεύθηκαν οι προβληματικές περιοχές στο DEM του κτηματολογίου. Μικρές χειροκίνητες παρεμβάσεις μετά από προσεκτική παρατήρηση των δεδομένων συνέβαλαν στην καλύτερη οριοθέτηση τους.

- Στις μη προβληματικές περιοχές, έγινε σύγκριση των υψομετρικών δεδομένων με τα υπόλοιπα διαθέσιμα DEM (ASTER, SRTM, EU-DEM). Διαπιστώθηκε ότι το SRTM βρίσκεται πιο «κοντά» στις τιμές του dem του κτηματολογίου, οπότε επιλέχθηκε αυτό σαν επιπρόσθετη πληροφορία υψομέτρου. Από τον τοπογραφικό χάρτη της Γ.Υ.Σ. χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα υψομετρικά σημεία.

- Για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και χρησιμοποιώντας ως εισόδους (σε κατάλληλη μορφή, πχ ισουψείς ή σημεία) το SRTM DEM και κάποια υψομετρικά σημεία από GPS χειρός για τις προβληματικές περιοχές, το dem κτηματολογίου για τις άλλες, καθώς και την επικαιροποιημένη ακτογραμμή κατασκευάστηκε μέσω interpolation ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Λόγω του Interpolation το παραπάνω σε περιοχές μεγάλης κλίσης είχε σχετικά σημαντικές διαφορές από το αρχικό (+- 10 μέτρα) ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης οι διαφορές ήταν αμελητέες (μ.ο. για όλη την περιοχή μελέτης 0.4 μέτρα).

- Για την υλοποίηση του τελικού DEM το παραπάνω υπολογισμένο DEM χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κάλυψη των προβληματικών περιοχών (1.5% της συνολικής περιοχής ενώ για τις υπόλοιπες χρησιμοποιήθηκε το αρχικό DEM του κτηματολογίου.

Η διαδικασία υλοποίησης του **διορθωμένου DEM** απεικονίζεται στο σχήμα 4-1, ενώ το πλήρες ψηφιακό μοντέλο εδάφους παρουσιάζεται στο Υπόμνημα.



Σχήμα 4-1: Συλλογή πρωτογενών δεδομένων και συνδυασμός τους για την δημιουργία ενός επικαιροποιημένου DEM.

4.1.2 Γεωλογία περιοχής

Ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (Theodoropoulos, 1979a, 1979b) κλίμακας 1:50.000 διατίθεται σε δύο φύλλα. Αυτά εισήχθησαν σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., γεωαναφέρθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί. Μετά την ψηφιοποίηση πραγματοποιήθηκε έλεγχος της τοπολογίας των ψηφιοποιημένων γεωλογικών σχηματισμών αυτόματα (μέσω του εργαλείου ‘Fix Topology Error’ του Arc Map) αλλά και χειροκίνητα, ελέγχοντας προσεκτικά τις πολυγωνικές επιφάνειες και πραγματοποιώντας διορθώσεις όπου ήταν απαραίτητο. Ο ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης αποθηκεύτηκε στη γεωβάση, και παρουσιάζεται αναλυτικά στο υπόμνημα.

4.1.3 Χρήσεις γης

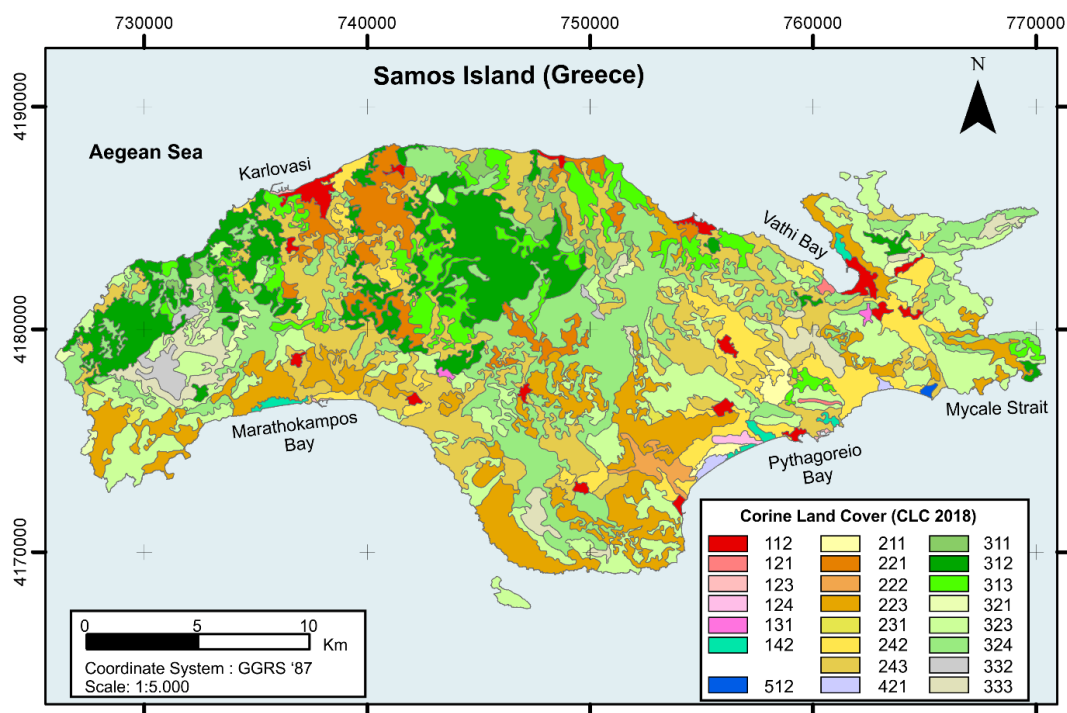
Οι **χρήσεις γης** είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις διεργασίες σχηματισμού των εδαφών, της διάβρωσης και των πλημμυρών (Jain & Das, 2010) και για αυτό το λόγο έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς κατά το παρελθόν σε διάφορα μοντέλα εκτίμησης τους με πιο γνωστές τις εξισώσεις **USLE & RUSLE** (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1997). Οι χρήσεις γης είναι εξαιρετικά ευμετάβλητες με το χρόνο ειδικά στις Μεσογειακές περιοχές, και η μελέτη της κατανομής τους δεν είναι απλή υπόθεση ειδικά όταν εξετάζουμε μια εκτεταμένη περιοχή. Υπάρχουν διάφορες βάσεις δεδομένων από τις οποίες προκύπτουν οι χρήσεις γης για μια περιοχή, η πιο γνωστή εκ των οποίων είναι το **“Corine Land Cover”** το οποίο χρησιμοποιεί δορυφορικές εικόνες για την ταξινόμηση τους σε 44 κατηγορίες. Το Corine χαρτογραφεί εκτάσεις οι οποίες έχουν μέγεθος τουλάχιστον 0.25km², η χωρική ακρίβεια που παρέχει είναι της τάξης των 100 μέτρων για γραμμικά φαινόμενα, ενώ ανανεώνεται κάθε έξι χρόνια με τελευταία έκδοση να είναι αυτή του 2018 (CLC, 2018).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ανακτήθηκαν τα δεδομένα από την τελευταία έκδοση του **CLC (2018)**. Μετά από την απαραίτητη **προεργασία** (αλλαγή προβολικού συστήματος και περικοπή της περιοχής μελέτης), διαπιστώθηκε ότι εξαιτίας της χωρικής κλίμακας των δεδομένων αυτά δε ταίριαζαν ακριβώς με την περιοχή μελέτης, ειδικά στην ακτογραμμή, και σε κάποιες περιπτώσεις είχαμε κενές περιοχές (λιγότερο από 1% της ολικής έκτασης). Για αυτές τις περιοχές δημιουργήθηκαν νέα πολύγωνα σε Γ.Σ.Π στα οποία αποδόθηκε η τιμή του κοντινότερου πολυγώνου του επιπέδου CLC 2018. για την περιοχή μελέτης. Από τις συνολικά 44 ομάδες χρήσεων γης που υπάρχουν για το CLC, στην περιοχή μελέτης συναντώνται οι 23 (Πίνακας 4-1).

Όπως διαπιστώνουμε όσον αφορά τις χρήσεις γης υπάρχει σημαντική **ποικιλομορφία** δεδομένου και του μεγέθους της περιοχής μελέτης. Στην περιοχή συνυπάρχουν μεγάλες εκτάσεις χαμηλής βλάστησης (σκληροφυλλική βλάστηση σε ποσοστό ~16%), δασώδεις περιοχές που καλύπτουν το 18.1% της περιοχής μελέτης (κυρίως κωνοφόρα δέντρα) και μεταβατικές περιοχές μεταξύ των δυο προηγούμενων τύπων σε ποσοστό 17.5%. Το υπόλοιπο 48% της Σάμου χρησιμοποιείται κυρίως για αγροτικές δραστηριότητες (είτε καλλιεργήσιμες εκτάσεις είτε με τη μορφή ελαιώνων ή αμπελώνων). Περιοχές με ελάχιστη ή καθόλου δεν είναι συχνές και απαντώνται κυρίως στα υψηλότερα σημεία του όρους Κερκετέα στα δυτικά.

Πίνακας 4-1: Οι χρήσεις γης στο νησί της Σάμου (CLC, 2018)

CLC CODE	Περιγραφή (CLC 2018)	Έκταση km ²	Κάλυψη %
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	8.4	1.75
121	Βιομηχανικές & εμπορικές ζώνες	0.6	0.12
123	Ζώνες λιμένων	0.4	0.08
124	Αεροδρόμιο	0.8	0.16
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0.5	0.11
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	2.2	0.45
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	2.9	0.60
221	Αμπελώνες	19.9	4.16
222	Οπωροφόρα δένδρα	3.1	0.66
223	Ελαιώνες	59.7	12.50
231	Βοσκότοποι	0.7	0.14
242	Σύνθετες καλλιέργειες	27.4	5.73
243	Καλλιέργειες μαζί με φυσική βλάστηση	82.1	17.19
311	Δάσος πλατυφύλων	6.5	1.36
312	Δάσος κωνοφόρων	53.9	11.28
313	Δάσος Μεικτό	26.2	5.49
321	Λιβαδικές εκτάσεις	2.7	0.57
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	77.1	16.15
324	Μεταβατικές δασώδεις – θαμνώδεις εκτάσεις	83.5	17.49
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	3.7	0.77
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	14.2	2.97
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.9	0.19
512	Υδάτινες μάζες χερσαίων υδάτων	0.3	0.06



Σχήμα 4-2: Χρήσεις γης και η έκταση που καταλαμβάνουν στο νησί της Σάμου (για την αντιστοιχία των κωδικών με τις χρήσεις γης, βλέπε Πίνακα 4-1 (δεδομένα από CLC 2018)).

4.1.4 Δορυφορικές εικόνες

Οι χρήσεις γης μεταβάλλονται ταχύτατα με τον χρόνο και επιπλέον η χωρική ανάλυση των δεδομένων CLC 2018 είναι σχετικά μικρή, όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για αυτό το λόγο σε κάποια από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιείται ένας δείκτης βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) που παράγεται από δορυφορικές εικόνες. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα **Sentinel-2**. Επιλέχθηκαν 12 πρόσφατες συνεχόμενες (όπου ήταν δυνατό), δορυφορικές εικόνες επιπέδου-2, οι οποίες εμπεριέχουν ατμοσφαιρική διόρθωση, για την περιοχή μελέτης, μια για κάθε μήνα με γνώμονα την ελάχιστη δυνατή νεφοκάλυψη, καλύπτοντας την περίοδο του τελευταίου έτους έως και τον Απρίλιο του 2020. Σε περιβάλλον GIS έγινε η σύνθεση τους ώστε να προκύψει μια μέση τιμή για κάθε σημείο της περιοχής μελέτης, όπως θα αναλυθεί στη μεθοδολογία. Για την χωρική ακρίβεια των δέκα μέτρων τα δεδομένα που παρέχονται, περιέχουν 4 κύριες φασματικές ζώνες (κανάλια: 2,3,4,8) από τις οποίες για την εξαγωγή του δείκτη NDVI, ο οποίος ανήκει στα δευτερογενή δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν οι ζώνες 4 (RED) και 8 (IR). Οι εικόνες που ανακτήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2

Πίνακας 4-2: Δορυφορικές εικόνες Sentinel οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη NDVI.

** Μήνες για τους οποίους δεν υπήρχε διαθέσιμη εικόνα χωρίς σημαντική νεφοκάλυψη στο διάστημα 05-2019 έως 04-2020 και χρησιμοποιήθηκε κάποια άλλη εικόνα από κοντινή ημερομηνία ή παλιότερη χρονιά.*

Μήνας	Ημερομηνία λήψης	Πλήρες όνομα
Ιανουάριος	13-01-2020	S2B_MSIL2A_20200113T090229_N0213_R007_T35SMB..
Φεβρουάριος	17-02-2020	S2A_MSIL2A_20200217T090031_N0214_R007_T35SMB..
Μάρτιος	18-03-2020	S2A_MSIL2A_20200318T085701_N0214_R007_T35SMB..
Απρίλιος	17-04-2020	S2A_MSIL2A_20200417T085601_N0214_R007_T35SMB..
Μάιος*	28-04-2019	S2B_MSIL2A_20190428T085559_N0211_R007_T35SMB..
Ιούνιος	07-06-2019	S2B_MSIL2A_20190607T085609_N0212_R007_T35SMB..
Ιούλιος	22-07-2019	S2A_MSIL2A_20190722T085601_N0213_R007_T35SMB..
Αύγουστος	21-08-2019	S2A_MSIL2A_20190821T085601_N0213_R007_T35SMB..
Σεπτέμβριος	15-09-2019	S2B_MSIL2A_20190915T085559_N0213_R007_T35SMB..
Οκτώβριος	30-10-2019	S2A_MSIL2A_20191030T090111_N0213_R007_T35SMB..
Νοέμβριος*	14-11-2018	S2A_MSIL2A_20181114T090221_N0210_R007_T35SMB...
Δεκέμβριος	09-12-2019	S2A_MSIL2A_20191209T090351_N0213_R007_T35SMB..

4.1.5 Ιστορικό πλημμυρών

Καθώς οι πλημμύρες είναι καταστροφές οι οποίες δεν εμφανίζονται τακτικά στον χρόνο και μπορεί να χρειαστούν ακόμα και δεκαετίες για την επανεμφάνιση μιας πλημμύρας μεγάλου μεγέθους, έγινε μια καταγραφή των ιστορικών πλημμυρών των τελευταίων είκοσι ετών . Συγκεντρώθηκαν στοιχεία από την Πυροσβεστική υπηρεσία, τον τύπο και κατοίκους, δημιουργήθηκε μια λίστα με **πλημμυρικά γεγονότα στην περιοχή όπως** φαίνεται στον Πίνακα 4-3. Παρατηρούμε συχνή επανεμφάνιση γεγονότων στις ίδιες περιοχές (Μαραθόκαμπος,Καρλόβασι,Ηραίο κ.α).

Πίνακας 4-3: Αρχείο πλημμυρικών γεγονότων στη νήσο Σάμο.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ
ΚΑΡΛΟΒΑΣΙ ΣΑΜΟΥ	10-11-2001
ΚΑΡΛΟΒΑΣΙ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΗΡΑΙΟ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΠΥΡΓΟΣ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΚΟΚΚΑΡΙ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΒΑΘΥ ΣΑΜΟΥ	28-11-2001
ΚΑΡΛΟΒΑΣΙ ΣΑΜΟΥ*	30-10-2003
ΒΑΘΥ ΣΑΜΟΥ	22-01-2004
ΠΥΘΑΓΟΡΕΙΟ ΣΑΜΟΥ	22-01-2004
ΧΩΡΑ ΣΑΜΟΥ	22-01-2004
ΧΩΡΑ ΣΑΜΟΥ	18-01-2010
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ ΣΑΜΟΥ	18-01-2010
ΜΥΤΙΛΗΝΙΟ ΣΑΜΟΥ	18-01-2010
ΜΕΣΟΚΑΜΠΟΣ ΣΑΜΟΥ	18-01-2010
ΗΡΑΙΟ ΣΑΜΟΥ	18-01-2010
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ ΣΑΜΟΥ*	11-10-2011
ΗΡΑΙΟ ΣΑΜΟΥ	09-03-2013
ΒΑΘΥ ΣΑΜΟΥ	13-11-2014
ΚΟΚΚΑΡΙ ΣΑΜΟΥ	24-01-2019
ΗΡΑΙΟ ΣΑΜΟΥ	24-01-2019
ΑΓΙΑ ΚΥΡΙΑΚΗ ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΥ	16-02-2020
ΛΙΜΝΙΩΝΑΣ ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΥ	16-02-2020
ΚΑΛΛΙΘΕΑ	16-02-2020

4.1.6. Κλιματολογικά δεδομένα

Από την ΕΜΥ ανακτήθηκαν δεδομένα για το νησί της Σάμου τα οποία καλύπτουν την περίοδο από τον Απρίλιο του 1978 έως και τον Δεκέμβριο του 2019. Τα δεδομένα που ανακτήθηκαν περιλαμβάνουν ημερήσιες τιμές της **βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας** για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο σταθμός της Σάμου βρίσκεται στο Αεροδρόμιο κοντά στο Πυθαγόρειο και το Ηραίο (γεωγραφικό πλάτος: 37.69 ° N, γεωγραφικό μήκος 26.92 ° E, ύψος 6 μέτρα). Τα δεδομένα της βροχόπτωσης είχαν κάποια προβλήματα κατά την περίοδο 2014-2017, κατά τη διάρκεια των οποίων εμφανίστηκαν κάποιες ημέρες χωρίς μετρήσεις. Για τις προβληματικές εγγραφές, οι οποίες είναι αμελητέες σε αριθμό, έγινε διόρθωση χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (και του meteo.gr) ο οποίος βρίσκεται στο Καρλόβασι σε χώρο του Πανεπιστημίου Αιγαίου, σε υψόμετρο 10 μέτρα, γεωγραφικό πλάτος 37.79° N και γεωγραφικό μήκος 26.68° E. Τα δεδομένα ανακτήθηκαν μετά από προσωπική επικοινωνία με τους συνεργάτες του ΕΑΑ κ. Λαγουβάρδο και κ. Βουγιούκα. Ο σταθμός ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2008 και παρέχει δεδομένα με μεγάλη χρονική ακρίβεια.

4.1.7 Ένταση διάβρωσης εξαιτίας της βροχής (Παράγοντας R)

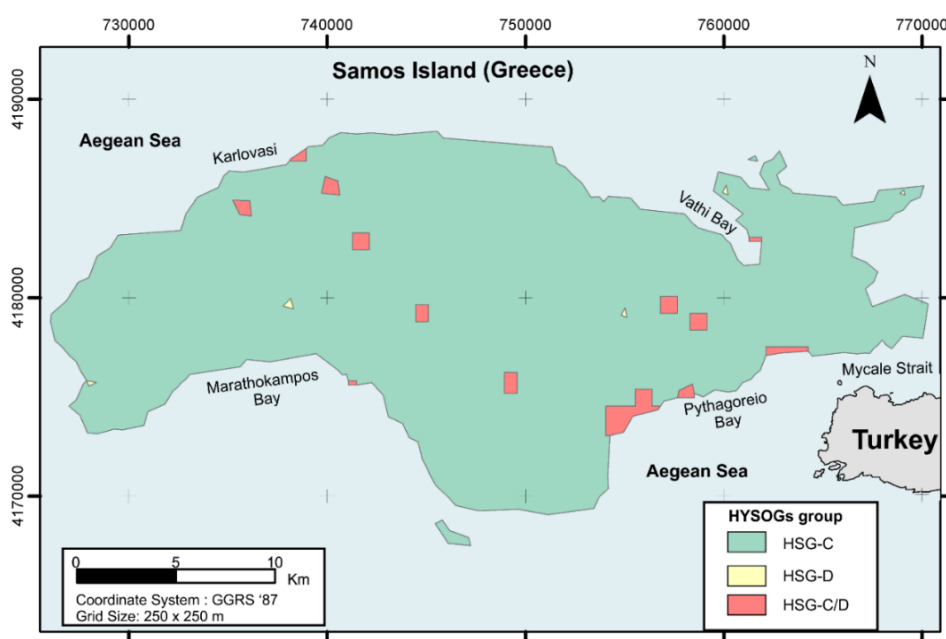
Για την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE, το οποίο εντάσσεται στις παραδοσιακούς τρόπους εκτίμησης της διάβρωσης και υπολογίστηκε, απαιτείται ένας παράγοντας που καθορίζει την **ένταση της διάβρωσης εξαιτίας της βροχής**. Αυτό ο παράγοντας δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί, αλλά έχει υπολογιστεί για ολόκληρο τον κόσμο (με χωρική ανάλυση 1km x 1km), χρησιμοποιώντας 3,625 σταθμούς βροχόπτωσης, από το “European Soil Data Centre – ESDAC” (Panagos et al., 2017). Έτσι και καθώς για την περιοχή μελέτης έχουμε μόνο ένα βροχομετρικό σταθμό με δεδομένα μακράς διάρκειας (>30 έτη) αποφασίστηκε η ανάκτηση και η χρήση της βάσης δεδομένων του “ESDAC” για την εκτίμηση του παράγοντα βροχόπτωσης, μετά από επεξεργασία των δεδομένων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. όπως περιγράφεται στη μεθοδολογία.

4.1.8 Υδρολογική ομάδα Εδάφους (Hydrologic Soil Groups)

Για την εκτίμηση του συντελεστή Curve Number (CN) της μεθόδου SCS, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, πρέπει να γνωρίζουμε την **υδρολογική ομάδα του εδάφους** η οποία χωρίζεται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες (USDA, 2009; Ross et al., 2018):

- HSG-A. Περιέχει >90% άμμο, <10% άργιλο και παρουσιάζει πολύ μικρό δυναμικό επιφανειακής απορροής.
- HSG-B. Περιέχει 50%-90% άμμο, 10-20% άργιλο και έχει μικρό δυναμικό απορροής.
- HSG-C. Περιέχει <50% άμμο, 20-40% άργιλο και έχει μεγάλο δυναμικό απορροής.
- HSG-D. Περιέχει <50% άμμο, >40% άργιλο και έχει πολύ μεγάλο δυναμικό απορροής.

Καθώς τέτοια δεδομένα για ολόκληρη την περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν διαθέσιμα, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων HYSOGs250m (Ross et al., 2018) η οποία παρέχει δεδομένα για ολόκληρο τον κόσμο με χωρική ανάλυση 250 x 250m. Τα δεδομένα εισάχθηκαν σε περιβάλλον Γ.Σ.Π, επεξεργάστηκαν ώστε να απομονωθεί η περιοχή μελέτης και αναλύθηκαν ώστε να αναγνωριστούν οι ομάδες. Εκτός από τις τέσσερις βασικές ομάδες η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιλαμβάνει άλλες τέσσερις ομάδες για εδάφη τα οποία είναι υγρά εξαιτίας υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε μικρό βάθος (<0.6m), οι οποίες χαρακτηρίζονται ως HSG-x/D, όπου x= [A,B,C,D], και έχουν όλα πολύ μεγάλο δυναμικό απορροής εκτός εάν αποστραγγίζονται.



Σχήμα 4-3: Οι υδρολογικές ομάδες εδάφους, σύμφωνα με το HYSOGs250m (Ross et al., 2018)

Χρησιμοποιώντας τα πρωτογενή δεδομένα, τα οποία ανακτήθηκαν με διάφορους τρόπους, όπως προαναφέρθηκε, υπολογίζουμε κάποια απαραίτητα δευτερογενή δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την γενικότερη περιγραφή της περιοχής μελέτης, αλλά και για τον υπολογισμό της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου. Ο τρόπος υπολογισμού τους ακολουθεί, ενώ οι δευτερογενείς παράμετροι όπως υπολογίστηκαν για το νησί της Σάμου παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

4.2 Τοπογραφικές παράμετροι

Από την επεξεργασία του ΨΜΕ προέκυψαν οι **δευτερογενείς τοπογραφικές παράμετροι**. Αυτές περιλαμβάνουν κλασσικούς δείκτες όπως η κλίση, ο προσανατολισμός της κλίσης, ο παράγοντας LS και ο δείκτης TWI καθώς και δείκτες νέας γενιάς όπως ο ‘HAND’ και ο ‘DUNE’ οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.

4.2.1 Κλίση

Η **κλίση** μπορεί να θεωρηθεί ως η πρώτη παράγωγος του υψόμετρου και υπολογίζεται μέσω του τύπου: $S = \sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}$, όπου S η κλίση, και z το υψόμετρο για δεδομένο x,y ενός σημείου στο χώρο, ενώ μπορεί να μετράται σε επί τοις εκατό (%) ή σε μοίρες (Dixon & Udammeri, 2016). Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού των κλίσεων (Hickey, 2000), οι περισσότερες εκ των οποίων υπολογίζουν μια **μέση τιμή για κάθε κυψελίδα**, χρησιμοποιώντας από ένα παράθυρο 3x3 είτε οκτώ κυψελίδες είτε 4 κυψελίδες (Zevenberger & Thorne, 1987; Fairfield & Leymarie; 1991, Burrough & McDonell, 1998), μεθοδολογίες οι οποίες υστερούν στον υπολογισμό των κλίσεων σε κορυφές και τοπικές βυθισεις. Εναλλακτικά υπολογίζεται η **μέγιστη κλίση** (μέγιστη κλίση από ή προς την κεντρική κυψελίδα), μέθοδος η οποία οδηγεί σε υπερεκτίμηση της κλίσης η οποία μπορεί να επηρεάσει τα μοντέλα μας (Shanholtz et al., 1990), ενώ μια άλλη βελτιωμένη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την οποία υπολογίζεται η μέγιστη κλίση προς τα κατάντι (Hickey et al., 1994). Όλες οι μεθοδολογίες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και εναπόκειται στον ερευνητή πια θα χρησιμοποιήσει (Dunn & Hickey, 1998). Στην περίπτωση μας υπολογίζουμε την κλίση μέσω του SAGA GIS, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Zevenberger & Thorne (1987), μέθοδος η οποία εξομαλύνει

τις κλίσεις, αλλά σε μικρότερο βαθμό από άλλες μεθόδους που ανήκουν στην ίδια κατηγορία (Shary et al., 2002; Hengl & Evans, 2009), χρησιμοποιώντας ως βάση το διορθωμένο DEM.

Για την οπτικοποίηση των κλίσεων χρησιμοποιήθηκαν τα εύρη που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της **ταξινόμησης των δυνατοτήτων της γέρσου (Land Capability Classification – LCC;** Klingebiel & Montgomery, 1961). Αυτή η ταξινόμηση έχει σχεδιαστεί κυρίως για την ταξινόμηση της γης σε κλάσεις ανάλογα με τις δυνατότητες της παραγωγής του εδάφους και τυγχάνει ευρείας χρήσης σε παγκόσμιο επίπεδο, στις Ευρωπαϊκές περιοχές (Eliasson, 2007) αλλά και στις περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο (π.χ. Cocsun & Turan, 2016; Mahmoud et al., 2019). Μια από τις παραμέτρους που συνεκτιμά η συγκεκριμένη ταξινόμηση είναι η επικινδυνότητα διάβρωσης του εδάφους η οποία βασίζεται στην τοπογραφική κλίση (Emery, 1986; ΟΕΗ, 2012), και σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους μπορεί να εκτιμηθεί η υδρολογική κατάσταση του εδάφους και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η οπτικοποίηση της μέσω αυτής της ταξινόμησης.

4.2.2 Παράγοντας κλίσης και μήκους κλίσεως (LS factor)

Το **μήκος της κλίσης και η γωνία κλίσης** επηρεάζουν τη διάβρωση του εδάφους. Τα δυο μεγέθη χρησιμοποιούνται ξεχωριστά ή συνδυάζονται στον δείκτη LS ο οποίος μπορεί να μετρηθεί με διάφορες μεθοδολογίες σε περιβάλλον GIS (Moore & Wilson, 1992; Desmet & Govers, 1996, Boehner & Selige, 2006). Στην πιο απλοποιημένη του μορφή (Moore & Wilson, 1992) υπολογίζεται με τη βοήθεια της συνεισφέρουσας περιοχής στα ανάντι (A_s σε μέτρα) και την κλίση θ σε radians:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m (\sin\theta / 0.0896)^n$$

όπου $m=0.4-0.56$ και $n=1.2-1.3$ (για μήκος κλίσης <100 μέτρα και κλίση $<14^\circ$).

Οι περισσότερες σύγχρονες μέθοδοι χρησιμοποιούν τη συνεισφέρουσα περιοχή (και όχι το μήκος κλίσης) για τον υπολογισμό (π.χ. Desmet & Govers, 1996; Winchel et al., 2008; Rodriguez & Suarez (2012). Ο δείκτης LS είναι πολύ διαδομένος καθώς χρησιμοποιείται από την αναθεωρημένη γενική εξίσωση διάβρωσης (RUSLE). Δίνει μια ένδειξη για το δυναμικό διάβρωσης της περιοχής (Van Remortel et. Al., 2004), και λαμβάνει τιμές που έχουν ως μονάδα βάσης μια κλιτύ 5 μοιρών με μήκος κλίσης 22.13 μέτρα. Ο δείκτης αυτός έχει υπολογιστεί για όλη της Ευρώπη (Panagos et al., 2015) για ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 25x25 μέτρα. Το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές τιμές (<1) ενώ στις ορεινές περιοχές έχουμε τιμές 5 έως 10 και σε κάποιες περιοχές

(π.χ. Άλπεις ακόμα μεγαλύτερες). Όσον αφορά τον Ελληνικό χώρο έχει μια από τις 3 μεγαλύτερες μέσες τιμές σε όλη την Ευρώπη (3.79).

Όπως και όλοι οι δείκτες επηρεάζεται από το DEM που χρησιμοποιούμε και πιο συγκεκριμένα από τη χωρική του ανάλυση, αλλά βλέπουμε ότι για DEM με μέγεθος κυψελίδας από 30 μέτρα και κάτω οι διαφοροποιήσεις είναι σχετικά μικρές (Raj et al., 2018). Για την περιοχή μελέτης ο δείκτης υπολογίστηκε μέσω του SAGA GIS (Module LS Factor) με βάση το DEM που είχαμε στη διάθεση μας ανάλυσης 5x5 μέτρων και τη μέθοδο των Desmet & Govers, 1996 η οποία μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα σε περιοχές με μεγάλες αυξομειώσεις της μορφολογίας.

4.2.3 Προσανατολισμός κλίσεων

Η **διεύθυνση προς την οποία βλέπουν οι κλιτύς** είναι σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό των υδρολογικών συνθηκών σε μια περιοχή, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Υπολογίζονται με βάση το διορθωμένο ΨΜΕ, μέσω του SAGA GIS και της βιβλιοθήκης Terrain Analysis -> Module Aspect. Σε περιοχές με μηδενική κλίση δεν ορίζεται ο προσανατολισμός, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές λαμβάνει τιμές 0 έως 360°. Οι τιμές αυτές ομαδοποιούνται σε 8 κλάσεις και παράγεται ο τελικός χάρτης ο οποίος παρατίθεται στα αποτελέσματα.

Στην περιοχή μελέτης οι ηλιόλουστες πλαγιές είναι αυτές που βλέπουν κατά κύριο λόγο προς το Νότο, και δευτερευόντως προς Νοτιοανατολικά και Νοτιοδυτικά. Οι πλαγιές που βλέπουν προς Ανατολή και Δύση έχουν μικρή ηλιοφάνεια ενώ οι βορεινές πλαγιές είναι σκιασμένες κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρα, οπότε και αναμένετε να έχουν μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας. Επιπλέον λόγω της μορφολογίας και των επικρατούντων ανέμων υπάρχουν κλιματικές διαφοροποιήσεις οι οποίες επηρεάζουν τις διεργασίες της διάβρωσης και των πλημμυρών, όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

4.2.4 Τοπογραφικός δείκτης TWI (Topographic Wetness Index)

Η τοπογραφία επηρεάζει άμεσα την χωρική κατανομή των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή. Επηρεάζει τα ποσοστά **υγρασίας του εδάφους**, ενώ ταυτόχρονα η ροή του υπόγειου νερού πολύ συχνά ακολουθεί της τοπογραφία (Burt & Butcher, 1986; Seibert et al., 1997; Zinko et al., 2005). Πολλοί τοπογραφικοί δείκτες μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τα χωρικά μοτίβα της υγρασίας του εδάφους (Moore et al., 1991). Ο δείκτης **TWI** αναπτύχθηκε στα πλαίσια του υδρολογικού μοντέλου TOPMODEL (Beven&Kirkby,1979), αλλά βελτιώθηκε αργότερα (π.χ. Barling et al., 1994) και τυγχάνει ευρείας χρήσης σε υδρολογικά μοντέλα και σε μελέτες διάβρωσης (π.χ. Arnold et al., 1998; Sharma, 2010; De Risi et al., 2015; Motevalli & Vafakhah,2016; Mhired et al., 2019). Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο λογάριθμος του εμβαδού της περιοχής στα ανάντι προς την εφαιπτομένη της κλίσης στο σημείο που μελετάμε (σε radians):

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\tan b} \right)$$

ενώ ο δείκτης δεν έχει μονάδες μέτρησης.

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του TWI οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο υπολογισμού της ανάντι περιοχής, της κλίσης αλλά και του υδρογραφικού δικτύου (π.χ. Quinn et al., 1995, Tarboton, 1997. Δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να είναι η καλύτερη, αλλά εξαρτάται από την περιοχή ποια μέθοδος θα δουλέψει καλύτερα. Παρόλαυτα φαίνεται ότι η μέθοδος του Tarboton δίνει καλύτερα αποτελέσματα από κάποιες άλλες μεθόδους και έχει εφαρμογή σε περισσότερες περιοχές (Guntner,2004; Sorensen et al., 2006)

Μέσα από τον TWI έχουμε μια εκτίμηση της χωρικής κατανομής της **υγρασίας** του εδάφους, του **κορεσμού του εδάφους** και συνεπακόλουθα της επιφανειακής απορροής η οποία επηρεάζει την διάβρωση. Οι τιμές που παίρνει ο δείκτης εξαρτώνται από την μορφολογία και την χωρική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, ενώ μπορεί να λάβει και αρνητικές τιμές σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις εξαιτίας του λογάριθμου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό. Περιοχές με μεγάλη κλίση έχουν χαμηλές τιμές TWI (χαμηλή υγρασία εδάφους) ενώ οι επίπεδες περιοχές έχουν μεγάλες τιμές. Η ερμηνεία του δείκτη είναι σχετική και απλά δείχνει ποιες περιοχές έχουν μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας σε σχέση με άλλες (και όχι πόσο μεγαλύτερα). Ο δείκτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος καθώς θέτοντας μια τιμή κατωφλίου TWI, με βάση την χωρική ανάλυση των δεδομένων μας, την τοπογραφία και τις υποδομές της περιοχής, μπορούμε να εκτιμήσουμε τις περιοχές οι οποίες είναι πιο επιρρεπείς και ευάλωτες σε πλημμύρες. Το κατώφλι είναι δυνατόν να καλιμπραριστεί αφού πρώτα σκαγραφήσουμε τις πλημμυρικές περιοχές (με εργασίες υπαίθρου ή χρήση αεροφωτογραφιών/δορυφορικών εικόνων) για κάποια σημεία της περιοχής μελέτης (Manfreda et al., 2011; Jalayer et al., 2014). Ο δείκτης TWI υπολογίστηκε μέσω του SAGA GIS μέσω του ομώνυμου εργαλείου “Topographic Wetness Index”.

4.2.5 Μοντέρνοι τοπογραφικοί δείκτες : HAND, DUNE , lnHAND, rDUNE

Από τα διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά της χέρσου, το κυριότερο χαρακτηριστικό που επηρεάζει άμεσα την επιφανειακή απορροή του νερού είναι οι κλιτύς των βουνών. Έτσι για να περιγράψουμε τη δημιουργία της απορροής για μια ολόκληρη υδρογραφική λεκάνη θα πρέπει να εξετάσουμε αρχικά τις συνθήκες στις κλιτύς, και πιο συγκεκριμένα πιο είναι το **ενεργειακό δυναμικό**, ως προς την απορροή, σε αυτές (Loritz et al., 2019). Το ενεργειακό δυναμικό εξαρτάται από τα κατακρημνίσματα αλλά και την κινητική ενέργεια του νερού, ως εξάρτηση της κλίσης ενώ υπάρχουν και απώλειες εξαιτίας των τριβών κατά μήκος της ροής . Έχει παρατηρηθεί μάλιστα ότι οι **τριβή** παίζει σημαντικό ρόλο, και σε κάποιες περιπτώσεις μόνο το 0.5% του ολικού δυναμικού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια (Kleidon et al., 2013). Όσον αφορά το **δυναμικό της περιοχής** αυτό καθορίζεται από την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο σημείο που μελετάμε και το σημείο στο οποίο σχηματίζεται γραμμική ροή (Raats, 1973) καθώς και από το χωρο-χρονικό μοτίβο της βροχόπτωσης σε μια περιοχή (Bloschl&Sivapalan, 1995). Το δυναμικό αυτό μπορεί να εκτιμηθεί ως :

$$J_{pot} = P_i A_i \rho g h_i \quad (1)$$

Όπου A_i το εμβαδό της κυψελίδας (m^2), P_i το ύψος βροχόπτωσης σε σχέση με το χρόνο (m/s), ρ η πυκνότητα του νερού (kg/m^3), g η παγκόσμια σταθερά και h η υψομετρική διαφορά προς κάποιο σημείο.

Για μικρές λεκάνες (<50 km^2), όπως στην περιοχή μελέτης , μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η **απορροή κυριαρχείται από τις διαδικασίες που συμβαίνουν στις πλαγιές**, δηλαδή ότι η κίνηση του νερού εντός της κοίτης δε παίζει τόσο σημαντικό ρόλο για τη δημιουργία της απορροής (Kirkby, 1976; Robinson et al., 1995) και έτσι να εκτιμήσουμε το δυναμικό απορροής υπολογίζοντας μόνο την υψομετρική διαφορά από μια κυψελίδα μέχρι κάποιο σταθερό σημείο.

Ο **HAND (Height Above the Nearest Drainage)** είναι ένας δείκτης (ή **τοπογραφικό μοντέλο**) **τελευταίας γενιάς** (Renno et al. 2008; Nobre et al., 2011), και έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια σε αρκετές έρευνες που αφορούν το γεωπεριβάλλον, ενώ μπορεί να οριστεί και ως “ένα DEM κανονικοποιημένο ως προς την απορροή”, καθώς ο άξονας του z λαμβάνει ως τιμή την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην εξεταζόμενη κυψελίδα και το σημείο κατά μήκος διεύθυνσης ροής στο οποίο θεωρούμε ότι σχηματίζεται ροή εντός καναλιού. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να ορίσουμε μια τιμή κατωφλίου για το εμβαδό της ανάντι περιοχής για την οποία θεωρούμε ότι σχηματίζεται ροή εντός κοίτης.

Ανάμεσα στους διάφορους μορφολογικούς δείκτες ο συγκεκριμένος θεωρείται ίσως ο καλύτερος για την αναγνώριση των συνθηκών υγρασίας στο έδαφος αλλά και της παρουσίας ή όχι υπόγειου νερού. Έτσι ο δείκτης έχει πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, μεταξύ των οποίων η **γεωμορφολογική / υδρολογική ανάλυση μιας περιοχής** (Gharari et al., 2011; Nobre et al., 2016; Owusu et al., 2017), την ανάλυση του πλημμυρικού κινδύνου (Young & Nobre, 2012; Martinis et al., 2015; Policelli et al., 2016; Sharma et al., 2017), τη ψηφιακή χαρτογράφηση του εδάφους (Zeng et al., 2016) που μπορεί να μας διευκολύνει για την εκτίμηση και της επικινδυνότητας διάβρωσης.

Για την επιφανειακή ροή οι απώλειες κινητικής ενέργειας εξαρτώνται από την τραχύτητα του εδάφους που οφείλεται στην μικρο-τοπογραφία, τα χαρακτηριστικά του εδάφους (υφή, πάχος, προυπάρχουσα υγρασία) αλλά και τη βλάστηση στην περιοχή (Howard, 1990; Hergarten et al., 2014). Η δυσκολία στον υπολογισμό των απωλειών έγκειται στο γεγονός ότι οι παραπάνω αλλά και πολλές ακόμα παράμετροι μεταβάλλονται στο χώρο και το χρόνο και έτσι είναι δύσκολος ο υπολογισμός τους ειδικά όταν μελετάμε μια ολόκληρη λεκάνη (Sivapalan, 2003). Παρόλαυτα οι απώλειες ενισχύονται όσο μεγαλώνει το μήκος της ροής (Rodriguez-Iturbe et al., 1992; Kleidon et al., 2013), και οι περισσότεροι ερευνητές θεωρούν ότι η απώλεια είναι αναλογική της απόστασης μέχρι το σημείο όπου αρχίζει η γραμμική ροή.

Έτσι η εξίσωση (1) μετατρέπεται σε :

$$\frac{J_{pot}}{l_i} = P_i A_i \rho g \frac{h_i}{l_i}$$

όπου l_i το μήκος της κλίσης μέχρι το κοντινότερο σημείο σχηματισμού γραμμικής ροής.

Στηριζόμενος στην παραπάνω εξίσωση δημιουργήθηκε ένας νέος δείκτης (Hjerdt et al., 2004), ο οποίος μοιάζει με τον TWI, και άλλους δείκτες που έχουν προταθεί για τη μελέτη της επίδρασης του συνδυασμού κλίσης και μήκους κλίσης στο υδρολογικό καθεστώς μιας περιοχής (McGuire et al., 2005; Harman & Sivapalan, 2009) και ονομάζεται “down slope topographic wetness index”. Στηριζόμενος σε αυτόν οι Loritz et al., 2019 προτείνουν το δείκτη **DUNE (Dissipation per Unit Length)**, ο οποίος δεν έχει μονάδες μέτρησης, εκφράζει τις απώλειες της κινητικής ενέργειας του νερού ή αλλιώς την τοπική υδραυλική κλίση για μια συγκεκριμένη μείωση υψομέτρου σε σχέση με το μήκος της κλίσης και εκφράζεται ως :

$$DUNE = \frac{h_i}{l_i}$$

Όπου h_i είναι το υψόμετρο που προκύπτει μετά την εφαρμογή του δείκτη HAND και l_i το μήκος της κλίσης μέχρι το κοντινότερο σημείο σχηματισμού γραμμικής ροής.

Οι συνηθισμένες τιμές του δείκτη DUNE είναι μεταξύ 0 και 1, ενώ υπάρχουν κάποιες περιοχές που πλησιάζει το 2 ή ακόμα μεγαλύτερες τιμές. Χαμηλές τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν υψηλές τιμές απωλειών κινητικής ενέργειας κατά μήκος της ροής, δηλαδή χαμηλό δυναμικό διάβρωσης και για αυτό ανιχνεύονται στα πεδινά. Αντίθετα υψηλές τιμές του δείκτη εκφράζουν περιοχές όπου το δυναμικό διάβρωσης είναι μεγαλύτερο, και οι απώλειες της ενέργειας είναι μικρές, εξαιτίας της μικρότερης απόστασης που ρέει το νερό και συνεπακόλουθα των μικρότερων απωλειών λόγω της τραχύτητας του εδάφους.

Για να είναι άμεσα συγκρίσιμος με τον TWI, αλλά και για να έχουμε πιο ομαλή κατανομή των τιμών και άρα πιο εύκολη ερμηνεία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων ο ίδιος ερευνητής (Loritz et al., 2019) προτείνει τη χρήση του **αρνητικού λογάριθμο** του δείκτη:

$$rDUNE = -\ln\left(\frac{h_i}{l_i}\right)$$

Ο δείκτης **rDUNE** λαμβάνει θετικές τιμές όταν το μήκος κλίσης είναι μεγαλύτερο του υψομέτρου σε σχέση με το κοντινότερο σημείο όπου σχηματίζεται γραμμική ροή και αρνητικές όταν είναι μικρότερο. Υψηλές τιμές του δείκτη δείχνουν μικρότερες απώλειες ενέργειας που μπορεί να οφείλονται σε υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφών της περιοχής, τις γεωλογικές συνθήκες (περιοχές με μάργες έχουν συνήθως υψηλότερες τιμές σε σχέση με περιοχές με πιο συμπαγή πετρώματα εξαιτίας του πιο έντονου υδρογραφικού δικτύου).

Ο υπολογισμός του HAND για την περιοχή μελέτης έγινε με τη βοήθεια της Arcpy, έχοντας ως βάση του κώδικα τον κώδικα των Rahmati et al., 2018, αλλά ελαφρώς τροποποιημένο ώστε να ταιριάζει με τα δεδομένα μας (DEM 5x5m, υδρογραφικό δίκτυο κ.α.). Επιπλέον το τροποποιημένο πρόγραμμα υπολογίζει το φυσικό λογάριθμο του HAND, τον DUNE αλλά και τον rDUNE.

4.3 Υδρολογικές λεκάνες & Υδρογραφικό δίκτυο

Αν και παλαιότερα οι υδρολογικές λεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο σχεδιάζονταν χειροκίνητα, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι οι οποίοι μπορούν, χρησιμοποιώντας μόνο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, να δημιουργήσουν αυτόματα πολύγωνα και γραμμές τα οποία αντιστοιχούν στις υδρολογικές λεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο.

Για την χαρτογράφηση των υδρογραφικών λεκανών αλλά και του υδρογραφικού δικτύου στη περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν αυτοματοποιημένες μέθοδοι στο λογισμικό SAGA GIS. Πριν από τη χαρτογράφηση τους απαιτούνται κάποια προαπαιτούμενα βήματα, και η κατασκευή νέων επιπέδων δεδομένων τα οποία είναι (Dixon & Udammeri, 2016) :

- **Αφαίρεση βυθισμάτων (Fill Sinks).** Ένα DEM πάντα περιέχει βυθίσματα της τοπογραφίας, τα οποία προκαλούν προβλήματα στον αλγόριθμο υπολογισμού της διεύθυνσης ροής του νερού, αυτά θα πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να δημιουργηθεί ένα ‘υδρολογικά ορθό’ DEM. Χρησιμοποιούμε την εργαλειοθήκη ‘Fill Sinks’ του SAGA GIS η οποία βασίζεται στην μέθοδο των Wang & Liu, 2006 για την δημιουργία ενός DEM χωρίς βυθίσματα.

- **Κατασκευή επιπέδου διεύθυνσης ροής (flow direction raster).** Αυτό το επίπεδο παρέχει πληροφορίες για την κατεύθυνση κίνησης του νερού, και υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για τον υπολογισμό του. Το επίπεδο αυτό για τα δεδομένα μας υπολογίζεται σε περιβάλλον SAGA GIS, μέσω της εργαλειοθήκης ‘Catchment Area’, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο D_{00} (Deterministic Infinity; Tarboton, 1997), η οποία πλεονεκτεί άλλων μεθόδων απεικονίζοντας πιο ρεαλιστικά την κίνηση του νερού.

- **Κατασκευή επιπέδου συσσώρευσης ροής (flow accumulation raster).** Σε αυτό το επίπεδο καταγράφεται ο αριθμός των κυψελίδων στα ανάντι τα οποία ρέουν προς μια κυψελίδα και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου. Υπολογίζεται έχοντας ως βάση το επίπεδο διεύθυνσης ροής και τιμές κοντά στον υδροκρίτη λαμβάνουν μηδενικές τιμές (Chang, 2006), ενώ το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζει υψηλές τιμές. Υπολογίζεται μέσω του SAGA GIS, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη “Flow Accumulation: Top Down” επιλέγοντας και πάλι τη μέθοδο D_{00} .

Με τη βοήθεια των παραπάνω επιπέδων και των εργαλείων “Channel Network” και “Watershed Basins” του SAGA GIS κατασκευάζονται οι υδρογραφικές λεκάνες αλλά και το υδρογραφικό δίκτυο της Σάμου, το οποίο μετά από σύγκριση με το υδρογραφικό δίκτυο του τοπογραφικού χάρτη 1:50.000 αλλά και δορυφορικών εικόνων φαίνεται να είναι κοντά

στην πραγματικότητα. Οι υδρολογικές λεκάνες ταξινομούνται με βάση το εμβαδό τους, καθώς είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη διάβρωση όσο και τη πλημμυρική επικινδυνότητα, ενώ το υδρογραφικό δίκτυο, ταξινομείται σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης κατά Strahler (Strahler, 1957).

4.3.1 Μορφομετρική ανάλυση υδρολογικών λεκανών

Η **μορφομετρική ανάλυση** μιας υδρολογικής λεκάνης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση των χαρακτηριστικών της τα οποία επηρεάζουν άμεσα την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων σε αυτή. Όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 2.3.5 οι μορφομετρικές παράμετροι όπως η υδρογραφική πυκνότητα, η κλίση του υδρογραφικού δικτύου ο λόγος του αναγλύφου (relief ratio) και άλλες αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμες παραμέτρους στην εκτίμηση των πλημμυρικών φαινομένων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών αλλά και των υπολεκανών τους με τη χρήση Γ.Σ.Π (Kotinas et al., 2018). Οι κυριότερες μορφομετρικές παράμετροι που επηρεάζουν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής (Zavoianou, 1985) αλλά και ο τρόπος υπολογισμού τους αναφέρεται αναλυτικά στον πίνακα 4-4. Ο τρόπος που αυτές επηρεάζουν της υδρολογικές συνθήκες μιας λεκάνης επιγραμματικά αναφέρεται παρακάτω (Zavoianou, 1985; Costa, 1987; Jahan et al., 2018):

- **Η επιφάνεια της υδρογραφικής λεκάνης** συνδυαζόμενη με τη μέση κλίση της λεκάνης επηρεάζουν το ρυθμό κατείσδυσης, το χρόνο συρροής (time of concentration) αλλά και την ποσότητα του νερού που ρέει επιφανειακά.

- **Η περίμετρος της λεκάνης**, ο αριθμός των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και το μήκος τους για κάθε τάξη (κατά Strahler), το μήκος της λεκάνης, το μήκος του κυρίως καναλιού καθώς και το μέσο και μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι πρωτογενείς μορφομετρικές παράμετροι που επηρεάζουν τις υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης, υπολογίζονται σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό δευτερογενών παραμέτρων.

- **Ο λόγος διακλάδωσης** (bifurcation ratio) περιγράφει το υδρογραφικό δίκτυο. Χαμηλές τιμές του είναι ενδεικτικές αυξημένου πλημμυρικού κινδύνου καθώς το νερό τείνει να συγκεντρώνεται σε ένα κανάλι. Συνηθισμένες τιμές είναι μεταξύ 3 και 5.

- **Η υδρογραφική πυκνότητα** (drainage density) καθορίζεται από την τοπογραφία, το κλίμα και την διαπερατότητα αλλά και ανθεκτικότητα των πετρωμάτων στη διάβρωση και είναι άμεσα συσχετιζόμενη με πλημμυρικές παροχές (Horton, 1945). Λεκάνες υψηλού

πλημμυρικού κινδύνου εμφανίζουν μεγάλες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας, οδηγώντας σε ταχεία συγκέντρωση των υδάτων στο υδρογραφικό δίκτυο (Paton & Baker, 1976) εξαιτίας αυξημένων κλίσεων, χαμηλής διαπερατότητας των πετρωμάτων και όχι έντονης βλάστησης (Patton & Baker, 1976).

- **Η υδρογραφική συχνότητα** (Horton, 1945) εξαρτάται από τη λιθολογία και αποτελεί μια ένδειξη της υφής του υδρογραφικού δικτύου στην περιοχή μελέτης.

- **Η υδρογραφική υφή** (texture) εξαρτάται από τη λιθολογία και το ανάγλυφο της περιοχής ενώ συνδυάζει την υδρογραφική συχνότητα και πυκνότητα σε ένα μέγεθος.

- **Το μήκος της επιφανειακής ροής** (length of overland flow) εκφράζει την απόσταση την οποία διασχίζει το νερό από την έναρξη της κίνησης του μέχρι το σημείο όπου αρχίζει να ρέει εντός μιας σχηματισμένης κοίτης. Είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον υπολογισμό του χρόνου συρροής.

- **Η κλίση του κυρίως κλάδου** συσχετίζεται με τη μέγιστη απορροή και μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Dempster (1983) όπου η κλίση υπολογίζεται για το τμήμα που βρίσκεται ανάμεσα στο 10% και 85% του μήκους του κυρίως καναλιού.

- Το **ανάγλυφο** της λεκάνης επηρεάζει τη κλίση του υδρογραφικού δικτύου, τη στερεομεταφορά αλλά και την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δυο δείκτες:

- **Λόγος αναγλύφου** (Relief Ratio; Schumm, 1956) ο οποίος είναι ενδεικτικός του ρυθμού μείωσης του υψομέτρου εντός της κοίτης και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του αναγλύφου ανάμεσα σε δυο λεκάνες.

- **Τραχύτητα** (Ruggedness Number; Melton, 1957) η οποία συνδυάζει το ανάγλυφο με την υδρογραφική πυκνότητα. Περιοχές με χαμηλό υψόμετρο και έντονο υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζουν ίδιες τιμές με περιοχές με έντονο ανάγλυφο αλλά όχι καλά αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο. Περιοχές με υψηλή τραχύτητα έχουν μεγάλο πλημμυρικό κίνδυνο.

- Δείκτες σχήματος λεκάνης. Το σχήμα της λεκάνης επηρεάζει άμεσα το χρόνο συρροής και τη μέγιστη απορροή. Συνήθως χρησιμοποιούνται 3 δείκτες:

- **Δείκτης επιμήκυνσης**, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος ενός κύκλου με εμβαδό ίσο με αυτό της λεκάνης, προς το μέγιστο μήκος της λεκάνης. Χαμηλές τιμές (<0.6) είναι ενδεικτικές επίμηκων λεκανών οι οποίες εμφανίζουν μικρότερο πλημμυρικό κίνδυνο.

- **Δείκτης κυκλικότητας**, είναι ένας δείκτης ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατείσδυσης και του χρόνου συρροής. Μεγάλες τιμές είναι ενδεικτικές κυκλικού σχήματος της λεκάνης και υψηλού πλημμυρικού κινδύνου.
- **Δείκτης σχήματος** (form factor). Αυτός ο δείκτης έχει άμεση σχέση με τη μέγιστη απορροή. Μεγάλες τιμές είναι ενδεικτικές υψηλών παροχών μικρής διάρκειας.
- **Ο χρόνος συρροής**, όπως έχει προαναφερθεί, είναι ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να ταξιδεψει από την πιο απομακρυσμένη περιοχή της λεκάνης μέχρι και το σημείο εκβολής, εκφράζοντας με αυτό τον τρόπο τον χρόνο που απαιτείται ώστε όλα τα σημεία της λεκάνης να συνεισφέρουν στην απορροή που παρατηρείται στην εκβολή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ελάχιστης διάρκειας μιας καταιγίδας ώστε να προκληθεί ένα πλημμυρικό φαινόμενο. Για μικρές λεκάνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Kirpich – Kerby (Russel et al., 2005), είτε να υπολογιστεί μέσω της μεθόδου SCS που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Όλοι οι παραπάνω δείκτες υπολογίζονται μέσω Γ.Σ.Π. και τις σχέσεις του Πίνακα 4-4 για επιλεγμένες λεκάνες και τις υπολεκάνες τους. Έπειτα χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου μέσω μοντέλων ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4-4: Οι σημαντικότερες μορφομετρικές παράμετροι υδρολογικών λεκανών και ο τρόπος υπολογισμού τους

Παράμετρος	Υπολογισμός	Αναφορά
Τάξη υδρ. κλάδου	U : GIS	Strahler (1952)
Εμβαδό λεκάνης (km ²)	A : GIS	
Περίμετρος λεκάνης (km)	P : GIS	
Αριθμός κλάδων τάξης u	N_u : GIS	Strahler (1952)
Μήκος κλάδων τάξης u (km)	L_u : GIS	Strahler (1952)
Μήκος λεκάνης (km)	L_b : GIS	
Μέγιστο υψόμ. λεκάνης (m)	H : GIS	
Μέσο υψόμ. λεκάνης (m)	H_m : GIS	
Μέση κλίση λεκάνης (°)	S : GIS	
Μήκος κυρίου κλάδου (km)	L : GIS	
Υψομετρική διαφορά (m)	$H = H - H_{min}$	Strahler (1952)
Λόγος διακλάδωσης	$R_b = N_u/N_u + 1$	Schumm(1956)
Υδρογραφική συχνότητα	$F_s = \Sigma N_u/A$	Horton(1932)
Υδρ. Πυκνότητα (km/km ²)	$D_d = \Sigma L_u/A$	Horton(1932)
Υφή	$T = D_d \times F_s$	Smith(1950)
Μήκος επιφανειακ ροής (km)	$Lg = A/2L_u$	Horton(1945)
Κλίση κυρίως κλάδου (m/m)	$MCS = H85 - H10/L85 - L10$	Dempster (1983)
Λόγος αναγλύφου (km/km)	$Rhl = (H/1000)/L_b$	Schumm(1956)
Δείκτης Τραχύτητας	$R_n = D_d \times (H/1000)$	Melton 1957
Δείκτης επιμήκυνσης	$R_e = (2/L_b) \times (A/\pi)^{0.5}$	Schumm (1956)
Δείκτης κυκλικότητας	$R_c = (4\pi \times A)/P^2$	Miller (1953)
Δείκτης Σχήματος	$R_f = A/L_b^2$	Horton (1932)
Χρόνος συρροής (min)	$T_c = T_{channel} + T_{overland}$ $T_{ov} = 1.44 \times (L_g \times N)^{0.467} \times S^{-0.235}$ $T_{ch} = 0.0195 \times L^{0.770} S^{-0.385}$	Kerby (1959) Kirpich (1940)

4.4 Λιθολογία

Οι ψηφιοποιημένοι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης κατηγοριοποιήθηκαν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, μέσω Γ.Σ.Π, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα των σχηματισμών στη διάβρωση, τις κοινές διεργασίες κατά τον σχηματισμό του εδάφους αλλά και της κοινής υδρολογικής συμπεριφοράς τους (Gournelos et al., 2018). Οι τέσσερις λιθολογικοί σχηματισμοί που αναγνωρίστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι:

- **Τεταρτογενή**, τα οποία είναι πολύ ευδιάβρωτα και χαρακτηρίζονται από μεγάλη περατότητα.
- **Μάργες και Μαργαικοί Ασβεστόλιθοι**, πετρώματα τα οποία διαβρώνονται εύκολα και έχουν χαμηλή περατότητα.
- **Σχιστόλιθοι**, ηφαιστειακά και εκρηξιγενή πετρώματα. Είναι σχετικά ανθεκτικά στη διάβρωση ενώ παρουσιάζουν μικρή περατότητα.
- **Ανθρακικά και κυρίως μάρμαρα**. Είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στη διάβρωση, ενώ εξαιτίας της καρστικοποίησης που παρατηρείται στην περιοχή αναμένεται να έχουν μεγάλη περατότητα και τα σχηματιζόμενα εδάφη είναι σπάνια και με μικρό πάχος.

4.5 Δείκτης NDVI

Καθώς το Corine δεν έχει πολύ μεγάλη χωρική αλλά και χρονική ακρίβεια, δηλαδή δε μπορεί να απεικονίσει μικρές διαφοροποιήσεις στις χρήσεις γης ή αλλαγές που έγιναν μετά τη δημοσίευση της τελευταίας έκδοσης της βάσης δεδομένων, αλλά και καθώς η συλλογή και ομαδοποίηση των δεδομένων είναι επίπονη διαδικασία η οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα, πολλοί ερευνητές προσπαθούν να εκτιμήσουν τις χρήσεις γης με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων (π.χ. Turner et al., 2003; Asis & Omasa, 2007; Bargiel et al., 2013). Οι χρήσεις γης συνήθως προσεγγίζονται μέσω κάποιου δείκτη βλάστησης που προκύπτει από την ανάλυση δορυφορικών εικόνων, και ενώ υπάρχουν πολλοί δείκτες, ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος είναι ο **κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης** (NDVI; Rouse, 1973; Rouse et al., 1974), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στην εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους (Durigon et al., 2014; Fonseca de Carvalho et al., 2014; Feng et al., 2018; Ayalew et al., 2020) Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται ο δείκτης είναι ότι η χλωροφύλλη απορροφά έντονα το ερυθρό αλλά όχι το υπέρυθρο και έτσι ο δείκτης εξαρτάται από την ικανότητα φωτοσύνθεσης των φυτών (Sellers, 1985). Θεωρείται ένας δείκτης δεύτερης γενιάς (Bannari et al., 1995) και υπολογίζεται από πολυφασματικές

δορυφορικές εικόνες συνδυάζοντας τις τιμές ανάκλασης στο υπέρυθρο φάσμα με τις τιμές ανάκλασης στο ερυθρό ως εξής:

$$NDVI = \frac{\text{Υπέρυθρο} - \text{Ερυθρό}}{\text{Υπέρυθρο} + \text{Ερυθρό}}$$

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές στο εύρος τιμών [-1, 1] με τις άγονες περιοχές να παρουσιάζουν χαμηλές τιμές, τις περιοχές με βλάστηση υψηλές τιμές και οι περιοχές που καλύπτονται από νερό ιδιαίτερα χαμηλές τιμές (Myneni et al., 1995; Lillesand et al., 2004). Ο δείκτης δεν είναι σταθερός κατά τη διάρκεια του χρόνου αλλά μεταβάλεται και δίνει αυξημένες τιμές κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών και χαμηλές κατά την υγρή περίοδο (Pettorelli et al., 2005) ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχει διαπιστωθεί ότι στην αρχή της περιόδου ανάπτυξης των φυτών υπερεκτιμά το κάλυμμα βλάστησης ενώ κατά το τέλος της περιόδου το υποεκτιμά (Cyr, 1993).

Για την καλύτερη εκτίμηση του δείκτη NDVI, συγκεντρώθηκαν 12 δορυφορικές εικόνες, όπως προαναφέρθηκε στη συλλογή δεδομένων. Έπειτα μέσω Γ.Σ.Π. και χρησιμοποιώντας το Raster Calculator του Arc Map υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI για κάθε δορυφορική εικόνα (από το Μάιο 2019 έως Απρίλιο 2020) βάση της προηγούμενης εξίσωσης. Τα 12 νέα επίπεδα raster συνδυάστηκαν και υπολογίστηκε ο **μέσος δείκτης NDVI** για το νησί της Σάμου, ο οποίος παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο. Τέλος διερευνήσαμε, με τη βοήθεια του Matlab, τη μεταβολή του δείκτη NDVI για κάθε χρήση γης του Corine, και πιο συγκεκριμένα τη διακύμανση της μέσης τιμής του NDVI για κάθε τύπο χρήσεων γης του Corine σε σχέση με το χρόνο.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται κάποιες από τις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης της διάβρωσης και των υδρολογικών συνθηκών σε μια περιοχή μελέτης. Χρησιμοποιούνται είτε ως είσοδοι για τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, είτε για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά είτε για να υπολογίσουμε ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

4.6 Τάση κλιματικών παραμέτρων

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναλύθηκαν τα κλιματολογικά δεδομένα από το σταθμό της Σάμου για το χρονικό διάστημα 1979 έως 2019. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είχε ως πρωταρχικό σκοπό την αναγνώριση της τάσης μεταβολής των χαρακτηριστικών της βροχής στη περιοχή μελέτη και δευτερευόντως της θερμοκρασίας. Όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή τόσο η θερμοκρασία όσο και η βροχόπτωση αναμένετε να μεταβληθούν σημαντικά σε ολόκληρη τη Μεσόγειο: οι έντονες βροχοπτώσεων θα εμφανίζονται συχνότερα, ενώ ταυτόχρονα οι ημέρες βροχής και το ολικό ύψος βροχής αναμένονται να μειωθούν. Για την περιοχή μελέτης έγινε στατιστική ανάλυση σε περιβάλλον MATLAB η οποία περιλαμβάνει:

- **Ανάλυση μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας και ύψους βροχής** μέσω διαγραμμάτων box & whisker.
- **Ανάλυση των ημερήσιων τιμών της βροχόπτωσης** ανά εποχή αλλά και συνολικά με τη δημιουργία ιστογραμμάτων και διαγραμμάτων box & whisker.
- **Μελέτη της τάσης της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων** ανά εποχή, και όσον αφορά την βροχόπτωση ανά εποχή και υδρολογική περίοδο (ξηρή υγρή).
- **Ανάλυση της συχνότητας εμφάνισης των έντονων βροχοπτώσεων** μέσω διαγραμμάτων 2-D τα οποία απεικονίζουν τον αριθμό ημερών ανά μήνα στα οποία εμφανίζονται βροχοπτώσεις μεγαλύτερες από 2mm, 10 mm, 30 mm και 50 mm αντίστοιχα.
- **Ανάλυση των μοτίβων εμφάνισης της βροχόπτωσης**, μέσω διαγραμμάτων 2-D τα οποία απεικονίζουν ανά μήνα τον αριθμό των συνεχόμενων ημερών βροχόπτωσης (ελάχιστο, μέσο και μέγιστο) καθώς και των μεμονωμένων γεγονότων βροχόπτωσης.
- **Μελέτη της συχνότητας εμφάνισης ακραίων βροχοπτώσεων** (>30mm και >50 mm) ανά έτος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ακολουθούν σε επόμενο Κεφάλαιο.

4.7 Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (RUSLE)

Το μοντέλο RUSLE εκτιμά την απώλεια του εδάφους ανά εκτάριο (1 ha= 10 στρέμματα), σε χρονικό διάστημα ενός έτους στην εξεταζόμενη περιοχή χρησιμοποιώντας έξι παραμέτρους για τον υπολογισμό της διάβρωσης (A) :

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

όπου A είναι ο μέσος ρυθμός απώλειας του εδάφους (σε τόνους ανά εκτάριο ανά έτος ($t ha^{-1} year^{-1}$), R η ένταση της διάβρωσης εξαιτίας της βροχής ($MJ mm ha^{-1} hr^{-1} year^{-1}$), K ένας συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους ($tons h MJ^{-1} mm^{-1}$), C ένας συντελεστής της επίδρασης των χρήσεων γης στη διάβρωση, P ένας παράγοντας προστασίας του εδάφους μέσω διαχειριστικών πρακτικών, ενώ τα L και S συνδυάζονται συνήθως σε έναν παράγοντα που αποτελεί τον τοπογραφικό παράγοντα κλίσης και μήκους κλίσης (όπου δεν αναφέρονται μονάδες έχουμε αδιάστατα μεγέθη).

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε κυψελίδες μεγέθους 50 x 50 m, μέσω του εργαλείου Create Fishnet του ArcMap. Έπειτα για κάθε κυψελίδα υπολογίστηκαν όλοι οι παράγοντες, οι οποίοι έπειτα συνδυάστηκαν βάση της παγκόσμιας εξίσωσης RUSLE για να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Η μεθοδολογία υπολογισμού κάθε παράγοντα ακολουθεί, ενώ τα αποτελέσματα της εφαρμογής κάθε βήματος στην περιοχή της Σάμου, παρατίθεται στα αποτελέσματα.

4.7.1 Παράγοντας R (ένταση διάβρωσης εξαιτίας της βροχής)

Ο R παράγοντας, εκφράζει το δυναμικό διάβρωσης εξαιτίας της έντασης της βροχόπτωσης και προκύπτει από το άθροισμα του βαθμού διάβρωσης όλων των βροχοπτώσεων μέσα σε ένα χρόνο (χρησιμοποιούνται δεδομένα καλής χρονικής ανάλυσης - συνήθως 10-λεπτα ή 30-λεπτα). Επειδή κάτι τέτοιο πολλές φορές είναι δύσκολο μπορούμε να εφαρμόσουμε προσεγγιστικές μεθόδους για την περιοχή μελέτης ή να χρησιμοποιήσουμε δεδομένα που μπορεί να είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα για τον Ελληνικό χώρο ο Φλαμπούρης (2008) έχει μελετήσει την συγκεκριμένη παράμετρο για τον Ελληνικό χώρο και τη συσχετίζει με τη μέση ετήσια βροχόπτωση μέσω της σχέσης :

$$R = R_{annual} \times a$$

Όπου R_{annual} η μέση τιμή της βροχόπτωσης ανά έτος (mm) και α ένας συντελεστής αναλογίας ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ year^{-1}$) ο οποίος λαμβάνει διάφορες τιμές από 0.7 έως 1.4 στον Ελληνικό χώρο (για την περιοχή μελέτης 1.0 – 1.3).

Με βάση τη προηγούμενη μέθοδο ο δείκτης R για ολόκληρη τη περιοχή μελέτης είναι:

$$R = 676.51\ mm \times 1.3 = 880\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ year^{-1}$$

Καθώς η **βροχόπτωση μεταβάλλεται χωρικά**, η παραπάνω προσέγγιση δε μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του ‘ESDAC’ (βλέπε συλλογή πρωτογενών δεδομένων) τα οποία επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. ώστε να προκύψει ο δείκτης R για ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα εισάχθηκαν σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και έγιναν οι παρακάτω εργασίες ώστε να λάβουμε μια τιμή του R για ολόκληρη την περιοχή μελέτης:

- διόρθωση προβολικού συστήματος
- περικοπή της ζητούμενης περιοχής
- Δημιουργία σημειακών δεδομένων και γενίκευση της πληροφορίας για ολόκληρο το νησί (μέσω Interpolation)
- Αλλαγή χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιώντας μέγεθος κυψελίδας 50 x 50 m, έτσι ώστε τα δεδομένα να είναι συμβατά με τα υπόλοιπα δεδομένα που χρησιμοποιούνται.

Ο παράγοντας R παρουσιάζεται στα αποτελέσματα, όπου γίνεται και σύγκριση με τη μέση τιμή που προαναφέρθηκε.

4.7.2 Παράγοντας K (διαβρωσιμότητα του εδάφους)

Η **εδαφική διαβρωσιμότητα K** ($tons\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) υπολογίζεται πειραματικά λαμβάνοντας υπόψη την εδαφική υφή, δομή, περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες και διαπερατότητα αλλά καθώς κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί σε μεγάλη έκταση εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί βάση της κοκκομετρικής κατανομής του υλικού του εδάφους (Wischmeier et al., 1978). Αν και μια τέτοια προσέγγιση είναι ικανοποιητική για μια μικρή περιοχή μελέτης δε μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες λεκάνες ή περιοχές, όταν τέτοια δεδομένα δεν είναι ευρέως διαθέσιμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται διάφορες εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού του παράγοντα K κυρίως με τη βοήθεια της λιθολογίας μιας περιοχής η οποία επηρεάζει επίσης την διαβρωσιμότητα μιας περιοχής μέσω της στρωματογραφίας και των ιδιοτήτων του μητρικού πετρώματος (π.χ. Mitchell & Bubenzer, 1980; Panagos et al., 2014). Εμπειρικές προσεγγίσεις έχουν εφαρμοστεί και στον

ελληνικό χώρο (Rozos et al., 2013; Efthimiou et al., 2017) με καλά αποτελέσματα. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για την περιοχή σχετικών με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του εδάφους για τον υπολογισμό του παράγοντα K βασιστήκαμε σε έναν εμπειρικό προσδιορισμό της διαβρωσιμότητας του εδάφους, βάση των χαρακτηριστικών του μητρικού υλικού και συνδυάζοντας τη διαθέσιμη βιβλιογραφία για τον ελληνικό χώρο με παρατηρήσεις πεδίου για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών κάθε λιθολογικού σχηματισμού. Οι **γεωλογικοί σχηματισμοί ομαδοποιήθηκαν** με τη χρήση Γ.Σ.Π. σε λιθολογικές ενότητες παρόμοιων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και έπειτα σε καθεμία από αυτές ανατέθηκε μια τιμή για τον παράγοντα K. Έπειτα τα δεδομένα οργανώθηκαν σε μια βάση δεδομένων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και οπτικοποιήθηκαν. Το αποτέλεσμα ακολουθεί στα αποτελέσματα.

Πίνακας 4-5: Λιθολογικοί σχηματισμοί και διαβρωσιμότητα του εδάφους για κάθε σχηματισμό

Λιθολογικός σχηματισμός	Παράγοντας K $tons\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$
Τεταρτογενείς αποθέσεις	0.35
Μάργες / Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0.2 / 0.15
Σχιστόλιθοι / Ηφαιστειακά	0.1
Ανθρακικά πετρώματα	0.05

4.7.3 Παράγοντας C (επίδραση χρήσεων γης)

Ο παράγοντας αυτός εκτιμά τη συνδυασμένη επίδραση του καλύματος βλάστησης αλλά και των τεχνικών διαχείρισης της γης (ή αλλιώς της τεχνητής διατάραξης του εδάφους) σε μια περιοχή (Wischmeier & Smith, 1960). Για τον υπολογισμό του πρέπει να λάβουμε υπόψη σύνθετες παραμέτρους όπως η εδαφική υγρασία, η εδαφική τραχύτητα οι συνθήκες φυτοκάλυψης και ένας παράγοντας προηγούμενης χρήσης του εδάφους, οι οποίες πολύ σπάνια είναι διαθέσιμες. Ο δείκτης λαμβάνει τιμές από 0 για το πολύ καλά προστατευμένο έδαφος έως και 1 για το γυμνό έδαφος και συνήθως εκτιμάται είτε μέσω τηλεανίχνευσης (για παράδειγμα με τη χρήση του δείκτη NDVI; Durigon et al., 2014; Fonseca de Carvalho et al., 2014; Feng et al., 2018; Ayalew et al., 2020), είτε χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά δεδομένα για την ανάθεση μιας τιμής σε μια έκταση για την οποία οι χρήσεις γης είναι γνωστές (π.χ. χρησιμοποιώντας το Corine Land Cover). Πιο συγκεκριμένα **ο παράγοντας C μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του δείκτη NDVI** για τις μεσογειακές περιοχές μέσω της εξίσωσης (De Jong, 1994)

$$C = e^{-a \frac{NDVI}{b-NDVI}}$$

όπου α και β είναι παράμετροι που συσχετίζουν τον NDVI με το παράγοντα C, και διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Για την γειτονική Ιταλία έχουν προταθεί οι τιμές α=2 και β=1 (Van der Kniff et al., 2000) οι οποίες δίνουν καλά αποτελέσματα. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του παράγοντα C είναι μέσω της ταξινόμησης των χρήσεων γης των δεδομένων χρήσεως γης του Corine, και της ανάθεσης τιμών σε κάθε ομάδα βάσει της εκτενούς βιβλιογραφίας για τον ευρωπαϊκό αλλά και τον ελληνικό χώρο (π.χ. Terranova et al., 2009; Tosic et al., 2011; Rozos et al., 2013; Panagos et al., 2015).

Για την περιοχή μελέτης επιλέχθηκε να αναταξινομήσουμε τις **χρήσεις γης του Corine 2018**, καθώς οι τιμές που δίνονται στην βιβλιογραφία φαίνεται να δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα, και έχουν χρησιμοποιηθεί και στον ελληνικό χώρο. Οι τιμές που ανατέθηκαν σε κάθε σχηματισμό φαίνονται στον Πίνακα 4-4 ενώ η κατανομή των τιμών στην περιοχή μελέτης έχουν οπτικοποιηθεί μέσω Γ.Σ.Π. και εμφανίζονται σε επόμενο Κεφάλαιο.

Πίνακας 4-6: Χρήσεις γης Corine Land Cover 2018 και ο παράγοντας της επίδρασης τους στη διάβρωση

CLC 2018 Code	Παράγοντας C
311, 312, 313, 512	0.003
112, 121, 123, 124	0.005
324, 421	0.01
142, 231, 321, 323	0.05
131, 222, 223, 242, 243	0.1
221	0.15
333	0.3
211	0.4
332	0.7

4.7.4 Παράγοντας LS (τοπογραφικός παράγοντας RUSLE)

Ο παράγοντας κλίσης και μήκους κλίσης είναι ενδεικτικός του δυναμικού διάβρωσης μιας περιοχής. Όσο μεγαλώνει η κλίση τόσο μεγαλώνει το δυναμικό διάβρωσης (Desmet & Govers, 1996) ενώ όσο αυξάνει το μήκος της κλίσης (δηλαδή η απόσταση από την αρχή της απορροής μέχρι το σημείο που η κλίση γίνεται μηδενική και αρχίζει η απόθεση) τόσο αυξάνει το δυναμικό αυτό εξαιτίας της συσσώρευσης της απορροής. Αυτός ο παράγοντας

είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την εκτίμηση των απωλειών του εδάφους από την εξίσωση RUSLE καθώς έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία από όλους τους παράγοντες της εξίσωσης αυτής (Truman et al., 2001; Hoffman et al., 2013). Ο παράγοντας LS έχει υπολογιστεί με τη βοήθεια της μεθόδου των Moore & Wilson, 1992 μέσω του SAGA GIS και του ομώνυμου εργαλείου για τον υπολογισμό του όπως παρουσιάζεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για να μπορεί όμως να συνδυαστεί πιο αποδοτικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους, χωρίς να επιβαρύνεται ο χρόνος επεξεργασίας, για το μοντέλο RUSLE χρησιμοποιείται μέγεθος κυψελίδας 50 x 50 m. Ο χάρτης που προκύπτει είναι παρόμοιος με αυτόν που έχει προαναφερθεί στον υπολογισμό των δευτερογενών παραμέτρων, αλλά οι τιμές είναι εξομαλυμένες λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους της κυψελίδας και οι μέγιστες παρατηρούμενες τιμές του δείκτη έχουν μειωθεί. Ο χάρτης που χρησιμοποιείται ως είσοδος για το μοντέλο RUSLE παρουσιάζεται στα αποτελέσματα.

4.7.5 Παράγοντας P (παράγοντας διαχειριστικών πρακτικών)

Ο παράγοντας *P* εκφράζει τις **συνθήκες προστασίας του εδάφους** μέσω κατάλληλων διαχειριστικών πρακτικών που εφαρμόζονται από τους ανθρώπους. Παραδείγματα τέτοιων πρακτικών προστασίας αποτελούν οι τεχνητές αναβαθμίδες ή και τα πέτρινα φράγματα σε καλλιεργούμενες περιοχές, η άροση των εδαφών με συγκεκριμένο τρόπο που δεν επιδεινώνει τη διάβρωση (π.χ. άροση παράλληλα με τις ισουψείς – contour farming). Για την περιοχή της Μεσογείου και ειδικά στις νησιωτικές περιοχές όπως η Μάλτα, η Κύπρος και το Αιγαίο (Panagos et al., 2015) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη η χρήση πέτρινων φραγμάτων αλλά και των αναβαθμίδων. Τα πέτρινα φράγματα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ορίων μεταξύ των ιδιοκτησιών, μειώνοντας έτσι το μήκος κλίσης μιας πλαγιάς, ενώ παγιδεύουν τα ιζήματα και το έδαφος μέσα στα όρια μιας ιδιοκτησίας. Αυτά είναι ιδιαίτερα εκτεταμένα και για τον ελληνικό χώρο ως σύνολο έχει υπολογιστεί από τον προαναφερόμενο ερευνητή μια κάλυψη 9%, αν και στις νησιωτικές περιοχές συνήθως είναι ακόμα μεγαλύτερη. Η κατάσταση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική και σε πολλές περιοχές της Ελλάδος, αλλά και της περιοχής μελέτης, υπάρχει μια εικόνα εγκατάλειψης τους καθώς ο πληθυσμός στις νησιωτικές περιοχές ασχολείται περισσότερο με τον τουρισμό και λιγότερο με τις αγροτικές δραστηριότητες. Παρολαυτα ακόμα και όταν βρίσκονται σε άσχημη κατάσταση αυτές οι αναβαθμίδες παρέχουν προστασία από τη διάβρωση (Bazzoffi & Gardin, 2011).



Σχήμα 4-4: Χρήση τεχνητών αναβαθμίδων στην περιοχή για τη μείωση της διάβρωσης. (α) Αριστερά βλέπουμε πέτρινα φράγματα σε άσχημη κατάσταση, (β) δεξιά βλέπουμε αναβαθμίδες σε καλή κατάσταση

Ανάλογα με την **μέθοδο διαχείρισης** αλλά και την **κατάσταση των μόνιμων υποδομών** όπως οι αναβαθμοί ο παράγοντας P μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα για τα πέτρινα φράγματα – αναβαθμούς έχουν προταθεί διάφορες τιμές ανάλογα με την κατάσταση τους (από 0.2 έως 0.8; Munro et al., 2008) αλλά και την πυκνότητα τους σε συνδυασμό με τη κλίση (από 0.5 έως 0.7; Angima et al., 2003). Στις μεσογειακές περιοχές είναι ιδιαίτερα συχνή η χρήση τέτοιων κατασκευών στους εκτεταμένους ελαιώνες κάτι που ισχύει και για την περιοχή μελέτης. Όσον αφορά τη χρήση καλών πρακτικών κατά την άρωση αυτές φαίνεται να έχουν επιδραση από 0 έως και 90% στην απώλεια των ιζημάτων (Agassi, 1995). Οι Panagos et al., 2015 για όλο το Αιγαίο δίνουν μια μέση τιμή για τον παράγοντα P λιγότερο από 0.85, δείχνοντας ότι οι διαχειριστικές πρακτικές είναι ιδιαίτερα έντονες στη περιοχή.

Για τον **υπολογισμό** του παράγοντα P **συνδυάσαμε παρατηρήσεις υπαίθρου με δεδομένα σε Γ.Σ.Π.** Αναγνωρίστηκαν οι περιοχές (ειδικά ελαιώνες και αμπέλια) οι οποίες έχουν μεγάλες κλίσεις (πάνω από 10%) μέσω επεξεργασίας διανυσματικών δεδομένων (CLC2018 και κλίσεις) σε Γ.Σ.Π. Καθώς γενικά οι αναβαθμοί δε βρίσκονται σε καλή κατάσταση στη περιοχή μελέτης ανατέθηκε μια τιμή 0.6 σε αυτές τις περιοχές. Σε άλλες περιοχές (καλλιέργειες) όπου εκτιμάται ότι εφαρμόζονται διαχειριστικές πρακτικές ανατέθηκαν τιμές από 0.7 έως 0.8 ανάλογα με την κλίση αλλά και το είδος της καλλιέργειας. Τέλος σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές ανατέθηκε η τιμή 1.0. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες μελέτες παγκοσμίως συνήθως ανατίθεται τιμή $P=1$ για τον παράγοντα λόγω έλλειψης δεδομένων και μεγάλης αβεβαιότητας, αλλά στη περιοχή μελέτης θεωρήθηκε ότι

παίζει σημαντικό ρόλο και για αυτό έγινε η χαρτογράφηση του. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε επόμενο Κεφάλαιο.

4.8 Υδρολογική απόκριση λεκάνης - Μεθόδος SCS-CN

Καθώς η απόκριση μιας υδρολογικής λεκάνης στη βροχόπτωση είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο της Θεωρίας, συνήθως προσεγγίζεται με εμπειρικές μεθόδους, ιδιαίτερα σε λεκάνες για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής. Σε αυτές τις περιπτώσεις δε μπορεί να δημιουργηθεί ένα ακριβές υδρογράφημα, αλλά χρησιμοποιείται το **συνθετικό υδρογράφημα** (Synthetic Unit Hydrograph: SUH) για τον υπολογισμό της απορροής βασιζόμενο στα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης (Bernard, 1935; Snyder, 1938; Taylor, 1952; SCS, 1957 & 2002; Gray, 1961, Bhunya et al., 2003). Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους ‘SUH’ είναι η **μέθοδος “SCS”** (Mockus, 1949; USDA SCS, 1972), η οποία έχει αναπτυχθεί από μελέτες σε μικρές καλλιεργήσιμες λεκάνες και χρησιμοποιεί παραμέτρους όπως η τοπογραφία, το μήκος της κλίσης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, των χρήσεων γης και της βροχόπτωσης για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της απορροής και τη κατασκευή ενός **τριγωνικού υδρογραφήματος**. Κατά το παρελθόν η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες αλλά και σε υδρολογικές λεκάνες διαφορετικού μεγέθους με επιτυχία (Boughton, 1989, για παράδειγμα: Cheng et al., 2006; Ramakrishnan et al., 2009; D’Asaro & Grillone, 2012). Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως “SCS-CN” (Soil Conservation Service – Curve Number) βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης (όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο) και σε δυο υποθέσεις (Mishra & Singh, 1999):

- **Υπόθεση Α:** Ο λόγος της πραγματικής απορροής (Q) προς την θεωρητική απορροή, δηλαδή τη διαφορά ολικής βροχόπτωσης και μιας ποσότητας κατακρημνισμάτων για την οποία δεν παρατηρείται απορροή ($P - I_a$), είναι ίση με την πραγματική κατείδδυση (F) προς το νερό που κατακρατείται (ή εξατμίζεται) από τη λεκάνη απορροής (S), μετά την έναρξη της απορροής:

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S}$$

- **Υπόθεση Β:** Η αρχική ποσότητα κατακρημνισμάτων για τα οποία δε παρατηρείται άμεση απορροή (I_a : initial abstraction) είναι ίση με ένα ποσοστό (λ) της ικανότητας ‘κατακράτησης’ νερού (S: potential retention) μιας λεκάνης, μετά την έναρξη της απορροής:

$$I_a = \lambda S$$

όπου $0 \leq \lambda \leq 0.3$ (Ponce & Hawkins, 1996), με συνηθισμένη τιμή σύμφωνα με τη μέθοδο ‘SCS’: $\lambda=0.2$.

Η μέθοδος ‘SCS’ περιλαμβάνει τον υπολογισμό μιας σειράς παραμέτρων όπως αναλύεται ακολούθως (NRCS,1986; Boughton, 1989; Ponce & Hawkins, 1996).

4.8.1 Ενεργή βροχόπτωση (P_e)

Η ενεργή βροχόπτωση ή αλλιώς πλεονάζουσα βροχόπτωση ή αλλιώς άμεση απορροή (P_e), είναι πάντα μικρότερη από την ολική βροχόπτωση (P) που εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη: (α) μια ποσότητα κατακρημνισμάτων για τα οποία δε παρατηρείται άμεση απορροή (I_a : initial abstract) (β) μια ποσότητα νερού (δυναμικό κατακράτησης) το οποίο κατακρατείται από τη λεκάνη μετά την έναρξη της απορροής (S : potential maximum retention).

Έτσι εφαρμόζοντας την εμπειρική εξίσωση της μεθόδου “SCS” για την ενεργή βροχόπτωση υπολογίζουμε την ενεργή βροχόπτωση:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S}$$

Στην οποία αν αντικαταστήσουμε με $I_a = 0.2S$ προκύπτει:

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (1)$$

4.8.2 Ικανότητα κατακράτησης νερού από την υδρολογική λεκάνη (S)

Κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης, ένα μέρος του νερού εξατμίζεται και ένα άλλο μέρος ‘ανανεώνει’ το αποθηκευμένο νερό εντός της λεκάνης, όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο της θεωρίας. Με την έναρξη της βροχόπτωσης αρχικά δεν έχουμε απορροή (όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο της θεωρίας), και όλο το νερό εξατμίζεται η κατεισδύει. Με το πέρασμα του χρόνου η βροχόπτωση συνήθως αυξάνει, οπότε αυξάνει η κατακράτηση του νερού, και αρχίζει να εμφανίζεται και επιφανειακή απορροή. Αν θεωρήσουμε ότι η βροχόπτωση αυξάνει επ’ άπειρον τότε μια υδρολογική λεκάνη έχει μια μέγιστη ικανότητα κατακράτησης νερού S (maximum potential retention), ενώ το πλεονάζον νερό μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή. Για τον υπολογισμό της ικανότητας κατακράτησης (S) η μέθοδος ‘SCS’ χρησιμοποιεί μια εμπειρική συνάρτηση βασισμένη σε ένα συντελεστή καμπύλης απορροής (CN: runoff curve number):

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

4.8.3 Συντελεστής καμπύλης απορροής (CN)

Ο συντελεστής καμπύλης απορροής (Curve number) είναι μια εμπειρική παράμετρος για τον υπολογισμό της απορροής, η οποία βασίζεται στις χρήσεις γης, τον υδρολογικό τύπο του εδάφους, και τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Για την περιοχή μελέτης υπολογίστηκε ο συντελεστής 'CN' εφαρμόζοντας τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά καθορίζουμε την υδρολογική ομάδα του εδάφους (hydrological soil group). Καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης, χρησιμοποιούμε διαθέσιμα δεδομένα (Ross, 2018). Το 98.5% της επιφάνειας της Σάμου ταξινομείται ως υδρολογική ομάδα C, και καθώς οι υπολογισμοί μας γίνονται σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, επιλέγουμε για ολόκληρο το νησί αυτή την ομάδα για να απλουστευτούν οι υπολογισμοί, χωρίς να μειωθεί η ακρίβεια.

Πίνακας 4-7: Οι τιμές του συντελεστή καμπύλης απορροής (CN) για όλες τις χρήσεις γης που συναντάμε στη Σάμο.

CLC 2018 CODE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	CN
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	90
121	Βιομηχανικές & εμπορικές ζώνες	91
123	Ζώνες λιμένων	98
124	Αεροδρόμιο	88
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	90
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	90
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	86
221	Αμπελώνες	77
222	Οπωροφόρα δένδρα	77
223	Ελαιώνες	77
231	Βοσκότοποι	80
242	Σύνθετες καλλιέργειες	80
243	Καλλιέργειες μαζί με φυσική βλάστηση	77
311	Δάσος πλατυφύλων	70
312	Δάσος κωνοφόρων	70
313	Δάσος Μεικτό	73
321	Λιβαδικές εκτάσεις	79
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	77
324	Μεταβατικές δασώδεις – θαμνώδεις εκτάσεις	73
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	86
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	86
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	98
512	Υδάτινες μάζες χερσαίων υδάτων	98

2. Χρησιμοποιώντας τις χρήσεις γης του **Corine Land Cover 2018**, και λαμβάνοντας υπόψη τόσο την υδρολογική ομάδα του εδάφους, όσο και παρατηρήσεις που έγιναν στο ύπαιθρο, και βασιζόμενοι σε βιβλιογραφικά δεδομένα (NRCS, 1986) υπολογίζουμε για κάθε

χρήση γης μια τιμή Curve Number (Πίνακας 4-7). Έτσι στη γεωβάση δεδομένων δημιουργείται νέο επίπεδο το οποίο περιέχει τη νέα πληροφορία.

- Υπολογίζουμε για κάθε υδρολογική λεκάνη ένα **σταθμισμένο Curve Number** (composite curve number) το οποίο αντιπροσωπεύει την τιμή του δείκτη για ενδιάμεσες συνθήκες προηγούμενης υγρασίας (CN(II)). Για τη μέθοδο SCS, ελέγχουμε τις 5 προηγούμενες μέρες και ανάλογα με το ύψος της βροχόπτωσης των **προηγούμενων συνθηκών υγρασίας** (antecedent moisture conditions - AMC) επιλέγουμε το κατάλληλο σταθμισμένο Curve Number (Πίνακας 4-7):

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή για υγρές ή ξηρές συνθήκες τότε εφαρμόζουμε τις ακόλουθες εξισώσεις για να υπολογίσουμε τα CN(III) και CN(I) αντίστοιχα:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Πίνακας 4-8: Προϋποθέσεις εφαρμογής του σταθμισμένου συντελεστή απορροής, βασιζόμενοι στις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (AMC).

Προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (AMC)	Ύψος βροχής 5-ημερών	
	Ξηρή εποχή	Υγρή εποχή
I	<1.3cm	<3.6cm
II	1.3-2.8cm	3.6-5.3cm
III	>2.8 cm	>5.3cm

4.8.4 Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα της μεθόδου SCS

Μέσω της μεθόδου SCS μπορούμε να υπολογίσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά ενός υδρογραφήματος όπως αυτά προαναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.3.6 και να δημιουργήσουμε ένα μοναδιαίο υδρογράφημα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοναδιαίου υδρογραφήματος, τα οποία υπολογίζονται μέσω της μεθόδου SCS είναι:

- Ο χρόνος συρροής (time of concentration: T_c) της λεκάνης. Υπολογίζεται εμπειρικά μέσω της μεθόδου της χρονικής υστέρησης (lag method), στην οποία μέσω του χρόνου υστέρησης (lag time), δηλαδή τον χρόνο σε ώρες ανάμεσα στο κέντρο βάρους του υετογραφήματος και τη μέγιστη απορροή μέσω της εξίσωσης:

$$T_c = 5/3T_L$$

- Ο χρόνος υστέρησης (Lag time: T_L) μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά μέσω του σταθμισμένου Curve Number (Bhunya,2011):

$$T_L = \frac{L^{0.8}(2540-22.86CN)^{0.7}}{14104CN^{0.7}Y^{0.5}}$$

όπου L είναι το υδραυλικό μήκος της λεκάνης απορροής σε μέτρα και Y είναι η μέση κλίση της υδρογραφικής λεκάνης σε m/m τα οποία υπολογίζονται μέσω του ArcMap και του εργαλείου Zonal Statistics.

- Χρονική διάρκεια ενεργής βροχόπτωσης (t_R), είναι η διάρκεια για την οποία παρατηρείται πλεόνασμα βροχόπτωσης και δίδεται από τον τύπο:

$$T_R = 0.1333T_c$$

- Ο χρόνος ανόδου ή αλλιώς χρόνος του ανερχόμενου σκέλους του υδρογραφήματος (από τη στιγμή που εμφανίζεται επιφανειακή απορροή μέχρι την μεγιστοποίηση της) υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$T_p = \frac{T_R}{2} + T_L$$

- Χρόνος βάσης (time base; T_b), που εκφράζει τη διάρκεια της πλημμύρας και υπολογίζεται εμπειρικά:

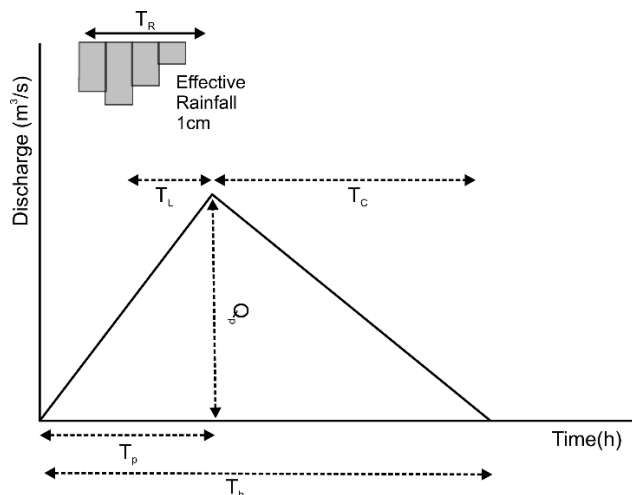
$$T_b = 2.67 * T_p$$

- Μέγιστη Απορροή (Q_p). Για μοναδιαίο ύψος ενεργής βροχόπτωσης (ένα εκατοστό ενεργής βροχόπτωσης) μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη απορροή για τη λεκάνη μέσω του εμπειρικού τύπου (Bhunya, 2011):

$$Q_p = 2.08 \frac{A}{T_p}$$

όπου A το εμβαδό της λεκάνης σε km² (υπολογίζεται μέσω Γ.Σ.Π.).

Μετά από τον υπολογισμό όλων των παραμέτρων, μπορεί να κατασκευαστεί μοναδιαίο τριγωνικό υδρογράφημα της μεθόδου σε αντιστοιχία με το υδρογράφημα του Σχήματος 2-8.



Σχήμα 4-5: Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα της μεθόδου SCS

ΕΝΟΤΗΤΑ 4Δ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετάμε τη διάβρωση μέσω συστημάτων ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων. Επιπλέον κατασκευάσαμε ένα απλό μοντέλο για την αυτοματοποιημένη εκτίμηση μέσω Γ.Σ.Π του σημαντικότερου ίσως χαρακτηριστικού του εδάφους, δηλαδή του πάχους του. Όσον αφορά την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου αυτή γίνεται σε επίπεδο λεκάνης και υπολεκανών, και πραγματοποιείται μέσω συστημάτων ασαφούς λογικής, καθώς το πλήθος των δεδομένων σε επίπεδο λεκάνης δεν επιτρέπουν την καλή εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου. Η μεθοδολογία που ακολουθούμε χωρίζεται σε 3 υποκεφάλαια: (α) πάχος εδάφους, (β) διάβρωση, (γ) πλημμυρικός κίνδυνος και ακολουθεί.

4.9 Ασαφής Λογική

Για την υλοποίηση όλων των ασαφών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα Mamdani, τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στην επόμενη υποενότητα.

4.9.1 Συστήματα ασαφούς συμπερασματολογίας (FIS) Mamdani

Τα **συστήματα Mamdani** χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα πλήθος εφαρμογών, μετασχηματίζοντας έναν αριθμό εισόδων σε μια έξοδο με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής. Από αυτή την έξοδο μπορούμε να διακρίνουμε μοτίβα (ομαδοποίηση δεδομένων) ή να λάβουμε αποφάσεις (ασαφείς ελεγκτές). Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τα παρακάτω κύρια τμήματα:

1. Ασαφοποίηση (fuzzification) των μεταβλητών εισόδου.

Στο αρχικό στάδιο οι μεταβλητές εισόδου εισάγονται στο σύστημα και επεξεργάζονται από έναν **ασαφοποιητή** (Fuzzifier) ο οποίος τις μεταφράζει σε μορφή ασαφών συνόλων. Οι ασαφείς αυτές ποσότητες έχουν τη μορφή λεκτικών μεταβλητών, δηλαδή λαμβάνουν τιμές που εκφράζονται από τη φυσική γλώσσα (π.χ. χαμηλή, υψηλή). Η περιγραφή μιας αριθμητικής τιμής με λεκτικούς όρους ονομάζεται **ασαφοποίηση** (fuzzyfication) της συγκεκριμένης (crisp) τιμής και βασίζεται σε όσα συζητήθηκαν προηγουμένως για τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων.

2. Εφαρμογή λογικών κανόνων

Οι ασαφείς μεταβλητές που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα συνδυάζονται μεταξύ τους με κάποιους λογικούς κανόνες (συνήθως AND, OR, NOT) για την παραγωγή ασαφών συμπερασμάτων. Ένα παράδειγμα ασαφούς λογικού κανόνα είναι το εξής:

“ΕΑΝ μεταβλητή 1: χαμηλή OR μεταβλητή 2: χαμηλή ΤΟΤΕ αποτέλεσμα: χαμηλό”

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω ο κανόνας χωρίζεται σε δυο μέρη και εκτελούνται δυο ξεχωριστές διαδικασίες κατά την εφαρμογή του:

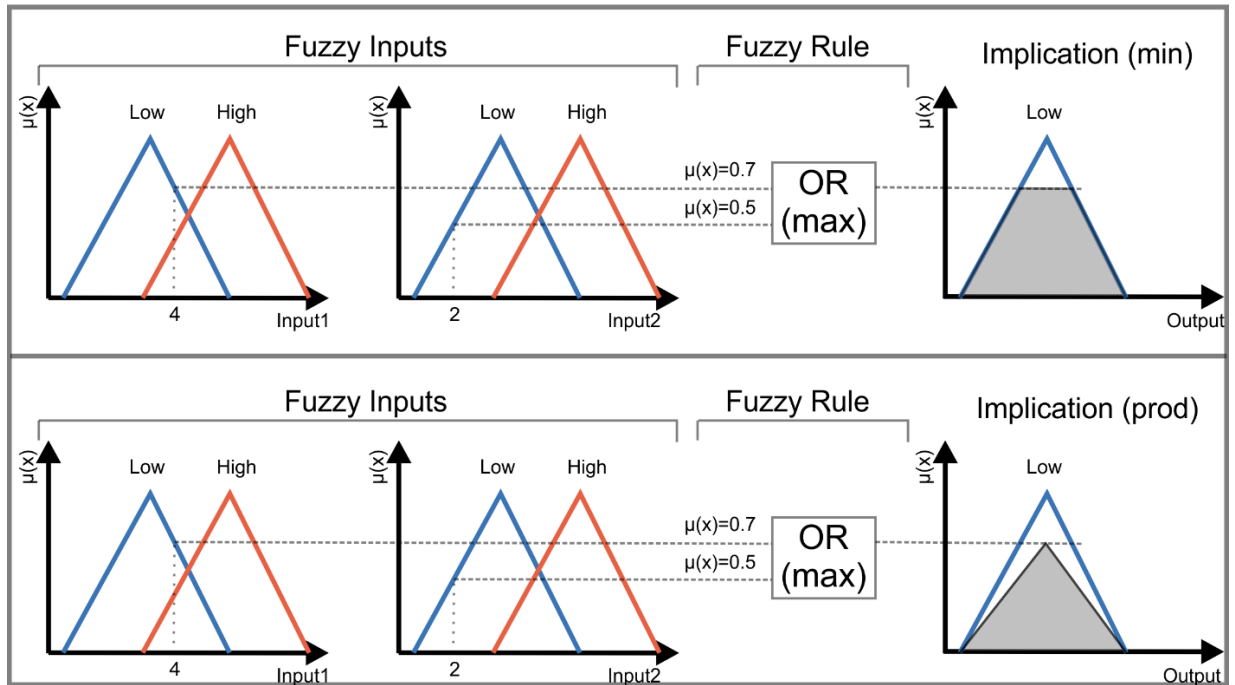
i. **Εφαρμογή του Ασαφούς τελεστή (AND/OR).** Από τις δυο ασαφείς μεταβλητές εισόδου (όπως προέκυψαν από το βήμα της ασαφοποίησης) γνωρίζουμε το βαθμό συμμετοχής της καθμίας σε κάθε ασαφές σύνολο. Τις συνδυάζουμε μέσω AND/ OR και λαμβάνουμε μια μόνο τιμή ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του ασαφούς τελεστή. Οι βασικοί τελεστές είναι δυο (AND /OR) οι οποίοι αντιστοιχούν στα t-norm και t-conorm που συζητήθηκαν προηγουμένως και υπολογίζονται συνήθως ως το \min και \max αντίστοιχα. Για παράδειγμα αν η μεταβλητή 1 είναι χαμηλή με βαθμό συμμετοχής 0.2 και η μεταβλητή 2 είναι χαμηλή με βαθμό συμμετοχής 0.4 τότε το αποτέλεσμα ενός κανόνα “OR” βασισμένου στη μέγιστη τιμή θα είναι $OR_{RES} = 0.4$.

ii. **Ασαφής συνεπαγωγή (fuzzy implication).** Γνωρίζοντας το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του τελεστή (π.χ. $OPR_{RES} = 0.4$) μπορούμε να υπολογίσουμε την ασαφή έξοδο του κανόνα, στον υπολογισμό της οποίας συμμετέχει η τιμή “OPR_RES” αλλά και η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου που αντιπροσωπεύει την έξοδο (π.χ. έξοδος- > χαμηλό). Για να λάβουμε το αποτέλεσμα της συνεπαγωγής, χρησιμοποιούμε ως ύψος:

$$H = OR_{RES} * \text{βάρος κανόνα}$$

και «κλαδευουμε» τη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου, μέσω ενός a-cut, χρησιμοποιώντας το H. Μπορούμε να υπολογίσουμε το τελικό αποτέλεσμα μέσω δυο διαφορετικών μεθόδων συνεπαγωγής χρησιμοποιώντας το ελάχιστο (\min) ή το γινόμενο (prod). Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια συνάρτηση συμμετοχής (στη συνηθισμένη περίπτωση ένα πολύγωνο).

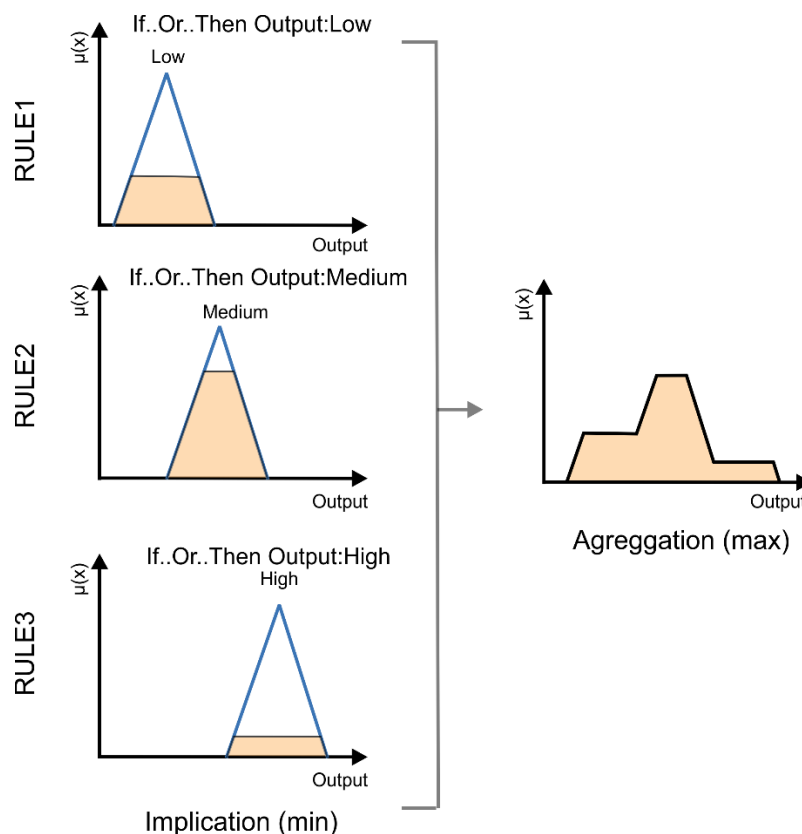
Rule: If Input1: Low OR Input2: Low then Output: Low



Σχήμα 4-6: Ασαφής κανόνας OR και ασαφής συνεπαγωγή τύπου min ή prod.

3. Ασαφής συνάθροιση των κανόνων (fuzzy aggregation)

Μετά των υπολογισμό της εξόδου για κάθε κανόνα θα πρέπει να συνδυάσουμε όλους τους κανόνες με κάποιον τρόπο ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε ένα ασαφές σύνολο ως αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας. Αυτό γίνεται με την **ασαφή συνάθροιση των κανόνων**, διαδικασία στην οποία συμμετέχουν όλες οι εξόδοι των κανόνων («κλαδεμενες» συναρτήσεις συμμετοχής) και παράγει ένα ασαφές σύνολο για κάθε συνδυασμό αριθμητικών εισόδων του μοντέλου. Στις περιοχές που υπάρχει **επικάλυψη μεταξύ των εξόδων των κανόνων** η τελική τιμή προκύπτει μετά από την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων ανάλογα με την επιλογή του ερευνητή (συνήθως μέγιστη τιμή, άθροισμα ή αλγεβρικό άθροισμα).



Σχήμα 4-7: Ασαφής συνάθροιση τριών ασαφών κανόνων (max)

4. Αποασαφοποίηση (Defuzzification)

Για να λάβουμε ως **αποτέλεσμα μια αριθμητική τιμή** η οποία μπορεί να ερμηνευτεί πιο ευκολα ή να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος για περαιτέρω στατιστική ανάλυση και οπτικοποίηση πρέπει να μετατρέψουμε το αποτέλεσμα του προηγούμενου βήματος (συνάρτηση συμμετοχής) σε μια αριθμητική τιμή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που οδηγούν στην ασαφοποίηση του αποτελέσματος του ασαφούς μοντέλου η συχνότερα απαντούμενη όμως είναι μέσω του υπολογισμού του κέντρου βάρους της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη του ασαφούς συνόλου εξόδου. Πιο αναλυτικά οι πιο γνωστές τεχνικές αποασαφοποίησης είναι οι παρακάτω:

i. **Μέσος όρος μεγίστων (Mean of Maximum – MOM)**. Η μέθοδος “MOM” λαμβάνει το μέσο όρο των τιμών στήριξης για τις οποίες ο βαθμός συμμετοχής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή. Για διακριτές τιμές στο πεδίο ορισμού αυτό μπορεί να υπολογιστεί ως

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Όπου n είναι ο αριθμός διακριτών τιμών x_i για τις οποίες έχουμε μέγιστο βαθμό συμμετοχής.

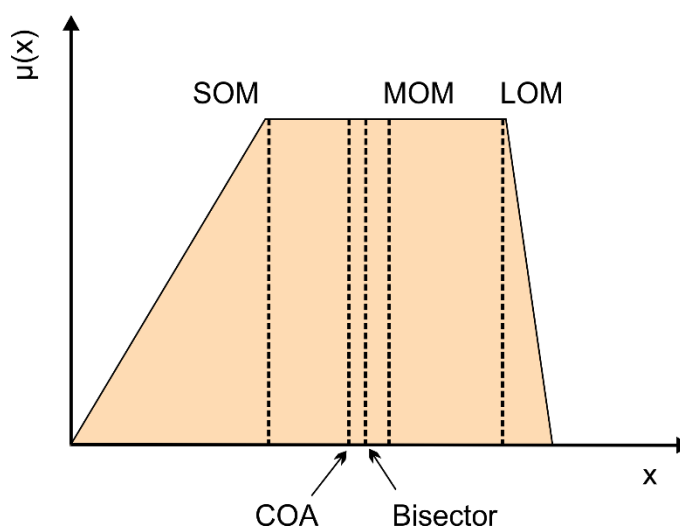
ii. **Ελάχιστη τιμή μεγίστων και Μέγιστη τιμή μεγίστων (SOM & LOM).** Λαμβάνεται ως τιμή εξόδου η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή (x_i) για την οποία έχουμε μέγιστο βαθμό συμμετοχής. Εάν η μέγιστη τιμή είναι μοναδική τότε αυτές οι μέθοδοι δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα με την μέθοδο «MOM». Αν αντίθετα σχηματίζεται ένα “πλατό” με μέγιστες τιμές τότε διαφέρουν μεταξύ τους.

iii. **Κέντρο βάρους (Center of Area-COA).** Είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος και επιστρέφει το κέντρο βάρους της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη του ασαφούς συνόλου εξόδου. Αν έχουμε διακριτές τιμές (ως προς το x) στην έξοδο τότε αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_Z(x_i)}$$

όπου n ο αριθμός των διακριτών τιμών και μ_Z η συνάρτηση συμμετοχής για το σημείο x_i το οποίο εκφράζει την τιμή εξόδου για τη διακριτή τιμή i .

iv. **Διχοτομούσα περιοχή (Bisector).** Υπολογίζοντας την διχοτόμο, η οποία χωρίζει την περιοχή της ασαφούς εξόδου σε δυο τμήματα ίσου εμβαδού τότε η ένωση αυτής της γραμμής με τον άξονα τον x δίνει την διακριτή τιμή εξόδου. Κάποιες φορές αυτή η τιμή είναι ίδια με την τιμή που δίνεται από το κέντρο βάρους.



Σχήμα 4-8: Οι πιο γνωστές τεχνικές ασαφοποίησης

4.9.2 Αυτοματοποιημένη εκτίμηση του πάχους του εδάφους

Για την κατασκευή ενός **χάρτη εκτίμησης του βάθους εδάφους** στο νησί της Σάμου, συνδυάζουμε δεδομένα και διαδικασίες που επηρεάζουν το σχηματισμό του εδάφους (όπως προαναφέρθηκαν στην Θεωρία). Καθώς επιδίωξη μας είναι να δημιουργήσουμε ένα απλό αυτοματοποιημένο μοντέλο, επιλέγουμε δεδομένα τα οποία έχουν μεγάλη επίδραση στο

πάχος του εδάφους και μπορούν να υπολογιστούν ευκολα για οποιαδήποτε περιοχή μέσω ευρέως διαθέσιμων δεδομένων. Έτσι επιλέγουμε την κλίση του εδάφους και τις χρήσεις γης (υπολογίζονται μέσω του Corine 2018 ή μέσω του δείκτη NDVI), και κατασκευάζουμε δυο ασαφή συστήματα. Καθώς δεν υπάρχουν σαφώς καθορισμένα όρια για το πως αυτές αλληλεπιδρούν και πως επηρεάζουν το πάχος του εδάφους, αλλά μόνο κάποιοι γενικοί κανόνες που προκύπτουν από την εμπειρία των ειδικών χρησιμοποιούμε ασαφή λογική για να τα συνδυάσουμε. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

- **Εισαγωγή Δεδομένων.** Εισάγουμε τα δεδομένα σε ένα σύστημα Γ.Σ.Π. Τα δεδομένα είναι οι κλίσεις του εδάφους σε % καθώς και οι χρήσεις γης (Corine 2018 ή NDVI).
- **Κρυφή Βαθμονόμηση του μοντέλου.** Προετοιμάζουμε τα δεδομένα για να τα εισάγουμε στο μοντέλο με κατάλληλες τιμές που θα αναγνωρίζει. Για τις χρήσεις γης CLC 2018 δίνουμε τιμές από 0 έως 1 ανάλογα με το πάχος που αναμένουμε για κάθε χρήση γης. Καθώς για τις χρήσεις γης δεν έχουμε πολύ μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα αναπροσαρμόζουμε το μέγεθος κυψελίδας για όλα τα δεδομένα. Επιλέγεται μέγεθος κυψελίδας 20m x 20m ώστε να βελτιώσουμε τον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων (16 φορές ταχύτερη επεξεργασία σε σχέση με μέγεθος κανάβου 5x5m) ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε καλή χωρική ακρίβεια κατά την ανάλυση και απεικόνιση των δεδομένων. Στη περίπτωση χρήσης του NDVI, δε χρειάζεται να κάνουμε μεγάλη προεργασία στα δεδομένα, απλά αναπροσαρμόζουμε τις αρνητικές τιμές του δείκτη.
- Μετατρέπουμε τις μεταβλητές εισόδους σε ασαφείς ομάδες και καθορίζουμε τις **συναρτήσεις συμμετοχής** για κάθε είσοδο, ώστε να ταιριάζουν με τα δεδομένα. Για τις κλίσεις χρησιμοποιούμε τέσσερις συναρτήσεις συμμετοχής (Πολύ Χαμηλή, Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή), με όρια τα οποία προσαρμόστηκαν βάση της ταξινόμησης LCC (βλέπε υποενότητα 4.2.1), ενώ για τις χρήσεις γης τρεις συναρτήσεις συμμετοχής (Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή). Για την έξοδο χρησιμοποιούμε τέσσερις ομάδες (Πολύ Χαμηλή έως Υψηλή). Ο διαχωρισμός γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις καλές πρακτικές σχεδιασμού ενός μοντέλου ασαφούς λογικής όπως έχουν προαναφερθεί στα αρχικά κεφάλαια.
- Δημιουργούμε 12 ασαφούς **λογικούς κανόνες** ώστε να καλύπτουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις.
- Συνδυάζουμε τα παραπάνω σε **περιβάλλον Γ.Σ.Π.**, και κατασκευάζουμε πρόγραμμα σχεδιασμένο σε **Python** (σε μια σύζευξη Python-Anaconda και της

βιβλιοθήκης scikit-fuzzy) το οποίο διαβάζει τα δεδομένα και παράγει μια τελική τιμή εξόδου του συστήματος ασαφούς λογικής για κάθε κυψελίδα της περιοχής μελέτης. Τα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος που χρησιμοποιούμε (βλέπε ανάλυση τους στην υποενότητα 2.4.1.6) είναι:

- **Ασαφής τελεστής AND:** T-Norm (minimum)
- **Ασαφής συνεπαγωγή :** product
- **Ασαφής συνάθροιση κανόνων :** maximum
- **Αποασαφοποίηση:** Κέντρο βάρους (COA)

Γίνεται οπτικοποίηση μέσω Γ.Σ.Π και έλεγχος με βάση κάποια σημεία αναφοράς τα οποία έχουν προκύψει από εργασίες υπαίθρου, και για τα οποία ξέρουμε σε πια κατηγορία αναμένεται να ανήκουν. Έτσι συγκρίνοντας τον αριθμό των σημείων της κλάσης i που εκτιμώνται ως κλάση j , και κατασκευάζοντας έναν πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) μπορούμε να δούμε την απόδοση κάθε μοντέλου σε σχέση με τη πραγματικότητα. Μέσω του πίνακα. Βασιζόμενοι στον πίνακα αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε κάποια πολύ συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα εκτίμησης της απόδοσης (σε εφαρμογές συσταδοποίησης και μηχανικής εκμάθησης). Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είναι η ακρίβεια ή αλλιώς γενική ορθότητα πρόβλεψης του μοντέλου (Accuracy) ενώ σε τέτοιες εφαρμογές πολύ συχνά χρησιμοποιούνται και άλλα μέτρα όπως η ακρίβεια η ανάκληση και το F-Score (Hossin & Sulaiman, 2015) τα οποία αναλύονται παρακάτω:

- **Ακρίβεια (precision)**, η οποία δείχνει ποιο ποσοστό από τις εκτιμήσεις μας είναι ορθές για κάθε κατηγορία.
- **Ανάκληση (recall)**, η οποία εκφράζει το ποσοστό των πραγματικών τιμών οι οποίες ταξινομήθηκαν σωστά.
- **F1 ή F-score** το οποίο είναι ένα μέτρο εκτίμησης της ακρίβειας το οποίο συνδυάζει τα δυο προηγούμενα, υπολογίζοντας τον αρμονικό μέσο όρο τους (Sasaki, 2007).

Όλα τα μέτρα εκτίμησης της απόδοσης του μοντέλου υπολογίστηκαν σε περιβάλλον R με τη βοήθεια του R-Studio και της βιβλιοθήκης Caret.

4.9.3 Εκτίμηση διάβρωσης με την υλοποίηση πέντε διαφορετικών μοντέλων ασαφούς λογικής.

Για την εκτίμηση της διάβρωσης στο νησί της Σάμου, υλοποιούμε πέντε διαφορετικά μοντέλα ασαφούς λογικής, με διαφορετικές εισόδους, συναρτήσεις συμμετοχής και λογικούς κανόνες, τα οποία έπειτα συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με τα αποτελέσματα της μεθόδου RUSLE.

Τα μοντέλα περιλαμβάνουν 2, 3 ή 4 μεταβλητές εισόδου για τις οποίες χρησιμοποιούνται διάφοροι τοπογραφικοί παράγοντες, οι χρήσεις γης ή/και η λιθολογία:

- **Παράγοντας LS.** Ο παράγοντας αυτός (τοπογραφικός δείκτης) συνδυάζει την κλίση(L) με το μήκος της κλίσης(S) σε έναν δείκτη ο οποίος δεν έχει μονάδες μέτρησης. και έτσι παρέχει μια καλύτερη εκτίμηση του δυναμικού διάβρωσης στις κλιτύς των ορεινών όγκων.Ο δείκτης είναι χωρικά συνεχής (pathway) καθώς λαμβάνει υπόψη και τις ανάντι περιοχές, πλεονεκτώντας σε σχέση με τη σημειακή κλίση. Σε πεδινές περιοχές ο δείκτης εμφανίζει τιμές 0 έως 1, ενώ σε ορεινές περιοχές οι τιμές του φτάνουν ή και ξεπερνούν το 10 σε κάποια σημεία. Η ακριβής τιμή που λαμβάνει ο δείκτης για συγκεκριμένες τιμές L και S έχει αναλύεται από τους Renard et al., 1987). Οι συναρτήσεις μέλους δημιουργήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αλλά και τις συνθήκες της περιοχής μελέτης (κατανομή τιμών και μέση τιμή).

- **TWI ή rDUNE.** Ο δείκτης TWI δίνει μια εκτίμηση για την χωρική κατανομή της υγρασίας στο έδαφος. Καθώς ένας εδαφικός σχηματισμός με μεγαλύτερα προυπάρχοντα ποσοστά υγρασίας στο έδαφος είναι ευκολότερο να κορεστεί και άρα να ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή, η οποία με τη σειρά της επιφέρει τη διάβρωση του εδάφους από το νερό που κινείται σχηματίζοντας χαραδρωτή διάβρωση (gullies) αυξάνοντας έτσι την επικινδυνότητα έντονης διάβρωσης σε αυτή την περιοχή (Sharma, 2010). Ο δείκτης rDUNE είναι ένας νεότερος δείκτης ο οποίος είναι συγκρίσιμος με τον TWI αλλά δεν έχει ακόμα δοκιμαστεί σε μεγάλο βαθμό. Μελετάται το αν μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον TWI όταν χρησιμοποιηθεί σε ένα ασαφές μοντέλο υπολογισμού της διάβρωσης.

- **Βλάστηση και δείκτης NDVI.** Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη κατά την εκτίμηση της διάβρωσης σε μια περιοχή είναι η βλάστηση της περιοχής μελέτης. Σε περιοχές που καλύπτονται από έντονη βλάστηση αναμένουμε να έχουμε χαμηλότερη διάβρωση σε σχέση με άλλες περιοχές για διάφορους λόγους (μείωση ενέργειας των κατακρημνισμάτων, άυξηση της τραχύτητας του εδάφους - μείωση της

κινητικής δύναμης του νερού, ελέγχει το πάχος του εδάφους αλλά και της ζώνης αποσάθρωσης του μητρικού υλικού, και συνεπακόλουθα καθορίζει το ρυθμό κατείσδυσης του νερού κ.α.).

• **Λιθολογία.** Η λιθολογία παίζει σημαντικό ρόλο τόσο κατά το σχηματισμό του εδάφους όσο και κατά τη διαμόρφωση των υδρογεωμορφολογικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής. Η σύσταση αλλά και η υφή των πετρωμάτων επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα τους (Meybeck, 1987), αλλά η τρωτότητα τους στη διάβρωση δεν είναι ευκολο να μετρηθεί καθώς ακόμα και για το ίδιο πέτρωμα η τρωτότητα διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή. Παρόλαυτα πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με αυτό το θέμα (π.χ. Jensen & Painter, 1974; Selby, 1987) και έχουν προτείνει διάφορες ταξινομήσεις με βάση τη τρωτότητα στη διάβρωση. Τα νεογενή και Τεταρτογενή διαβρώνονται πολύ εύκολα, ενώ οι συμπαγείς βράχοι (π.χ. μάρμαρα) διαβρώνονται πολύ αργά. Οι μαργαικοί σχηματισμοί ανήκουν στους ευδριάβρωτους σχηματισμούς και οι σχιστόλιθοι εμφανίζουν μέτρια αντίσταση στη διάβρωση. Σε πολλές μελέτες η λιθολογία μιας περιοχής συσχετίζεται με τη διαβρωσιμότητα του εδάφους και ο δείκτης διαβρωσιμότητας (k-factor) υπολογίζεται απευθείας από τη λιθολογία (π.χ. Rozos et al., 2013). Έτσι οι γεωλογικοί σχηματισμοί ομαδοποιήθηκαν σε λιθολογικούς με παρόμοια χαρακτηριστικά, όσον αφορά τη διάβρωση και έπειτα κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τη τρωτότητα τους στη διάβρωση.

Με το συνδυασμό των παραπάνω μεταβλητών κατασκευάζουμε πέντε διαφορετικά μοντέλα εκτίμησης της διάβρωσης:

1. **Μοντέλο 2 μεταβλητών (παράγοντας LS και NDVI)**
2. **Μοντέλο 2 μεταβλητών (παράγοντας LS και τρωτότητα – λιθολογία)**
3. **Μοντέλο 3 μεταβλητών (παράγοντας LS, NDVI, τρωτότητα)**
4. **Μοντέλο 4 μεταβλητών (παράγοντας LS, NDVI, τρωτότητα, TWI)**
5. **Μοντέλο 4 μεταβλητών (παράγοντας LS, NDVI, τρωτότητα, rDUNE)**

Τα γενικά βήματα που ακολουθούμε και για τα πέντε μοντέλα είναι παρόμοια με τα βήματα που αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα αλλά με μικρές διαφοροποιήσεις:

- **Εισαγωγή Δεδομένων.** Εισάγουμε τα κατάλληλα δεδομένα (πλήθος από 2 έως 4 εισόδους) σε ένα σύστημα Γ.Σ.Π.
- **Κρυφή Βαθμονόμηση** του μοντέλου. Προετοιμάζουμε τα δεδομένα για να τα εισάγουμε στο μοντέλο με κατάλληλες τιμές που θα αναγνωρίζει. Για το δείκτη NDVI προσαρμόζουμε το διάστημα τιμών ώστε να είναι από 0 έως 1 (εξισώνουμε με 0 όσες είναι αρνητικές). Επιλέγεται μέγεθος κυψελίδας 20m x 20m ώστε να

βελτιώσουμε τον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων (16 φορές ταχύτερη επεξεργασία σε σχέση με μέγεθος κανάβου 5x5m) ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε καλή χωρική ακρίβεια κατά την ανάλυση και απεικόνιση των δεδομένων.

- Μετατρέπουμε όλες τις μεταβλητές **εισόδους σε ασαφείς ομάδες** και καθορίζουμε τις **συναρτήσεις συμμετοχής** για κάθε είσοδο, ώστε να ταιριάζουν με τα δεδομένα. Ο διαχωρισμός γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις καλές πρακτικές σχεδιασμού ενός μοντέλου ασαφούς λογικής όπως έχουν προαναφερθεί στα αρχικά κεφάλαια. Επιπλέον το **πλήθος των συναρτήσεων συμμετοχής** καθορίζεται με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία λογικών κανόνων, καθώς μεγάλο πλήθος συναρτήσεων συμμετοχής συνεπάγεται μεγάλο πλήθος κανόνων οι οποίοι δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμοι.
- Δημιουργούμε το κατάλληλο πλήθος **ασαφών λογικών κανόνων** ώστε να καλύπτουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις.
- Συνδυάζουμε τα παραπάνω σε περιβάλλον **Γ.Σ.Π.**, και κατασκευάζουμε πρόγραμμα σχεδιασμένο σε **Python** (σε μια σύζευξη Python-Anaconda και της βιβλιοθήκης scikit-fuzzy) το οποίο διαβάζει τα δεδομένα και παράγει μια τελική τιμή εξόδου του συστήματος ασαφούς λογικής για κάθε κυψελίδα της περιοχής μελέτης. Τα χαρακτηριστικά των ασαφών συστημάτων Mamdami που χρησιμοποιούμε (βλέπε ανάλυση τους στην υποενότητα 2.4.1.6) είναι:
 - **Ασαφής τελεστής AND**: T-Norm (minimum)
 - **Ασαφής συνεπαγωγή** : product
 - **Ασαφής συνάθροιση κανόνων** : maximum
 - **Αποασαφοποίηση: Κέντρο βάρους (COA)**

Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους αλλά και με τα αποτελέσματα του εμπειρικού μοντέλου RUSLE για την εκτίμηση της απόδοσης τους. Οι λεπτομέρειες κάθε ασαφούς μοντέλου, αλλά και οι ασαφείς κανόνες παρατίθενται στην ενότητα 5.10.

4.9.4 Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας μέσω συστήματος ασαφούς λογικής

Για την εκτίμηση της **πλημμυρικής επικινδυνότητας**, εξετάζουμε ολόκληρες υδρολογικές λεκάνες ή υπο-λεκάνες, καθώς όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3 η έννοια της υδρολογικής λεκάνης έχει εξέχουσα σημασία στο καθορισμό των υδρολογικών συνθηκών. Έτσι μέσω των ιστορικών στοιχείων πλημμυρών (βλέπε ενότητα 4.1.5) αναγνωρίζονται κάποιες λεκάνες οι οποίες έχουν σημαντικό ιστορικό πλημμυρικών γεγονότων. Επιπλέον από κατοίκους της περιοχής πληροφορούμαστε για την ύπαρξη και μικρότερων μη καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως επίσης και για τα χαρακτηριστικά των πλημμυρικών γεγονότων τα οποία παρατηρήθηκαν στο παρελθόν.

Αναγνωρίστηκαν τέσσερις υδρολογικές λεκάνες οι οποίες έχουν κατά το παρελθόν σημαντικά προβλήματα οι οποίες είναι:

- **Μεγάλο Ρέμα** το οποίο ξεκινώντας από τα παρυφές του Κερκετέα αλλά και τις Αμπέλου καταλήγει εντός της πόλης του Καρλοβασίου.
- **Φουρνιώτικος ποταμός**. Είναι η μεγαλύτερη λεκάνη του νησιού και αποστραγγίζει τον ορεινό όγκο της Αμπέλου καταλήγωντας στο ανατολικό άκρο του Καρλοβασίου σε εμπορική – βιομηχανική ζώνη.
- **Ίμβρασος ποταμός**, ο οποίος ρέει μέσα από τη μεγαλύτερη νεογενή λεκάνη του νησιού και καταλήγει στη παραλία του Ηραίου.
- **Ρέμα Μελέτη**. Πρόκειται για μικρή λεκάνη η οποία ξεκινώντας από τον Κερκετέα καταλήγει στον Κάμπο Μαραθοκάμπου εντός του αστικού ιστού.

Για τον καθορισμό του πλημμυρικού κινδύνου λειτουργούμε σε επίπεδο **υπολεκάνης** και υπολογίζουμε τις μορφομετρικές παραμέτρους κάθε υπολεκάνης, οι οποίες παρατίθενται αναλυτικά στην ενότητα 5.2.1. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ένα πληθος μεταβλητών (17) για κάθε υδρολογική υπο-λεκάνη τα οποία είναι δυνητικές εισοδοι του μοντέλου εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου. Καθώς όσο αυξάνει ο αριθμός των μεταβλητών συνήθως χάνεται η ικανότητα γενικευσης ενός μοντέλου, συνήθως σε εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης (ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα) ελαττώνουμε τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου (Bishop, 1995; Foody & Arora, 1997; Maw et al., 2004).

Έτσι πριν από την εφαρμογή οποιουδήποτε μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης, και όταν ο αριθμός των δυνητικών εισόδων είναι πολύ μεγάλος, θα πρέπει να αναγνωρίζονται οι μεταβλητές οι οποίες είναι πλεονάζουσες αλλά και αυτές οι οποίες ενδεχομένως δε σχετίζονται με το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε, κάτι που οδηγεί σε απλούστευση

του προβλήματος, τη βελτίωση του χρόνου υπολογισμού αλλά και την ακρίβεια του μοντέλου μας (Bolon-Canedo et al., 2011; Chandrashekar & Sahin, 2014).

Δύο είναι οι βασικότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται (Langley, 1994): (α) φιλτράρισμα των μεταβλητών πριν από την εφαρμογή του μοντέλου και (β) τεχνικών οι οποίες ενσωματώνουν το φιλτράρισμα εντός του μοντέλου και κρατάνε ως εισόδους μόνο τις μεταβλητές που δίνουν καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης (wrapper methods). Οι πρώτες είναι πιο απλές στην εφαρμογή και βασίζονται είτε στο κέρδος πληροφορίας (information gain) είτε στη **συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών (correlation matrix)**.

Έτσι επιλέχθηκε να εξεταστεί ο **πίνακας συσχέτισης** όλων των μεταβλητών εισόδου ώστε να μειωθούν οι μεταβλητές που θα εισάγουμε στο ασαφές μοντέλο εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου πριν από την υλοποίησή του.

Ο πίνακας συσχέτισης υπολογίζεται για ζεύγη μεταβλητών(x,y), με διάφορες μεθόδους, όπως ο υπολογισμός του συντελεστή Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}}$$

Ο **συντελεστής λαμβάνει τιμές -1 έως 1**, και δείχνει μικρή συσχέτιση όταν είναι γύρω από το 0 ενώ υπάρχει υψηλή συσχέτιση όταν είναι κοντά στο 1 ή το -1. Έπειτα δημιουργείτε πίνακας συσχέτισης και γίνεται επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών και επιλέγονται τιμές οι οποίες βρίσκονται κοντά στο 0 ενώ απορρίπτονται οι απολύτως σχετιζόμενες τους (Bolon - Canedo et al., 2011; Chouvatut & Wattanapairotrat, 2019)

Ο **πίνακας συσχέτισης** για της δευτερογενείς μεταβλητές κατασκευάστηκε σε περιβάλλον R (βιβλιοθήκη “corrplot”), και αναγνωρίστηκαν 2 τοπογραφικοί δείκτες οι οποίοι έχουν τιμή συσχέτισης κοντά στο 0: (α) η υφή, (β) ο λόγος αναγλύφου (relief ratio). Σε αυτούς προσθέτουμε και έναν παράγοντα χρήσεων γης μέσω του δείκτη NDVI Και σχηματίζουμε ένα ασαφές σύστημα Mamdami ακολουθώντας τα γνωστά βήματα:

- **Εισαγωγή Δεδομένων.** Εισάγουμε τα κατάλληλα δεδομένα σε ένα σύστημα Γ.Σ.Π.
- **Κρυφή Βαθμονόμηση του μοντέλου.** Προετοιμάζουμε τα δεδομένα για να τα εισάγουμε στο μοντέλο με κατάλληλες τιμές που θα αναγνωρίζει.
- Μετατρέπουμε τις μεταβλητές **εισόδους σε ασαφείς ομάδες** και καθορίζουμε τις συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε είσοδο, ώστε να ταιριάζουν με τα δεδομένα. Ο διαχωρισμός γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις καλές πρακτικές σχεδιασμού ενός μοντέλου ασαφούς λογικής όπως έχουν προαναφερθεί στα αρχικά κεφάλαια.

- Δημιουργούμε το κατάλληλο πλήθος **ασαφών λογικών κανόνων** ώστε να καλύπτουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις.
- Συνδυάζουμε τα παραπάνω σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., και κατασκευάζουμε πρόγραμμα σχεδιασμένο σε Python (σε μια σύζευξη Python-Anaconda και της βιβλιοθήκης scikit-fuzzy) το οποίο διαβάζει τα δεδομένα και παράγει μια τελική τιμή εξόδου του συστήματος ασαφούς λογικής για κάθε υπολεκάνη.

Τα **χαρακτηριστικά των ασαφών συστημάτων Mamdani** που χρησιμοποιούμε (βλέπε ανάλυση τους στην υποενότητα 2.4.1.6) είναι:

- Ασαφής τελεστής AND: T-Norm (minimum)
- Ασαφής συνεπαγωγή : product
- Ασαφής συνάθροιση κανόνων : maximum
- Αποασαφοποίηση: Κέντρο βάρους (COA)

4.10 Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα – Self Organized Maps (SOM)

Τα νευρωνικά δίκτυα όπως προαναφέρθηκε μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε εφαρμογές **επιβλεπόμενης όσο και μη επιβλεπόμενης μάθησης**. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του προβλήματος που θέλουμε να αναλύσουμε αλλά και τη διαθεσιμότητα των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μη επιβλεπόμενης μάθησης και συγκεκριμένα ένα νευρωνικό δίκτυο με **ανταγωνιστική εκπαίδευση** (competitive training method). Αυτά τα δίκτυα είναι ικανά να αναγνωρίζουν ομοιότητες και συσχετίσεις ανάμεσα στα δεδομένα εκπαίδευσης και έπειτα να τα ομαδοποιήσουν (Nunes da Silva, 2017).

Το **SOM** είναι ένα νευρωνικό δίκτυο δυο επιπέδων το οποίο περιέχει ένα σειριακό επίπεδο εισόδου και ένα δευτερο επίπεδο εξόδου το οποίο κατασκευάζεται σε ένα διδιάστατο πλέγμα (Σχήμα 4-10). Σε αντιστοιχία με τα απλά ανταγωνιστικά δίκτυα που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο βασικός αλγόριθμος του SOM, ακολουθεί (Nunes da Silva et al., 2017; Tan et al., 2019).

Τα βήματα είναι παρόμοια με αυτά που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τα δίκτυα **ανταγωνιστικής εκμάθησης**. Στα δίκτυα **SOM** (Jaramillo et al., 2013; Natita et al., 2016; Nunes da Silva, 2017; Aggarwal, 2018) χρησιμοποιείται μια νέα έννοια αυτή της γειτονικότητας, μέσω της οποίας ένας νευρώνας i έχει γειτονικούς κάποιους νευρώνες που βρίσκονται σε κάποια ακτίνα από αυτόν (R) δημιουργώντας έτσι για κάθε κόμβο του νευρωνικού δικτύου ένα σύνολο γειτονικών κόμβων (Γ_i^R). Στον παραπάνω αλγόριθμο όταν υπάρχει ένας νικητής νευρώνας i τότε αναπροσαρμόζονται και οι νευρώνες που ανήκουν στο σύνολο Γ_i^R . Η αναπροσαρμογή αυτή μπορεί να γίνεται με διαφορετικό τρόπο, πχ αν $R=1$ τότε οι γείτονες μπορεί να αναπροσαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο όπως ο νικητής αλλά χρησιμοποιώντας το μισό του ρυθμού εκμάθησης:

$$w^i = w_{previous}^i + l \cdot (x^k - w_{previous}^i), \text{ για το νικητή νευρώνα}$$

$$w^\Gamma = w_{previous}^\Gamma + \frac{l}{2} \cdot (x^k - w_{previous}^\Gamma), \text{ για τους γειτονικούς}$$

Στην πράξη όμως το **R είναι πάντα μεγαλύτερο από το 1**, και χρησιμοποιείται μια **συνάρτηση γειτονικότητας** (neighborhood function) η οποία καθορίζει το ρυθμό αλλαγής στους νευρώνες που γειτονεύουν με τον νευρώνα που επικρατεί και επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης.

Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου τύπου: Αυτοοργανούμενου Χάρτη (SOM)

1. Λήψη δειγμάτων εκπαίδευσης (x^k) από τον πληθυσμό και κανονικοποίηση τους.
2. Αρχικοποίηση των παραμέτρων του χάρτη SOM:
 - a. Ορισμός τοπολογίας του δικτύου, ομάδων γειτονίας (neighborhood sets), και ρυθμού εκμάθησης (learning rate)
 - b. Αρχικοποίηση των βαρών (w^i) των n νευρώνων, τα οποία αρχικά λαμβάνουν τις τιμές τυχαίων n δειγμάτων
 - c. Έναρξη μετρητή εποχών (epoch = 0)
3. Επανάλαβε, για όλα τα δείγματα σε κάθε εποχή και για όσο η μεταβολή των κέντρων βάρους δε ξεπερνάει μία τιμή κατωφλίου:
 - a. Επέλεξε ένα από τα αντικείμενα εισόδου, υπολόγισε την ευκλείδεια απόσταση του από όλους τους νευρώνες και υπολόγισε το πλησιέστερο κέντρο βάρους (νικητής νευρώνας): $argmin\{\|x^k - w^i\|\}$
 - b. Ενημέρωσε τα βάρη του νικητή νευρώνα, αλλά και των γειτονικών νευρώνων.
 - c. Κανονικοποίησε τα αναπροσαρμοσμένα βάρη και αυξήσε το μετρητή εποχής: $epoch = epoch + 1$
4. Υπολόγισε για κάθε αντικείμενο το πλησιέστερο κέντρο βάρους και αποθήκευσε την πληροφορία αλλά και την τελική δομή του πλέγματος του δικτύου SOM.
5. Ανάλυση του τελικού χάρτη για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και αναγνώριση περιοχών που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες κλάσεις.
6. ΤΕΛΟΣ

Αλγόριθμος 2: Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου τύπου SOM

Επιπλέον έχει αποδειχτεί (Ritter et al., 1992) ότι ένας **ρυθμός εκμάθησης** ο οποίος **μεταβάλλεται με το χρόνο** μπορεί να είναι πιο αποδοτικός. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιλέγουμε μια συνάρτηση “Gauss”, με ρυθμό εκμάθησης μεταβαλλόμενο με το χρόνο οπότε για τους γειτονικούς κόμβους θα ισχύει:

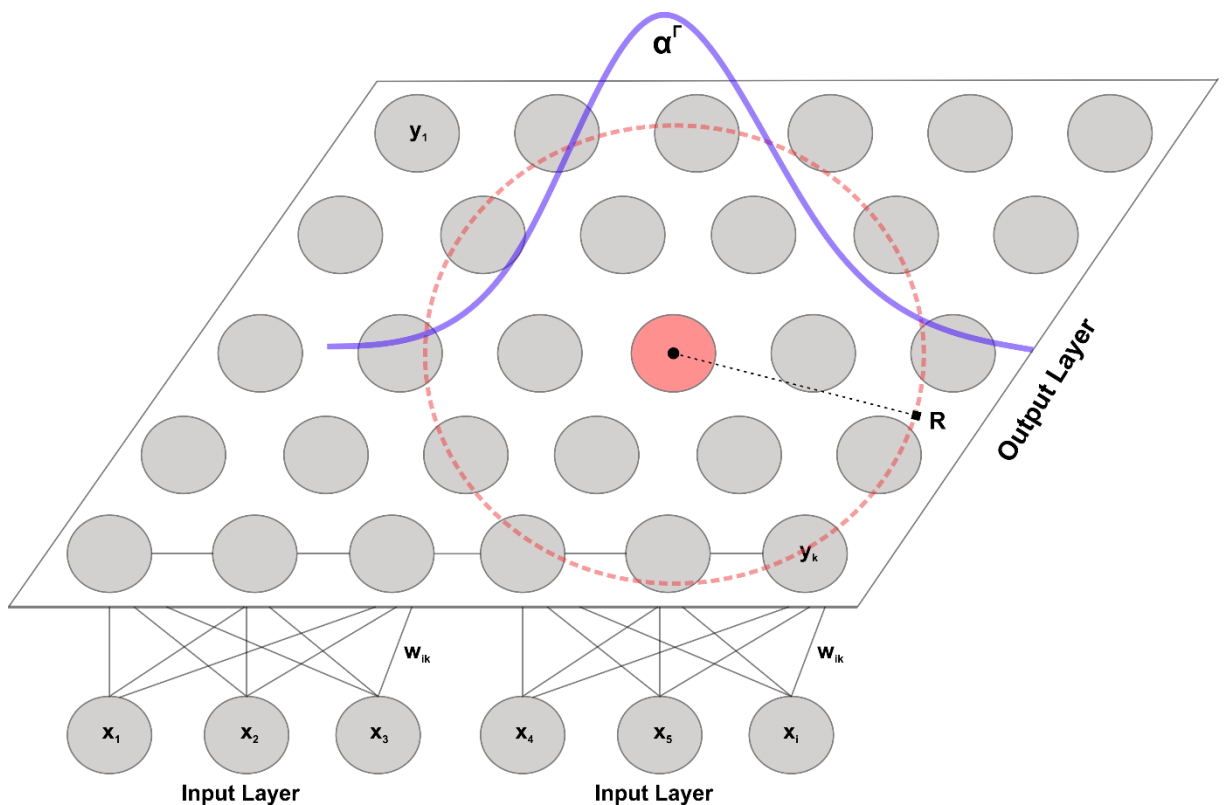
$$w^i = w_{previous}^i + l(t) \cdot a^i(x^k - w_{previous}^i)$$

όπου a^r είναι ένας συντελεστής γειτονικότητας (Natita et al., 2016), ο οποίος εξαιτίας της κανονικής κατανομής που χρησιμοποιείται παρέχει ένα ρυθμό ελάττωσης (decay rate) ανάλογα με την απόσταση κάθε γείτονα από το νευρώνα-νικητή:

$$a^r = l(t) \times e^{-\frac{\|w^i - w^r\|^2}{2\sigma^2}} = l(t) \times e^{-\frac{\|w^i - w^r\|^2}{2n_{i^r}t^2}}$$

Όπου $l(t)$ ο ρυθμός εκμάθησης για την τρέχουσα εποχή (epoch) και n_{i^r} είναι η ακτίνα γειτονικότητας, και υπολογίζεται μέσω μιας συνάρτησης εκθετικής μείωσης :

$$n_{i^r}(t) = n(0) \times e^{-\frac{t}{T}}$$



Εικόνα 4-10: Σχηματική απεικόνιση νευρωνικού δικτύου SOM και η συνάρτηση γειτονικότητας Gauss η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

4.10.1 Εύρεση βέλτιστου αριθμού συστάδων (clusters)

Μέσω της **ανάλυσης συστάδων** ομαδοποιούνται αντικείμενα δεδομένων με βάση της πληροφορίες που εμπεριέχονται σε αυτά. Ο κύριος στόχος της συσταδοποίησης είναι τα αντικείμενα μιας ομάδας να σχετίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο μεταξύ τους και να μη σχετίζονται με αντικείμενα άλλων ομάδων. Η **συσταδοποίηση** είναι μια μορφή

κατηγοριοποίησης καθώς τοποθετεί τα αντικείμενα κάτω από μια ετικέτα, ενώ μπορεί να είναι επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη (Tan et al., 2019). Έτσι η μέθοδος SOM που εφαρμόσαμε κατά μια έννοια είναι μια μέθοδος συσταδοποίησης των δεδομένων. Η εύρεση όμως του **πραγματικού (βέλτιστου) αριθμού των συστάδων** δεν είναι εύκολη υπόθεση, και ο θόρυβος που εμπεριέχεται σε πολύπλοκα δεδομένα κάνει την εύρεση του ακόμα δυσκολότερη (Dudoit & Fridlyand, 2002). Πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες έχουν προταθεί (βλέπε Amorim & Hennig, 2015) εκ των οποίων ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους είναι ο **δείκτης “Silhouette”** (Rousseeuw, 1987) ο οποίος φαίνεται να δίνει καλά αποτελέσματα σε πλήθος προβλημάτων συσταδοποίησης (Arbelaitz et al., 2013). Ο δείκτης αυτός εκτιμά πόσο καλά προσαρμόζονται τα δεδομένα στην συστάδα στην οποία ανήκουν, συγκρίνοντας το μήκος (απόσταση) ενός αντικειμένου με όλα τα υπόλοιπα αντικείμενα της συστάδας σε σχέση με το μήκος (Silhouette length) του από τα αντικείμενα άλλων συστάδων δηλαδή:

$$s(x_i) = \frac{b(x_i) - a(x_i)}{\max\{a(x_i), b(x_i)\}}$$

όπου $a(x_i)$ είναι η μέση ανομοιότητα του αντικειμένου από τα αντικείμενα της ίδιας συστάδας και $b(x_i)$ είναι η ελάχιστη ανομοιότητα του αντικειμένου σε σχέση με άλλες συστάδες.

Ο μέσος όρος του **μήκους “Silhouette”** για όλες της συστάδες είναι ο τελικός δείκτης “Silhouette” για τη μέθοδο συσταδοποίησης μας. Ο δείκτης κυμαίνεται μεταξύ -1 και 1, με μεγάλες τιμές να δίνουν καλύτερα αποτελέσματα κατά τη συσταδοποίηση.

4.10.2 Ιεραρχική ταξινόμηση

Μέσω της εφαρμογής του ‘SOM’ τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε τόσες ομάδες όσες ο αριθμός των νευρώνων που υπάρχουν στο νευρωνικό δίκτυο. Αν θέλουμε να ομαδοποιήσουμε σε τρεις ομάδες, θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε μόνο τρεις νευρώνες, γεγονός όμως που καθιστά το SOM μη αποδοτικό. Έτσι συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αρκετοί νευρώνες οι οποίοι έπειτα ομαδοποιούνται είτε οπτικά (καθώς ο χάρτης παρέχει κατάλληλη πληροφορία) είτε εφαρμόζοντας εκ των υστέρων μια άλλη τεχνική συσταδοποίησης όπως τα **k-means** ή η **ιεραρχική συσταδοποίηση** (hierarchical clustering). Επιγραμματικά στην ιεραρχική συσταδοποίηση, αρχικά θεωρούμε όλους τους νευρώνες ως ξεχωριστές ομάδες, και σε κάθε βήμα συγχωνεύουμε κοντινά ζευγη ομάδων (με βάση τις αποστάσεις μεταξύ τους οι οποίες υπολογίστηκαν από το SOM). Σε κάθε βήμα

αναπροσαρμόζονται οι αποστάσεις μεταξύ της νέας συστάδας και της αρχική συστάδας ενώ η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να απομείνουν k συστάδες όπου k ο βέλτιστος αριθμός συστάδων (Tan et al., 2019).

Η εφαρμογή της **ιεραρχικής συσταδοποίησης** υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ‘R Programming Language’, ώστε να λάβουμε το βέλτιστο αριθμό συστάδων, μετά από την εφαρμογή καθενός από τα μοντέλα διάβρωσης που υλοποιήθηκαν.

4.10.3 Εκτίμηση διάβρωσης με τη χρήση νευρωνικών δικτύων

Για την εκτίμηση της διάβρωσης μέσω ΤΝΔ (ANN), χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιοι συνδυασμοί δεδομένων (τρωτότητα λιθολογικού σχηματισμού, χρήσεις γης (NDVI), LS factor και rDUNE ή TWI) με τα μοντέλα ασαφούς λογικής ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ τους. Δοκιμάστηκαν πολλές διαφορετικές τοπολογίες (πλέγματα) του SOM, όπως 1x3, 3x3, 3x5, 5x5 και καταλήξαμε να χρησιμοποιούμε ένα πλέγμα 10x10 καθώς φάνηκε ότι διαχωρίζει καλύτερα της ομάδες μεταξύ τους. Από το σύνολο των δεδομένων, λάβαμε ένα τυχαίο δείγμα μεγέθους $n=50.000$ και εκπαιδεύσαμε το SOM, μέσω της R Programming Language (βιβλιοθήκη kohonen), χρησιμοποιώντας ένα ρυθμό εκμάθησης (learning rate) ο οποίος φθίνει γραμμικά ξεκινώντας από το 0.05 και φθάνοντας έως το 0.01 και έναν αριθμό εποχών :

$$epoch = 50$$

Έπειτα προβλέψαμε το τελικό αποτέλεσμα για κάθε σημείο του πληθυσμού των δεδομένων και αναγνωρίσαμε οπτικά της ομάδες που σχηματίζονται. Ο βέλτιστος αριθμός των κλάσεων υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου “Silhouette”, (βιβλιοθήκη factoextra) και έπειτα ταξινομήσαμε τους νευρώνες μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια ιεραρχική προσέγγιση η οποία εφαρμόστηκε στο βαθμό γειτονικότητας και υλοποιήθηκε επίσης στην R (εντολή hclust).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα και Συζήτηση

ΕΝΟΤΗΤΑ 5Α: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

5.1 Τοπογραφικές παράμετροι

Όπως προαναφέρθηκε στη μεθοδολογία αλλά και στη θεωρία οι τοπογραφία παίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες της διάβρωσης και στον καθορισμό των υδρολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τον πλημμυρικό κίνδυνο. Με βάση όσα περιγράφηκαν λεπτομερώς στην Ενότητα 4.2.1 υπολογίζονται, μέσω Γ.Σ.Π. τόσο οι κλασσικές τοπογραφικές παράμετροι όπως η κλίση όσο και -state of the art- παράμετροι τελευταίας γενιάς όπως ο δείκτης HAND και ο DUNE. Τα βασικά στατιστικά μεγέθη για όλους τους υπολογισμένους δείκτες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, ενώ ο κάθε δείκτης παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες υποενότητες.

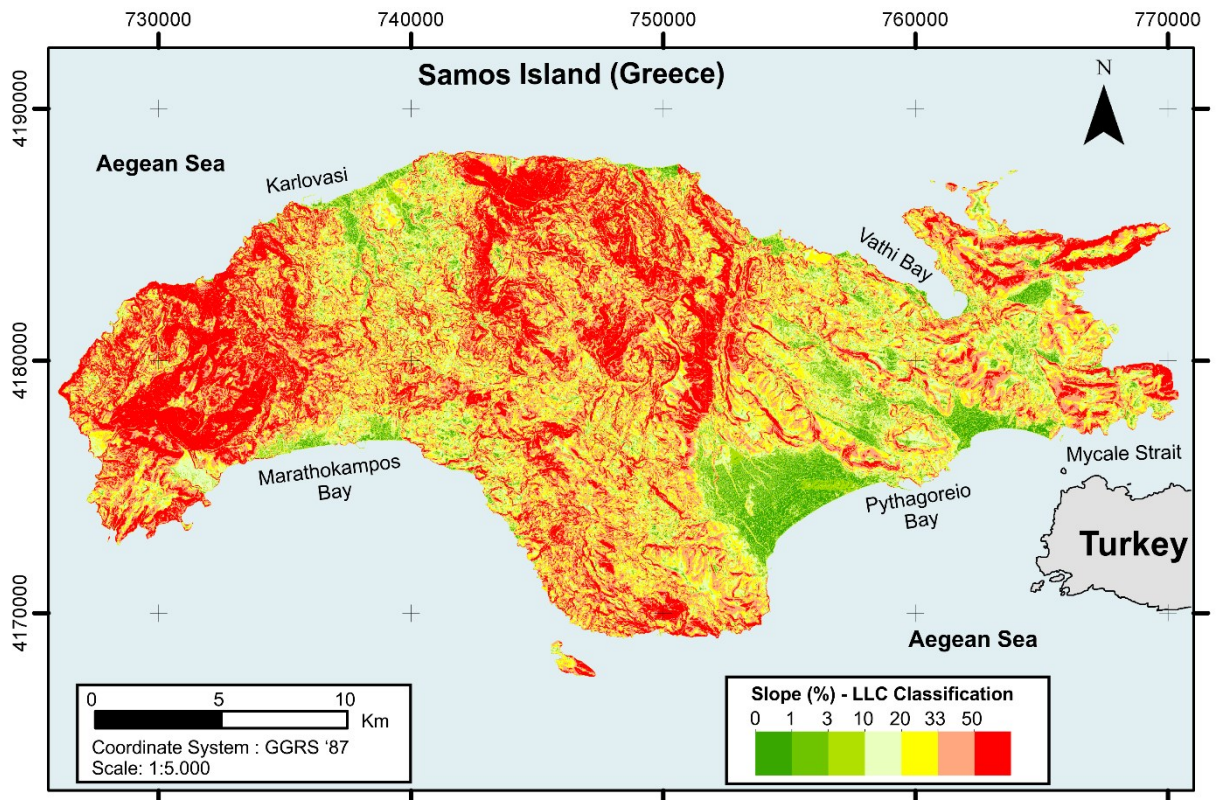
Πίνακας 5-1: Μέση τιμή, μέγιστη τιμή και τυπική απόκλιση όλων των βασικών τοπογραφικών παραμέτρων του νησιού της Σάμου.

	mean	std	max
DEM (m)	312.6	266.62	1234
SLOPE %	37.29	25.79	944.11
LS FACTOR	5.35	4.06	112
TWI	5.56	2.31	23.9
HAND (m)	55.85	60.16	793.5
DUNE	0.30	0.30	742
lnHAND	3.32	1.41	6.56
rHAND	1.58	1.23	7.4

5.1.1 Κλίσεις

Σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. υπολογίζουμε τις κλίσεις σε % για το νησί της Σάμου, βασιζόμενοι στο DEM 5x5 m της περιοχής. Ταξινομούμε τις κλίσεις βάση της ταξινόμησης LCC, και τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται μέσω του Arc Map (Σχήμα 5-1). Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες κλίσεις (>50%) συγκεντρώνονται στο δυτικό τμήμα του νησιού, στο όρος Κερκετέας, ενώ και η Άμπελος στο κεντρικό τμήμα παρουσιάζει υψηλές κλίσεις σε σημαντικό της τμήμα. Στα δυτικά ο ορεινός όγκος της Ζωοδόχου Πηγής παρουσιάζει σχετικά ομαλή μορφολογία, με τις ενδιαμέσες κλίσεις (10 – 50%) να επικρατούν. Οι

νεογενείς λεκάνες του Καρλοβασίου – Μαραθοκάμπου και Ηραίου – Πυθαγορείου – Μυτιλινιών παρουσιάζουν σχεδόν επίπεδο ανάγλυφο όπως είναι αναμενόμενο.



Σχήμα 5-1: Χάρτης κλίσεων (%) για το νησί της Σάμου. Οι κλίσεις με βάση την ταξινόμηση LLC.

Στο πίνακα 5-1, ο οποίος ακολουθεί, παρουσιάζεται η κατανομή των κλίσεων για ολόκληρο 2το νησί στις 8 κλάσεις της ταξινόμησης LLC (7 ομάδες κλίσεων). Το νησί της Σάμου χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις, καθώς μόνο το 11.5% της έκτασης της είναι πεδινό (<10% κλίση), ενώ το 50.4 % της έκτασης της παρουσιάζει πολύ μεγάλες κλίσεις (>33%), γεγονός που ευνοεί την έντονη διάβρωση και την εμφάνιση των ξαφνικών πλημμυρών στο νησί.

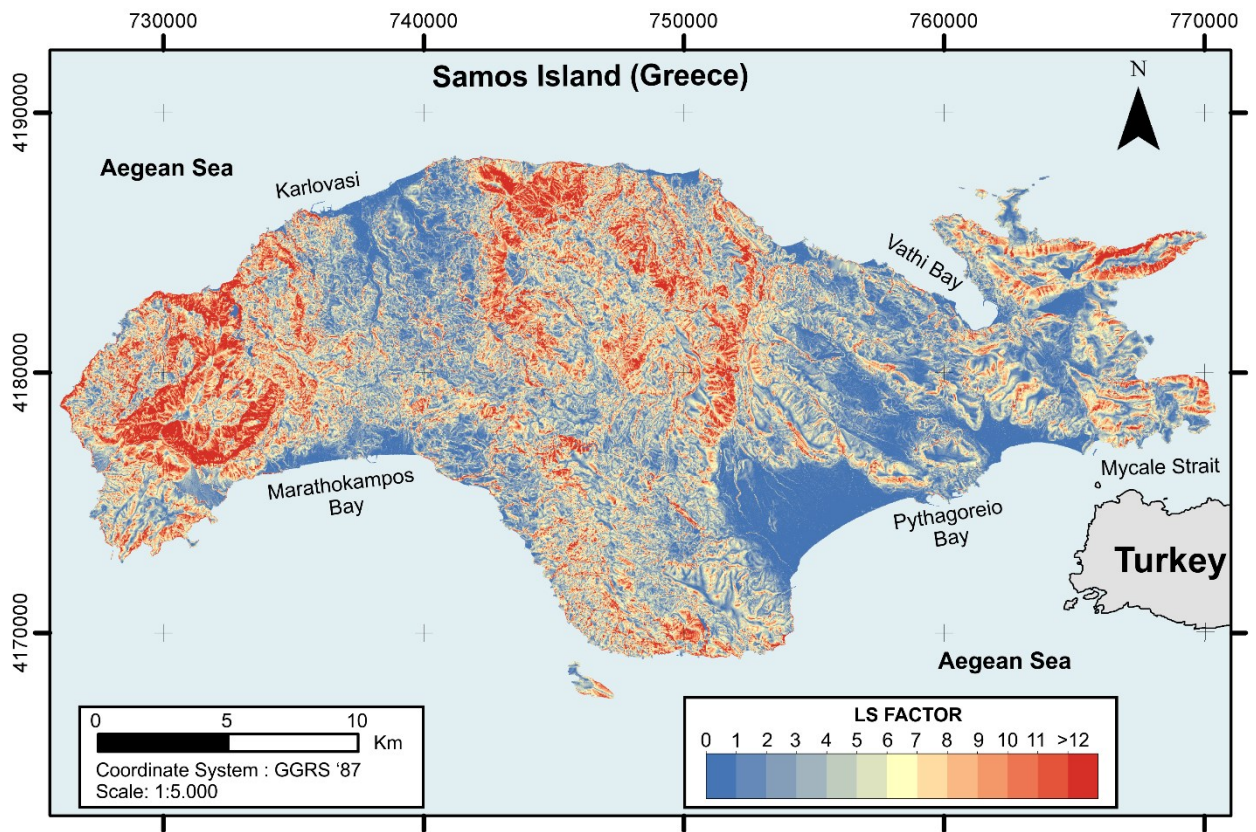
Πίνακας 5-2: Διαχωρισμός των κλίσεων στο νησί της Σάμου βάση της ταξινόμησης LCC (Klingebiel & Montgomery, 1961) και το εμβαδό (σε % του συνολικού) για κάθε ομάδα κλίσεων.

Land Capability Classes								
LCC class	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8
Slope %	<1	1-3	3-10	10-20	20-33	20-33	33-50	>50
% of area	4.0	0.1	7.4	16.5		21.6	24.7	25.7

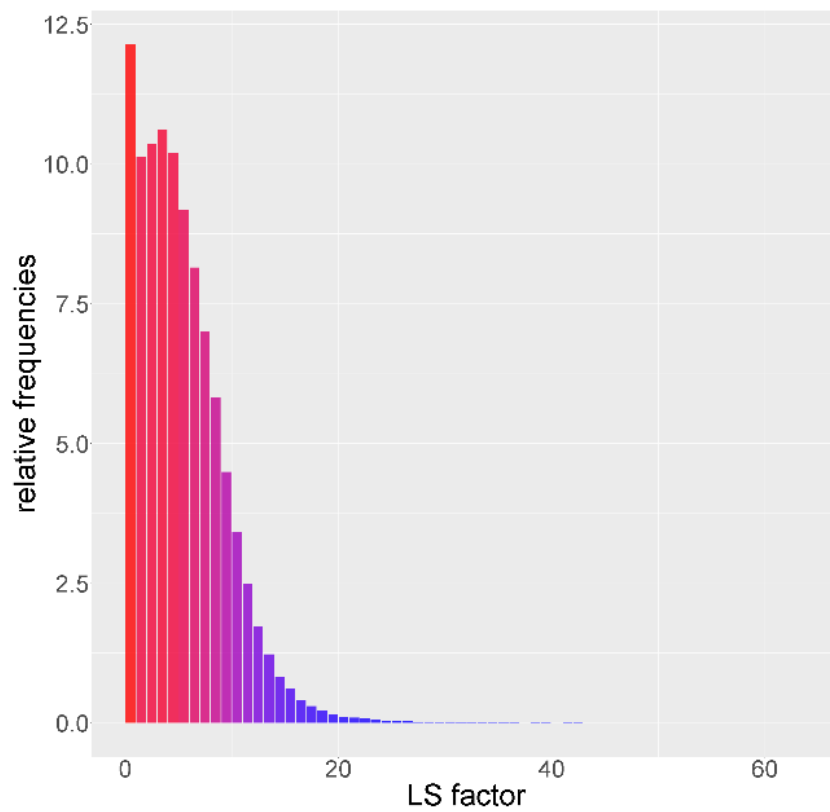
5.1.2 Παράγοντας κλίσης και μήκους κλίσεως (LS factor)

Σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην μεθοδολογία υπολογίζουμε τον παράγοντα LS ο οποίος συνδυάζει την κλίση με το μήκος της κλίσης και μπορεί να περιγράψει καλύτερα την επίδραση της μορφολογίας στη διάβρωση και το δυναμικό επιφανειακής απορροής. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές (>10) συγκεντρώνονται στο δυτικό τμήμα του νησιού, στο όρος Κερκετέας, ενώ και η Άμπελος στο κεντρικό τμήμα παρουσιάζει υψηλές κλίσεις σε ένα μέρος της. Στα δυτικά ο ορεινός όγκος της Ζωοδόχου Πηγής παρουσιάζει χαμηλές τιμές και σε κάποια σημεία ενδιάμεσες τιμές ή/και υψηλές. Οι νεογενείς λεκάνες του Καρλοβασίου – Μαραθοκάμπου και Ηραίου – Πυθαγορείου – Μυτιλινιών παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές του παράγοντα LS (<1) είναι αναμενόμενο.

Σε αντίθεση με το χάρτη των κλίσεων διαπιστώνουμε ότι μεγάλο μέρος της Σάμου παρουσιάζει χαμηλές η μεσαίες τιμές του παράγοντα LS, και οι περιοχές που εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές καταλαμβάνουν σημαντικά μικρότερη έκταση, σε σχέση με τις περιοχές πολύ υψηλής κλίσης. Συνολικά για το νησί όπως βλέπουμε και από το ιστόγραμμα (Σχήμα 5-3) περίπου το 12.5% της περιοχής μελέτης έχει τιμές <1, το 22.5% τιμές μεταξύ 1 και 3, το 53.4% τιμή μικρότερη από 5 και το 88.1% τιμή μικρότερη από 10, ενώ υπάρχουν κάποιες περιοχές που εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές, ξεπερνώντας το 100 σε κάποια σημεία (κρημονί).



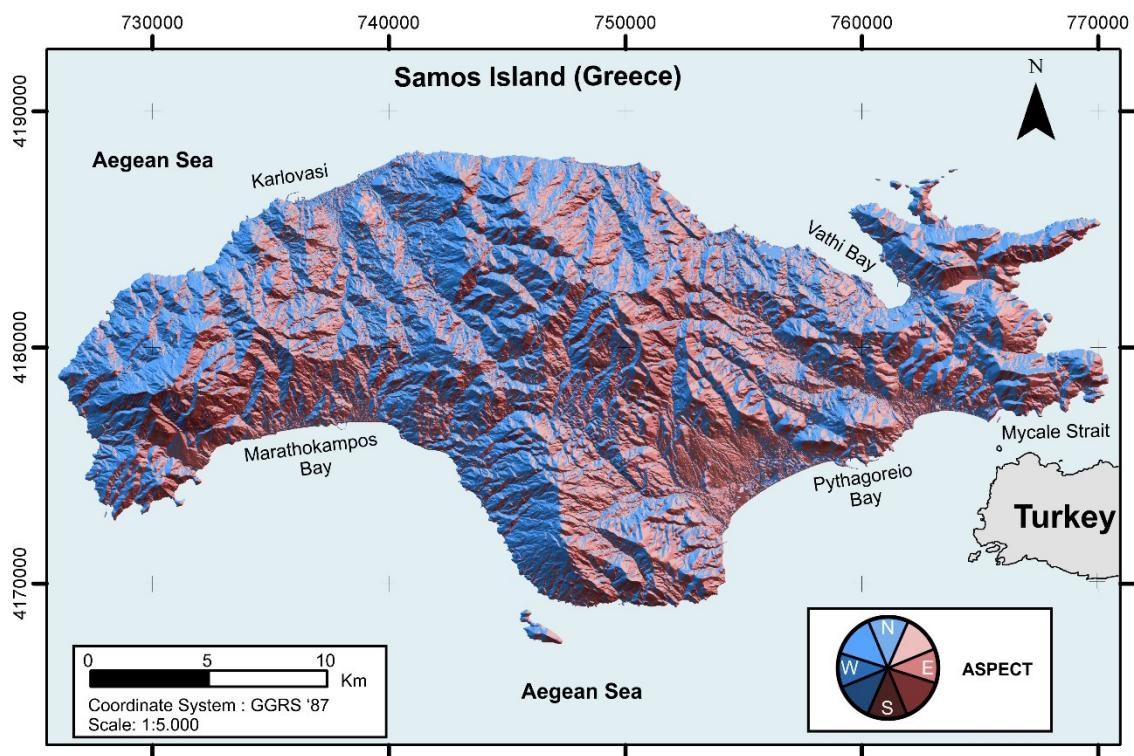
Σχήμα 5-2: Χάρτης του παράγοντα LS για το νησί της Σάμου, με μέγεθος κυψελίδας 5x5m.



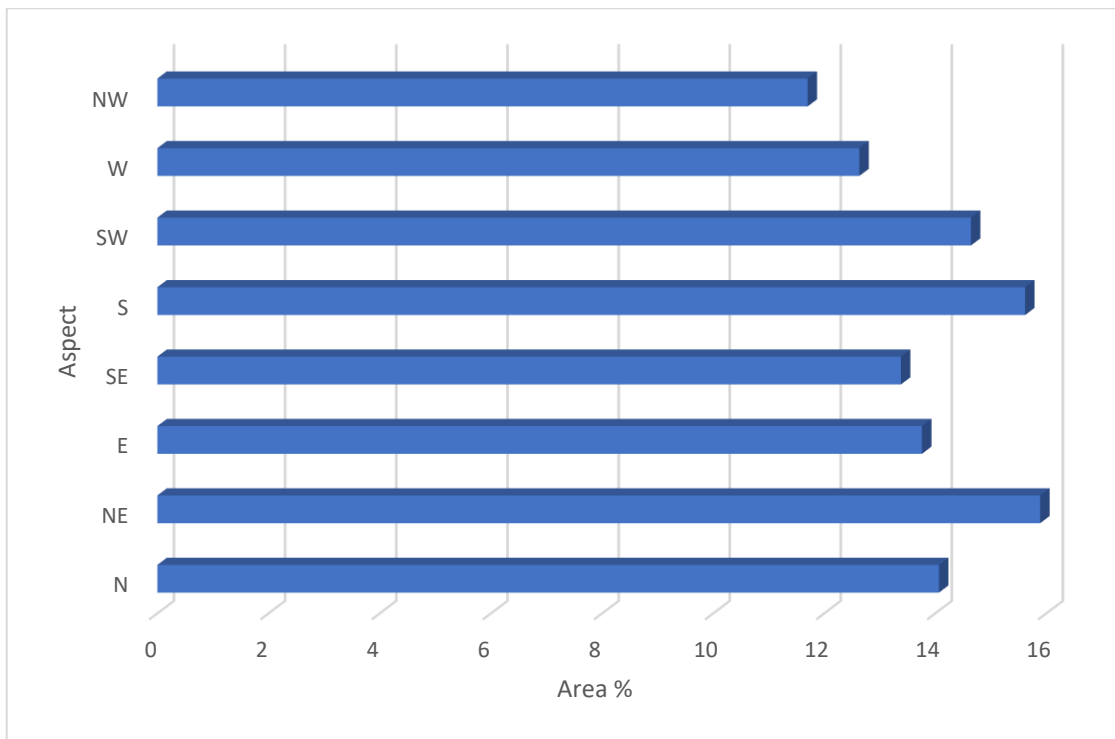
Σχήμα 5-3: Κατανομή των τιμών του παράγοντα LS για το νησί της Σάμου.

5.1.3 Προσανατολισμός κλίσεων

Ο προσανατολισμός κλίσεων υπολογίζεται μέσω Γ.Σ.Π. και ταξινομείται σε 8 διευθύνσεις, όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 4.2.1.3. Ο πιο συχνός προσανατολισμός είναι προς βορειοανατολικά με ποσοστό 15.9% και ακολουθούν με 15.6% οι επιφάνειες που βλέπουν προς νότο. Τα πρανή που κλίνουν προς βορειοδυτικά αντιπροσωπεύουν το 11.7%. Υπάρχει χωρική διαφοροποίηση του προσανατολισμού των κλίσεων, όπως είναι και αναμενόμενο εξαιτίας της μορφολογίας του νησιού. Στα δυτικά του Κερκετέα, της Αμπέλου και της νότιας προέκτασης της επικρατούν γενικά οι βόρειο-βορειοδυτικές κλίσεις. Στα ανατολικά της Αμπέλου και του Κερκετέα επικρατούν οι νότιες -νοτιοανατολικές. Στις πεδινές περιοχές επικρατεί ο βόρειος προσανατολισμός στο βόρειο τμήμα του νησιού και ο νότιος προσανατολισμός στο νότιο τμήμα (ειδικά στις λεκάνες του Κάμπου Μαραθοκάμπου και Πυθαγορείου – Ηραίου).



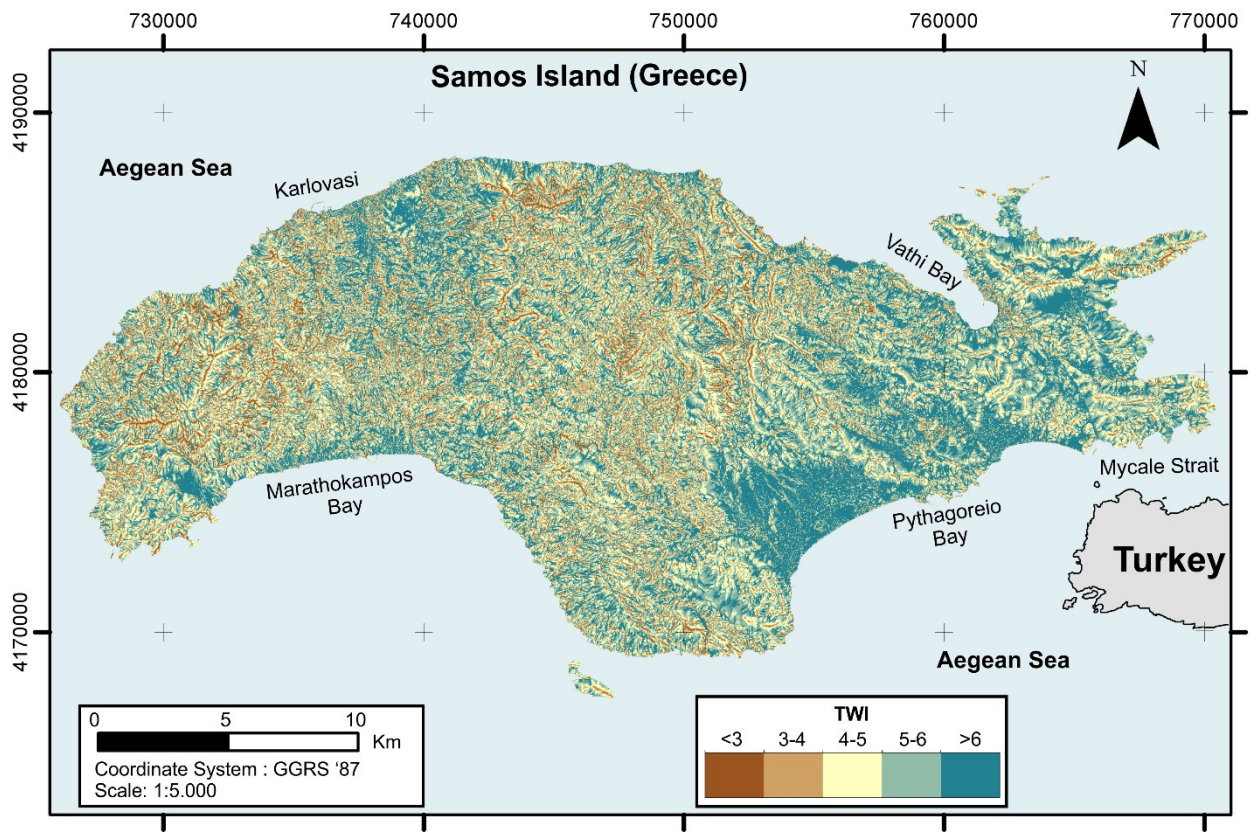
Σχήμα 5-4: Ο προσανατολισμός των κλίσεων για το νησί της Σάμου, ταξινομημένος σε 8 ομάδες. *t_quality*



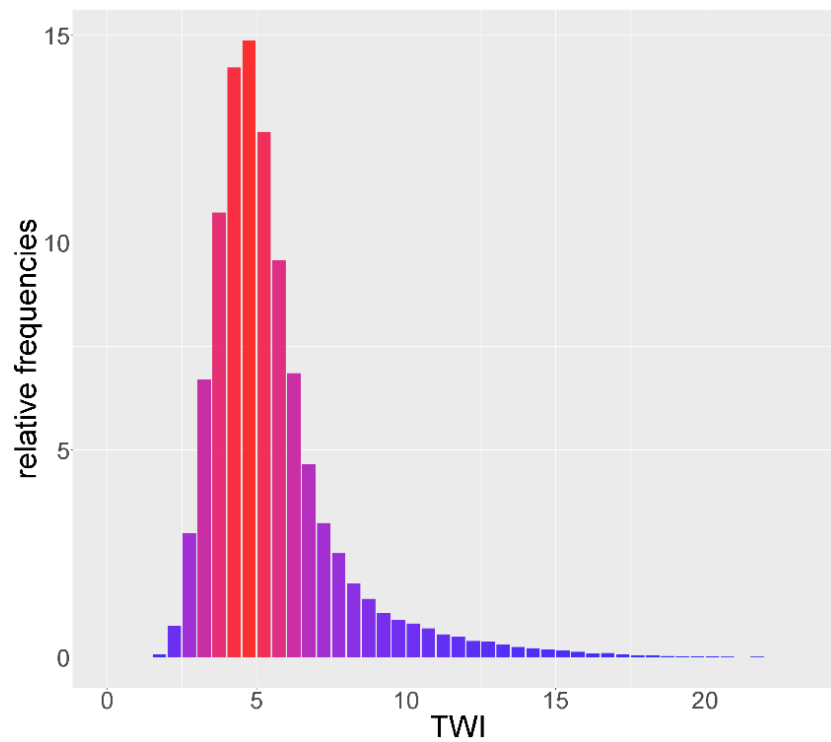
Σχήμα 5-5: Κατανομή του προσανατολισμού των κλίσεων για το νησί της Σάμου

5.1.4 Τοπογραφικός Δείκτης TWI (Topographic Wetness Index)

Ο δείκτης Topographic Wetness Index - TWI για την περιοχή της Σάμου υπολογίστηκε μέσω του SAGA GIS όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.2.1.3. Για την καλύτερη δυνατή οπτικοποίηση του αποτελέσματος επιλέχθηκε να ομαδοποιήσουμε τις τιμές σε 5 κλάσεις και μέσω Γ.Σ.Π. κατασκευάστηκε το Σχήμα 5-6. Οι πεδινές περιοχές όπως αναμένεται εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές που είναι μεγαλύτερες από 6 και φθάνουν έως και το 24 σε κάποια σημεία με σχεδόν μηδενική κλίση. Οι ορεινές περιοχές έχουν TWI μικρότερο από 5 και σε κάποια σημεία μικρότερο από 3. Γενικά όπως διακρίνουμε και από το ιστόγραμμα του σχήματος υπάρχει μια μεγάλη συγκέντρωση τιμών TWI γύρω από τη μέση τιμή. Το 68.7% της περιοχής μελέτης έχει τιμές TWI μεταξύ 3 και 6 (το 27.7% είναι ανάμεσα στο 4 και 5) ενώ το 26.9% της περιοχής έχει τιμές μεγαλύτερες από 6. Μόνο το 4.4% της περιοχής έχει TWI χαμηλότερο από 3, εκ του οποίου σχεδόν το σύνολο εμπεριέχεται στο εύρος τιμών 2-3.



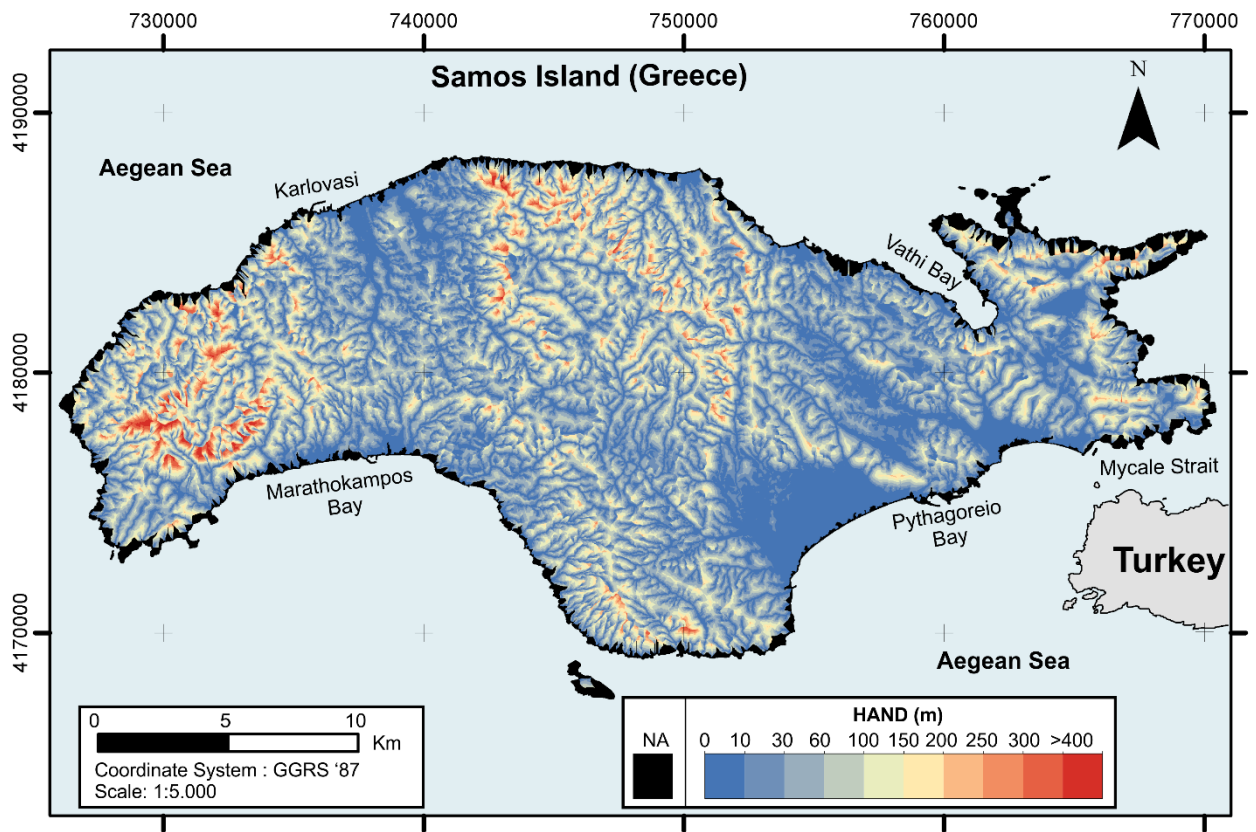
Σχήμα 5-6: Τοπογραφικός δείκτης TWI για την περιοχή μελέτης.



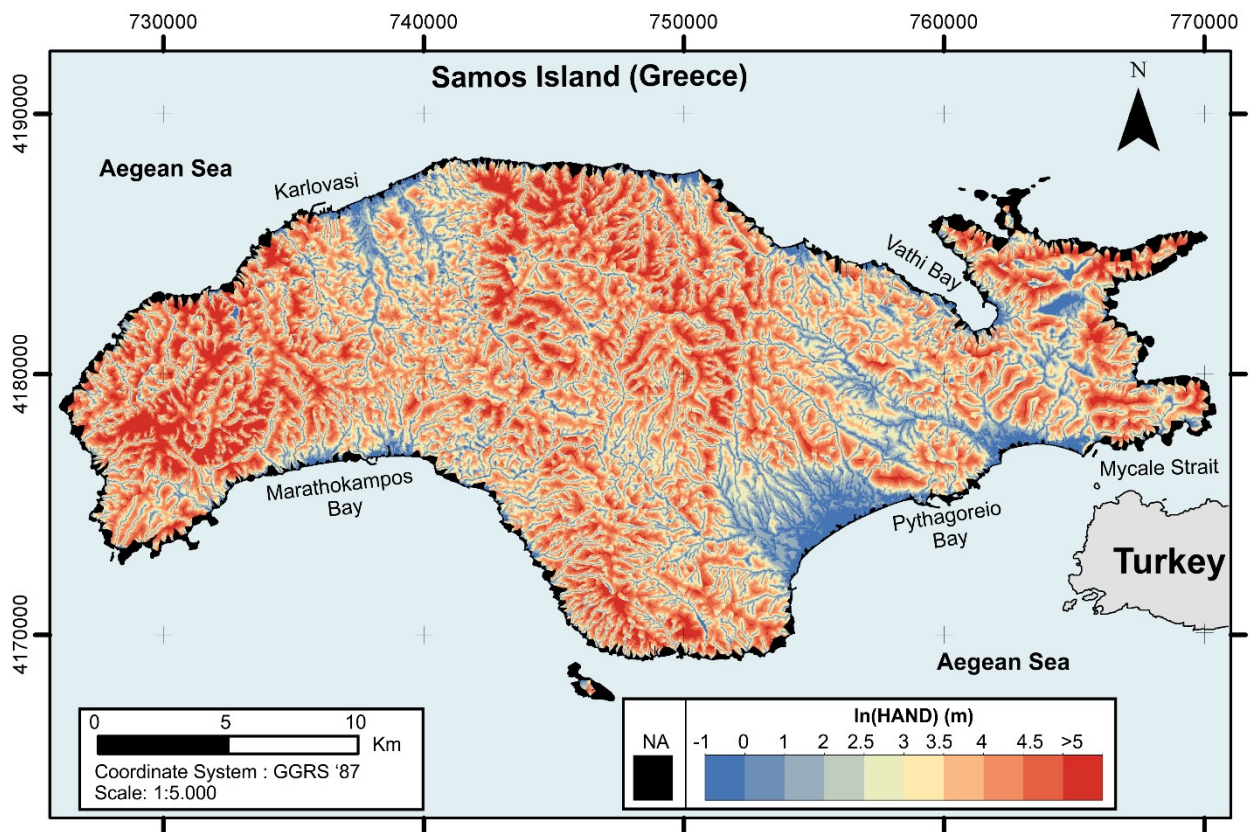
Σχήμα 5-7: Κατανομή των τιμών του δείκτη TWI για το νησί της Σάμου.

5.1.5 Τοπογραφικός δείκτης HAND (Height Above the Nearest Drainage) & InHAND

Ο δείκτης Height Above the Nearest Drainage – HAND για την περιοχή της Σάμου υπολογίστηκε μέσω Python (arcpy) και έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.2.1.4. Οι πεδινές περιοχές εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές (<10 m) ενώ σε κάποια ορεινά σημεία ιδιαίτερα στα δυτικά του νησιού ο δείκτης ξεπερνάει ακόμα και τα 400 μέτρα. Από το σχήμα διαπιστώνουμε ότι οι πεδινές περιοχές έχουν πολύ χαμηλές τιμές HAND (<10 μέτρα) καθώς σε αυτές το ανάγλυφο είναι αρκετά ομαλό. Στις ορεινές περιοχές ο δείκτης HAND παρουσιάζει διαφορετικά εύρη τιμών με τις μεσαίες τιμές (100-200 μέτρα) να επικρατούν αλλά και την εμφάνιση τόσο χαμηλών τιμών (30-100 μέτρα) όσο και πολύ υψηλών τιμών (>300 μέτρα) σε κάποια σημεία, κυρίως στο δυτικό μέρος του νησιού. Εξαιτίας του τρόπου υπολογισμού του HAND κοντά στην ακτογραμμή υπάρχουν σημεία για τα οποία δεν υπολογίζεται ο δείκτης καθώς είτε δε προλαβαίνει να σχηματιστεί ροή εντός κοίτης είτε αν σχηματίζεται αυτή δεν αναγνωρίζεται από την τιμή κατωφλίου που χρησιμοποιούμε (στην περίπτωση μας επιλέξαμε 2000 m²). Όπως βλέπουμε και στο ιστόγραμμα του Σχήματος 5-10 το 65.9% των τιμών HAND για ολόκληρο το νησί είναι μικρότερο από 60 μέτρα (32.4% αφορά τιμές μικρότερες από 20 μέτρα) ενώ σχεδόν στο σύνολο τους οι τιμές που λαμβάνει ο δείκτης στη συγκεκριμένη περιοχή είναι μικρότερες από 200 μέτρα (αθροιστική συχνότητα 96.8%).

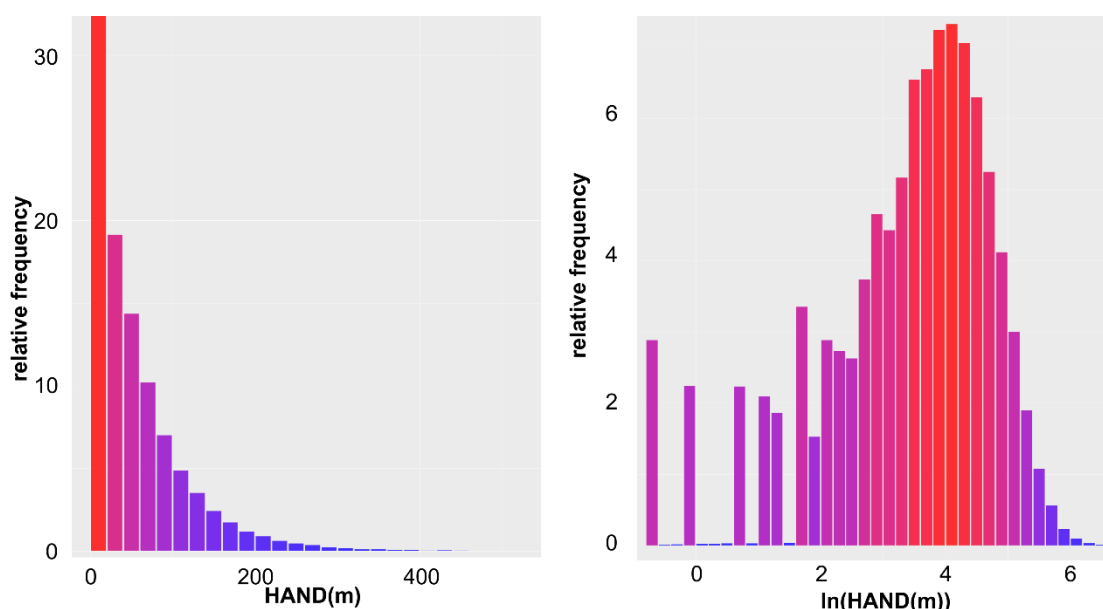


Σχήμα 5-8: Τοπογραφικός δείκτης HAND για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5-9: Τοπογραφικός δείκτης $\ln(HAND)$ για την περιοχή μελέτης.

Ο φυσικός λογάριθμος του HAND χρησιμοποιείται έτσι ώστε ο δείκτης να γίνει συγκρίσιμος με τον TWI. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μεγάλη συγκέντρωση τιμών κοντά στο 4, με το σύνολο σχεδόν των τιμών να βρίσκονται μεταξύ 2 και 5. Ο δείκτης είναι ενδεικτικός της αναμενόμενης εδαφικής υγρασίας, και της παρουσίας υπόγειου νερού σε περιοχές με χαμηλές τιμές. Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 5-9 περιοχές με αυξημένη εδαφική υγρασία αναμένονται στα πεδινά, καθώς και κοντά στο υδρογραφικό δίκτυο κάτι που έρχεται σε συμφωνία και με τις παρατηρήσεις πεδίου αλλά και τα πρωτογενή δεδομένα της υδρολογικής ομάδας εδάφους (υποενότητα 4.1.8).



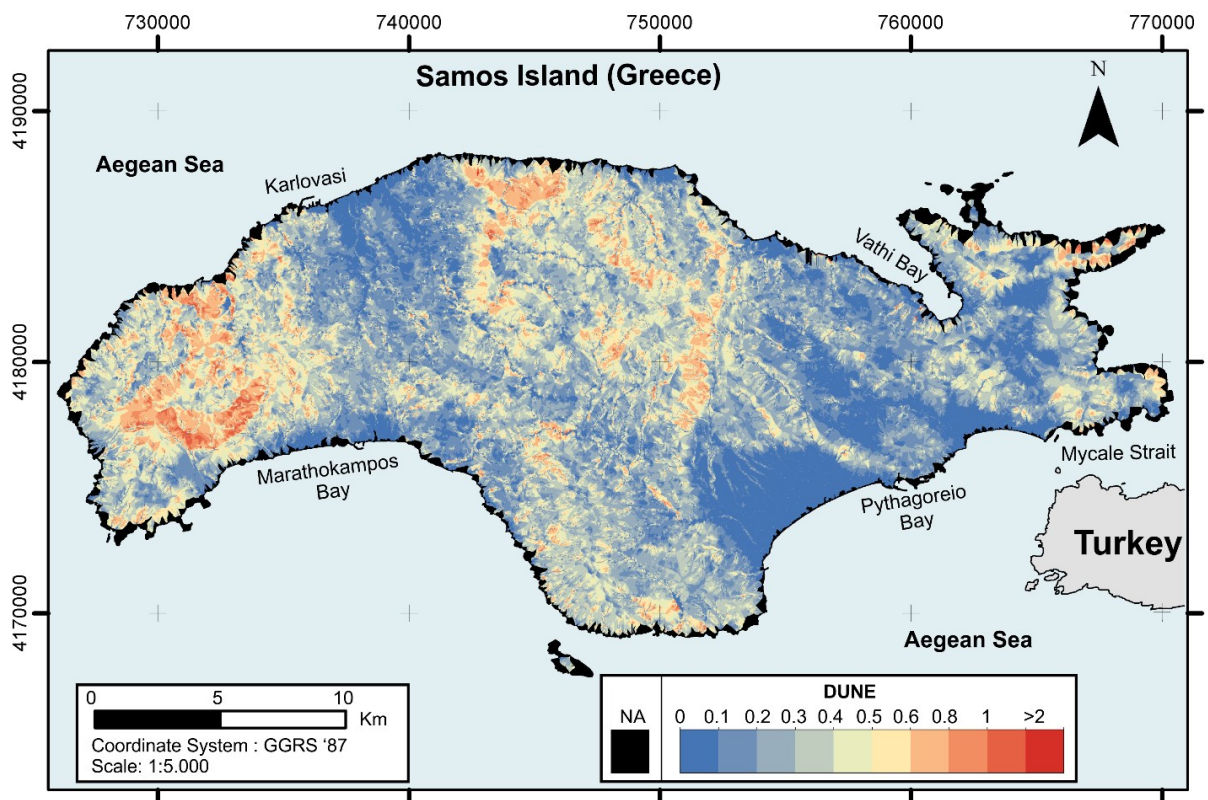
Σχήμα 5-10: Κατανομή των τιμών του δείκτη HAND και του φυσικού λογάριθμου του.

5.1.6 Τοπογραφικός δείκτης DUNE (Dissipation per Unit length) & rDUNE

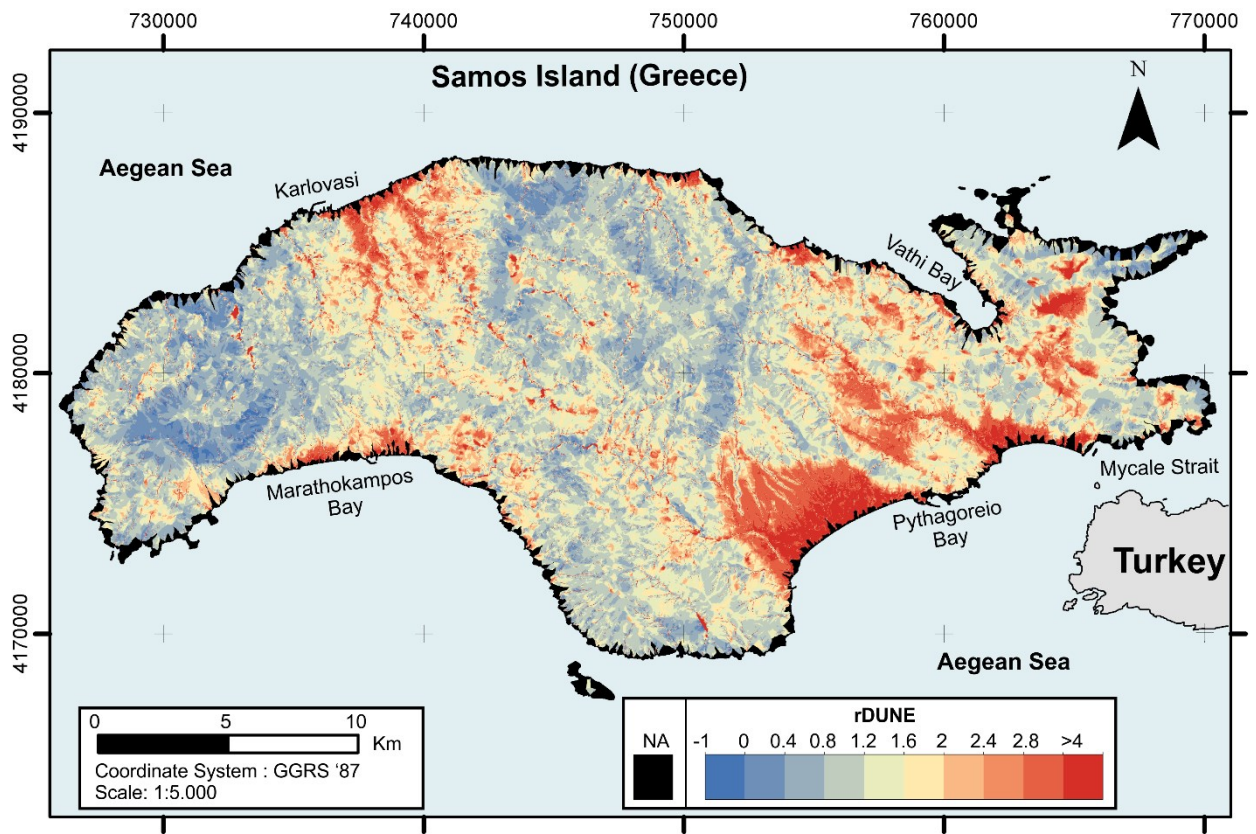
Ο δείκτης DUNE, είναι ένας δείκτης τελευταίας γενιάς και για τον υπολογισμό του κατασκευάστηκε πρόγραμμα στην Python (arcpy) και υπολογίζεται όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.2.1.4. Οι πεδινές περιοχές εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές (~0) ενώ τιμές μεγαλύτερες από 1 εμφανίζουν μόνο ορεινά σημεία ιδιαίτερα στα δυτικά του νησιού όπου εμφανίζονται και κάποιες ακραίες τιμές (>700) σε κάποιους κρημνούς. Η μέση τιμή του δείκτη είναι 0.3, ενώ το ~54.5% των τιμών είναι μικρότερες από 0.3 και το 86% μικρότερες από 0.5.

Ο αρνητικός φυσικός λογάριθμος του δείκτη (rDUNE) κατανέμει τις τιμές του καλύτερα και σε μεγαλύτερο εύρος κάνοντας τον ευκολότερο στη χρήση και άμεσα συγκρίσιμο με τον

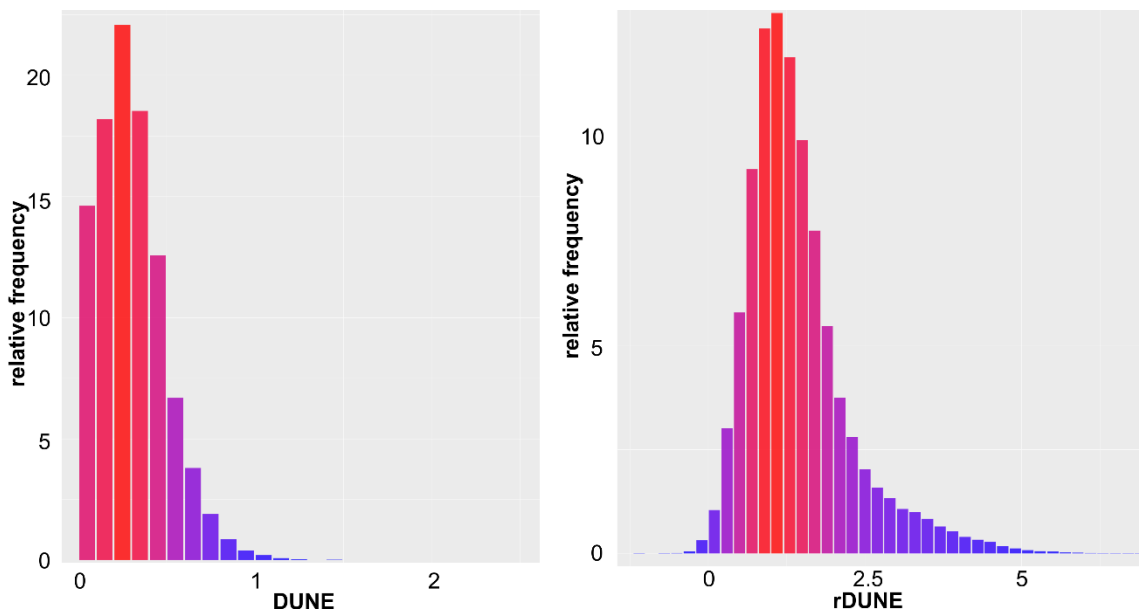
TWI. Η μέση τιμή του rDUNE είναι 1.58. Το 31% των τιμών είναι μικρότερες από 1, εκ των οποίων το 24.9% βρίσκεται μεταξύ 0.5 και 1. Το 29.6% των τιμών του δείκτη είναι μεταξύ 1 και 1.5 ενώ το 18.5% μεταξύ 1.5 και 2. Περίπου το 18% των τιμών είναι μεγαλύτερες από 2 εκ των οποίων η πλειοψηφία βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ 2 και 3, ενώ ένα μικρό ποσοστό (0.3%) παρουσιάζει αρνητικές τιμές. Υψηλές τιμές του δείκτη rDUNE είναι ενδεικτικές χαμηλότερων απωλειών ενέργειας κατά την επιφανειακή ροή του νερού, εξαιτίας των ιδιοτήτων του εδάφους ή της μορφής του υδρογραφικού δικτύου. Στο σχήμα 5-12 παρατηρούμε ότι οι υψηλές τιμές σχετίζονται με περιοχές όπου αναμένουμε να έχουμε αυξημένη προυπάρχουσα υγρασία και χαμηλές κλίσεις, ενώ χαμηλές τιμές στα ορεινά.



Σχήμα 5-11: Τοπογραφικός δείκτης DUNE για την περιοχή μελέτης



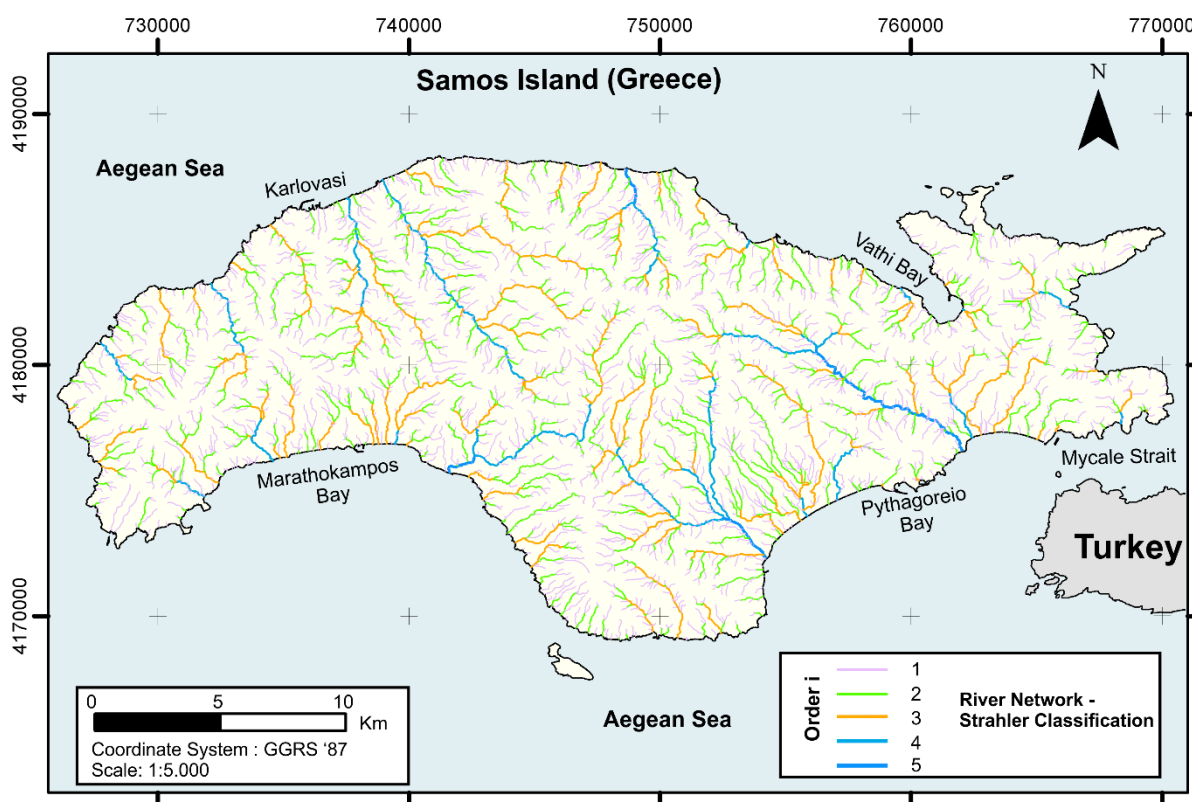
Σχήμα 5-12: Τοπογραφικός δείκτης *rDUNE* για την περιοχή μελέτης



Σχήμα 5-13: Κατανομή των τιμών του δείκτη *DUNE* και του αρνητικού φυσικού λογάριθμου του (*rDUNE*).

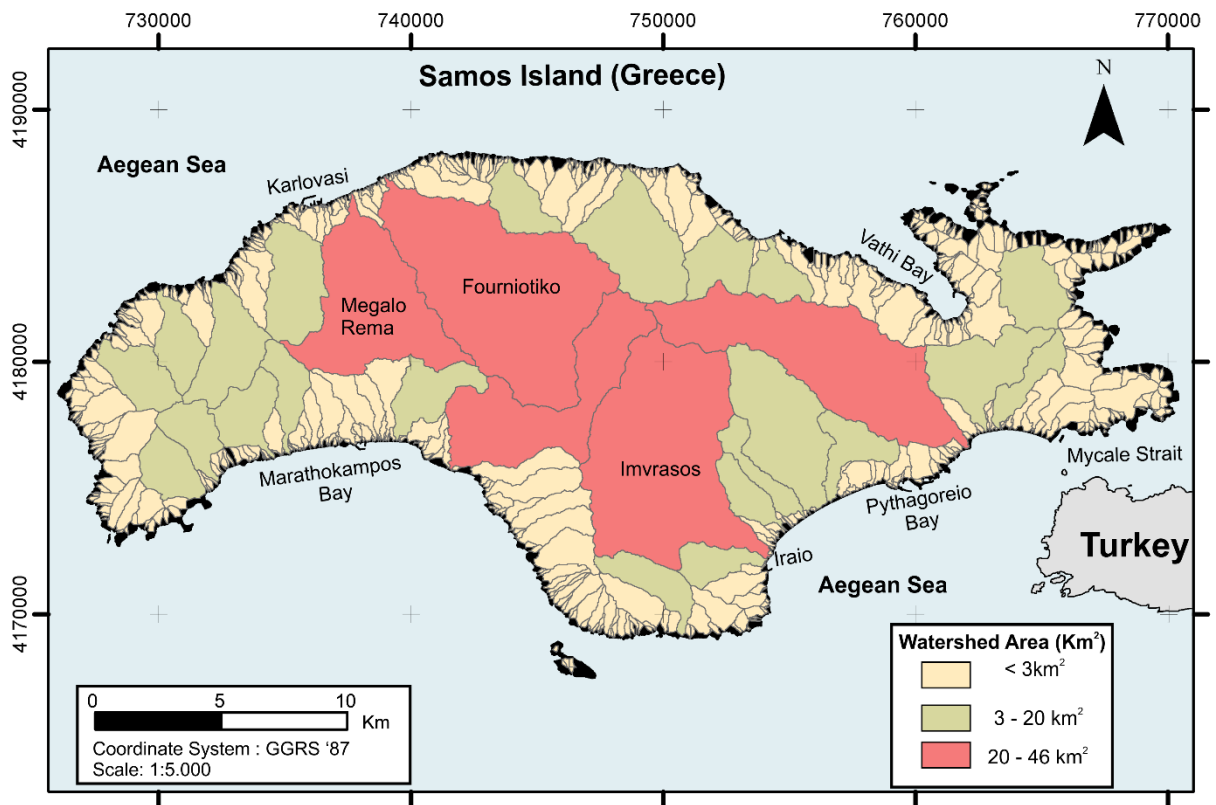
5.2 Υδρολογικές λεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο

Σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, παράγοντας με αυτοματοποιημένο τρόπο το υδρογραφικό δίκτυο (Σχήμα 5-14) αλλά και τις υδρολογικές λεκάνες του νησιού (Σχήμα 5-15). Το υδρογραφικό δίκτυο ταξινομείται κατά Strahler, ενώ οι υδρολογικές λεκάνες με βάση το μέγεθος τους.



Σχήμα 5-14: Υδρογραφικό δίκτυο της Σάμου κατά Strahler

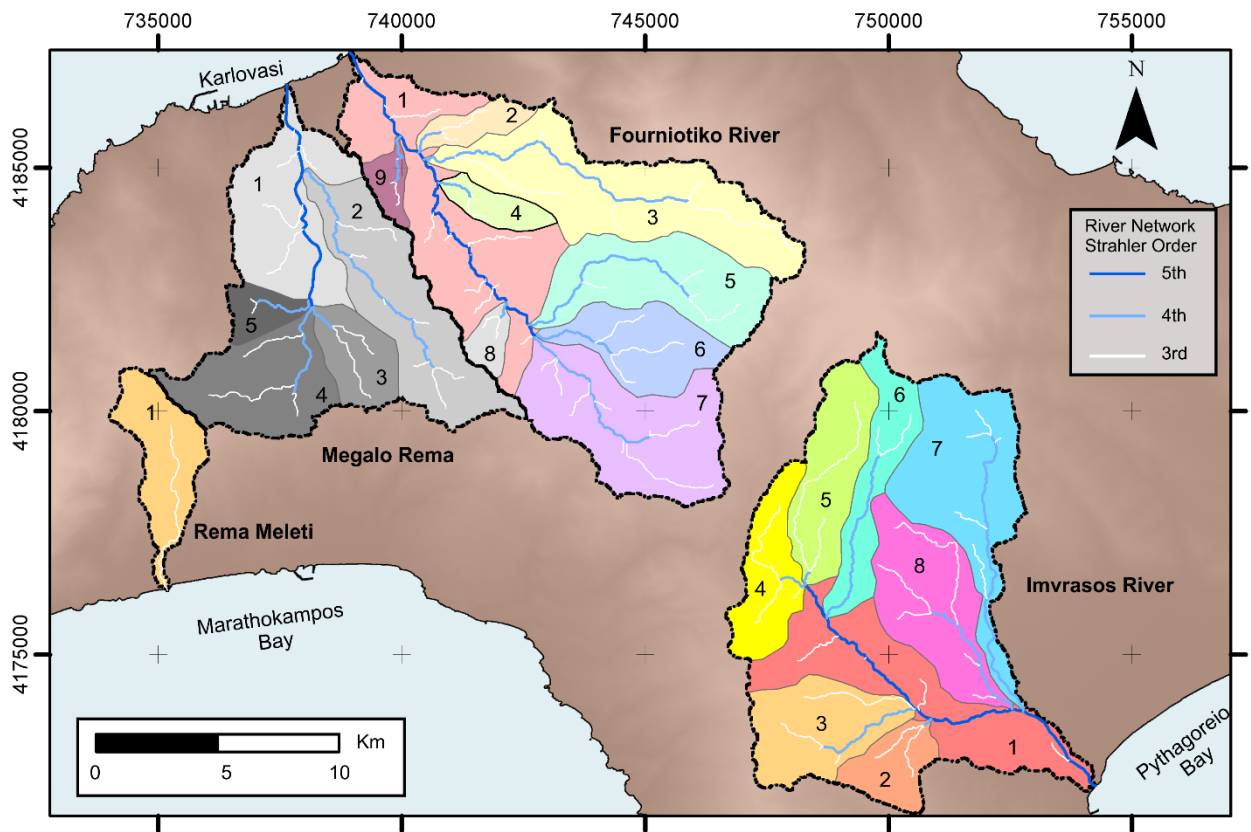
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν 5 μεγάλες υδρολογικές λεκάνες, εκ των οποίων οι τρεις (Μεγάλο Ρέμα, Φουρνιώτικος, Ίμβρασος) εκβάλουν κοντά σε κατοικημένες περιοχές και έχουν πλούσιο ιστορικό πλημμυρικών φαινομένων. Στο κεντρικό τμήμα του νησιού παρατηρούμε ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι καλά ανεπτυγμένο εξαιτίας της λιθολογίας και των μικρών κλίσεων στις νεογενείς λεκάνες, ενώ στα δύο άκρα του νησιού (δυτικά στον Κερκετέα και ανατολικά στη Ζωοδόχο πηγή) εμφανίζονται κλάδοι μικρής τάξης, και μικρές υδρολογικές λεκάνες, κυρίως εξαιτίας των καρστικοποιημένων ασβεστολίθων που επικρατούν σε αυτές.



Σχήμα 5-15: Υδρολογικές λεκάνες της Σάμου, κατηγοριοποιημένες ανάλογα με το μέγεθος τους.

5.2.1. Μορφομετρική ανάλυση υδρολογικών λεκανών

Με βάση τα ιστορικά στοιχεία και το ιστορικό πλημμυρών για την περιοχή μελέτης, αλλά και πληροφορίες από κατοίκους της περιοχής, αναγνωρίστηκαν οι τέσσερις λεκάνες με τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα. Πρόκειται για τις τρεις μεγαλύτερες λεκάνες του νησιού: (α) Φουρνιώτικο και Μεγάλο Ρέμα στα Βόρεια, (β) Ίμβρασο στα Νότια καθώς και (γ) μια μικρότερη λεκάνη στα νοτιοδυτικά (ρέμα Μελέτη). Για τις υδρολογικές αυτές λεκάνες κατασκευάζονται οι υπό-λεκάνες έως και τρίτης τάξης κατά Strahler, λαμβάνοντας υπόψη και το μέγεθος τους αλλά και τα υπόλοιπα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά ώστε να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Χρησιμοποιούμε το DEM 5x5m, και τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.2. για την κατασκευή τους, και έπειτα μέσω Γ.Σ.Π. υπολογίζονται οι μορφομετρικές παράμετροι για καθεμία από αυτές όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.3. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του ακολουθούν.



Σχήμα 5-16: Οι υδρολογικές λεκάνες με τη μεγαλύτερη συχνότητα πλημμυρικών φαινομένων και οι υπολεκάνες τους.

5.2.1.1 Φουρνιώτικος Ποταμός

Ο Φουρνιώτικος Ποταμός έχει τη μεγαλύτερη λεκάνη απορροής στο νησί της Σάμου με εμβαδό περίπου 46 km². Χωρίζεται σε 9 υπολεκάνες 3^{ης} ή μεγαλύτερης τάξης (Σχήμα 5-16). Η μικρότερη υπολεκάνη είναι η Νο 8 με εμβαδό περίπου 0.9 Km² ενώ η μεγαλύτερη η Νο 1 με εμβαδό 10.5 km². Παρατηρούμε ότι οι βόρειοανατολικές λεκάνες είναι πιο επιμήκης, με χαμηλές τιμές υδρογραφικής συχνότητας, πυκνότητας και υψής, ενώ εμφανίζουν μεγάλα μήκη επιφανειακής ροής και αυξημένους χρόνους συρροής, και έτσι αναμένουμε να έχουμε μικρότερο πλημμυρικό κίνδυνο σε αυτές. Οι μικρές λεκάνες αλλά και η λεκάνη Νο 6 δεν είναι τόσο επιμήκης, εμφανίζοντας μικρότερους χρόνους συρροής και μεγαλύτερες κλίσεις και αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο.

Πίνακας 5-3: Μορφομετρικές παράμετροι της λεκάνης και των υπολεκανών του Φουρνιώτικου ποταμού.

(Sub)- Basin	R_b avg	F_s	D_d	T	L_g	MCS MCL	R_{hl}	R_n	R_e	R_c	R_f	t_c (min)	
1	4.97	5.24	2.73	14.29	0.18	0.03	9.30	0.09	2.16	0.44	0.13	0.15	62.43
2	2.77	5.73	3.49	19.97	0.14	0.11	2.50	0.23	1.98	0.53	0.42	0.22	29.50
3	5.22	3.36	2.32	7.79	0.22	0.13	9.70	0.14	2.57	0.45	0.26	0.16	56.34
4	2.97	5.67	2.20	12.46	0.23	0.07	2.90	0.29	1.66	0.52	0.54	0.21	38.20
5	4.28	3.62	1.98	7.18	0.25	0.10	6.60	0.20	2.17	0.54	0.46	0.23	52.59
6	3.18	2.98	2.16	6.43	0.23	0.15	4.50	0.24	2.14	0.58	0.54	0.26	42.48
7	5.25	4.64	2.29	10.60	0.22	0.09	6.40	0.17	2.05	0.65	0.37	0.33	48.45
8	2.77	8.79	3.06	26.86	0.16	0.15	1.80	0.37	1.68	0.72	0.58	0.40	26.92
9	2.83	10.22	3.89	39.78	0.13	0.08	2.20	0.10	0.78	0.53	0.40	0.22	31.86
Basin	5.24	4.39	5.00	21.96	0.21	0.05	13.8	0.08	5.53	0.59	0.28	0.27	142.8

5.2.2.2 Μεγάλο Ρέμα

Το Μεγάλο Ρέμα είναι μια από τις μεγαλύτερες λεκάνες του νησιού με εμβαδό περίπου 25 km². Χωρίζεται σε 5 υπολεκάνες 3^{ης} ή μεγαλύτερης τάξης (Σχήμα 5-16). Η μικρότερη υπολεκάνη είναι η Νο 3 με εμβαδό περίπου 1.3 Km² ενώ η μεγαλύτερη η Νο 2 με εμβαδό 8.2 km². Όλες οι λεκάνες έχουν συγκρίσιμες τιμές υδρογραφικής συχνότητας, πυκνότητας και υψής, με εξαίρεση τη λεκάνη Νο 4 η οποία εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερες τιμές και αναμένεται να έχει χαμηλό πλημμυρικό κίνδυνο. Όσον αφορά το σχήμα η λεκάνη 3 είναι πιο κυκλική από τις άλλες με την λεκάνη Νο5 να ακολουθεί. Και οι δύο αυτές λεκάνες εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερους χρόνους συρροής, ένδειξη ότι ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι αυξημένος.

Πίνακας 5-4: Μορφομετρικές παράμετροι της λεκάνης και των υπολεκανών του Μεγάλου Ρέματος.

(Sub)- Basin	R_b avg	F_s	D_d	T	Lg	MCS	MCL	R_{hl}	R_n	R_e	R_c	R_f	t_c (min)
1	5.07	4.77	3.01	14.38	0.17	0.02	5.40	0.05	0.83	0.55	0.27	0.24	51.29
2	5.50	5.27	2.98	15.72	0.17	0.06	8.40	0.09	1.92	0.46	0.24	0.17	55.45
3	3.88	6.68	2.93	19.60	0.17	0.09	3.10	0.18	1.30	0.74	0.65	0.43	35.55
4	3.60	3.51	2.29	8.02	0.22	0.10	5.10	0.19	1.97	0.60	0.37	0.28	41.66
5	3.22	6.80	2.86	19.46	0.17	0.10	2.40	0.20	1.14	0.65	0.50	0.33	28.69
Basin	4.59	4.88	5.98	29.16	0.18	0.05	10.6	0.09	5.15	0.60	0.22	0.29	112.1

5.2.2.3 Ίμβρασος Ποταμός

Ο Ίμβρασος ποταμός έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη λεκάνη απορροής στη Σάμο με εμβαδό ~44 km². Χωρίζεται σε 8 υπολεκάνες 3^{ης} ή μεγαλύτερης τάξης (Σχήμα 5-16). Η μικρότερη υπολεκάνη είναι η Νο 2 με εμβαδό περίπου 2.4 Km² ενώ η μεγαλύτερη η Νο 1 με εμβαδό 8.8 km². Παρατηρούμε, όπως και στον Φουρνιώτικο ποταμό ότι οι βόρειοανατολικές λεκάνες είναι επιμήκης, με χαμηλές τιμές υδρογραφικής συχνότητας, πυκνότητας και υφής, ενώ εμφανίζουν μεγάλα μήκη επιφανειακής ροής και αυξημένους χρόνους συρροής, και έτσι αναμένουμε να έχουμε μικρότερο πλημμυρικό κίνδυνο σε αυτές. Οι λεκάνες 2, 3 και 8 είναι πιο κυκλικές, εμφανίζοντας μικρότερους χρόνους συρροής και αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο.

Πίνακας 5-5: Μορφομετρικές παράμετροι της λεκάνης και των υπολεκανών του Τιμβρασου ποταμού.

(Sub)- Basin	R_b avg	F_s	D_d	T	Lg	MCS	MCL	Rhl	R_n	R_e	R_c	R_f	t_c (min)
1	5.73	3.43	2.57	8.79	0.19	0.03	8.90	0.09	1.81	0.44	0.19	0.15	58.93
2	3.47	5.48	3.02	16.52	0.17	0.14	2.40	0.19	1.40	0.72	0.49	0.41	27.34
3	3.92	3.89	2.99	11.64	0.17	0.13	4.00	0.21	2.29	0.69	0.50	0.38	33.57
4	3.27	4.21	2.38	10.01	0.21	0.04	4.10	0.20	1.59	0.67	0.32	0.35	43.13
5	4.32	2.84	2.28	6.45	0.22	0.08	5.50	0.22	2.44	0.52	0.43	0.21	43.83
6	3.71	2.72	2.61	7.10	0.19	0.10	6.90	0.18	3.01	0.35	0.24	0.10	44.91
7	4.51	2.82	2.55	7.19	0.20	0.04	7.90	0.13	2.53	0.44	0.24	0.15	52.55
8	4.39	4.33	2.76	11.94	0.18	0.04	6.80	0.10	1.48	0.55	0.54	0.24	51.27
Basin	4.97	3.52	4.95	17.44	0.19	0.05	14.2	0.09	5.71	0.58	0.27	0.26	129.34

5.2.2.4 Ρέμα Μελέτη

Το ρέμα Μελέτη είναι μια μικρή -μεσαία λεκάνη με εμβαδό περίπου 4.1 km². Καθώς είναι τρίτης τάξης κατά Strahler, δε χωρίστηκε σε περισσότερες λεκάνες (περιλαμβάνει 8 υπολεκάνες δευτερας τάξης). Σε σχέση με τις υπολεκάνες των προηγούμενων ποταμών παρατηρούμε ότι παρουσιάζει αρκετά χαμηλή υδρογραφική συχνότητα αλλά σχετικά υψηλή υδρογραφική πυκνότητα και μεσαία υφή. Επίσης είναι πολύ επιμηκυσμένη και έχει αρκετά μεγάλο χρόνο συρροής σε σχέση και με το μέγεθος της αλλά και αρκετά μεγάλη κλίση. Με βάση τα παραπάνω αναμένουμε να έχει μεσαία πλημμυρική επικινδυνότητα. Παρόλαυτα η συγκεκριμένη λεκάνη έχει επανελλειμένως πλημμυρίσει κατά το παρελθόν, γεγονός που οφείλεται στις εκτεταμένες πυρκαγιές οι οποίες κατά το παρελθόν μείωσαν τη δασοκάλυψη στα ορεινά της συγκεκριμένης λεκάνης. Επιπλέον στις εκβολές της υπάρχουν σημαντικές παρεμβάσεις, με περιορισμό του πλάτους της κοίτης από κτίσματα ευνοώντας τα πλημμυρικά φαινόμενα.

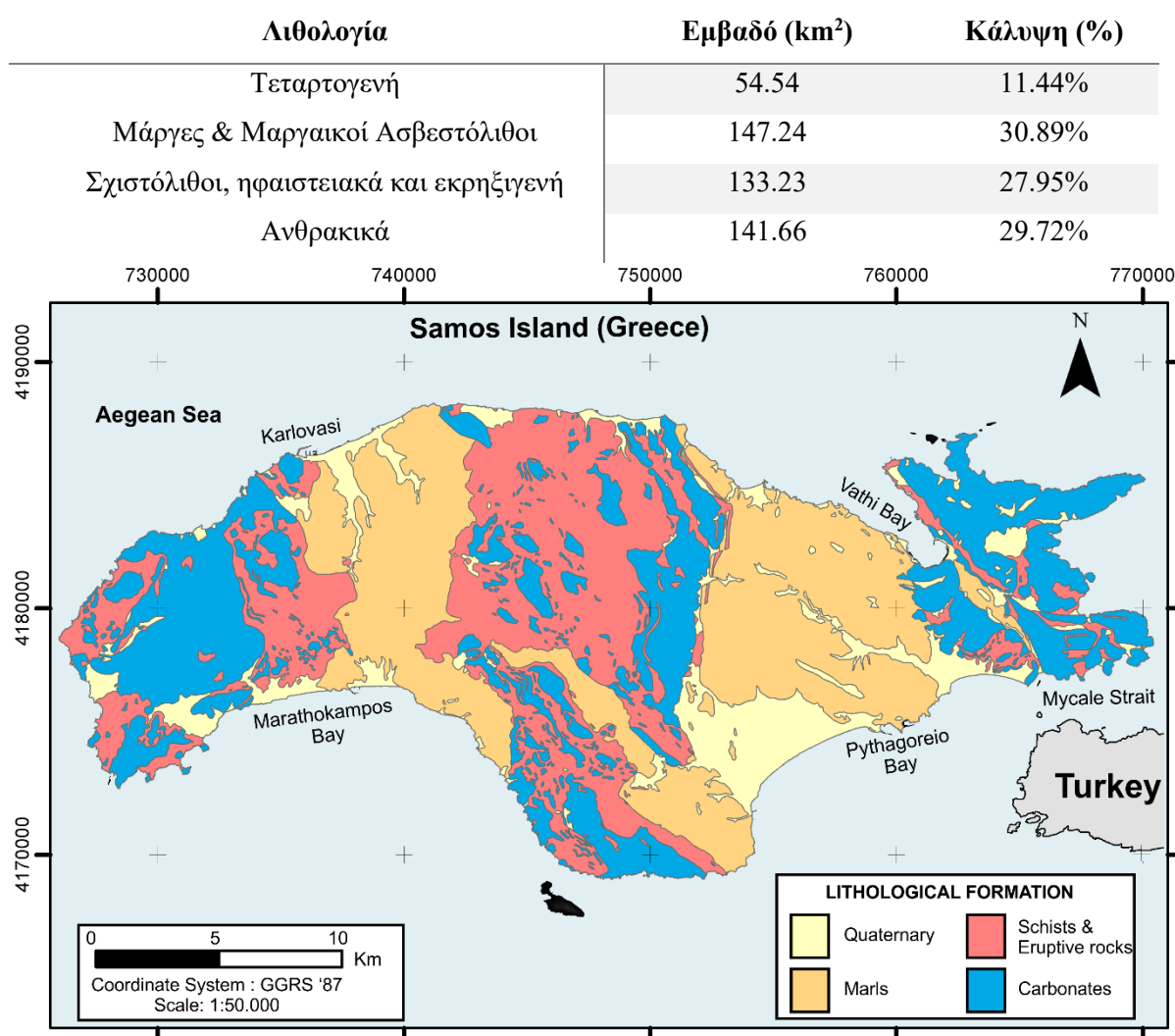
Πίνακας 5-6 Μορφομετρικές παράμετροι της λεκάνης του ρέματος Μελέτη.

(Sub)- Basin	R_b avg	F_s	D_d	T	Lg	MCS	MCL	Rhl	R_n	R_e	R_c	R_f	t_c (min)
Basin	6.83	2.42	4.06	9.83	0.23	0.14	5.7	0.17	3.62	0.45	0.23	0.16	58.92

5.3 Λιθολογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ομαδοποιούνται, όπως αναλύθηκε στη Μεθοδολογία, σε 4 λιθολογικούς σχηματισμούς. Τα Τεταρτογενή καταλαμβάνουν περίπου το 11% της περιοχής, και βρίσκονται κυρίως στις πεδινές περιοχές ή κοντά στο υδρογραφικό δίκτυο. Οι μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αποτελούν την πιο συχνά εμφανιζόμενη λιθολογία καταλαμβάνοντας περίπου το 31% της επιφάνειας του νησιού με εμφάνιση κυρίως στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του νησιού. Οι σχιστόλιθοι τα ηφαιστειακά και εκρηξιγενή πετρώματα εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση του νησιού (~28%), και καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του κεντρικού τμήματος της Σάμου. Εμφανίζονται στα ορεινά, και ιδίως στον ορεινό όγκο της Αμπέλου. Τέλος τα ανθρακικά (κυρίως μάρμαρα) εμφανίζονται σε μεγάλο τμήμα της Σάμου (~30% της έκτασης του νησιού), με κυρίαρχη εμφάνιση στα δυτικά στο όρος Κερκετέας και στα ανατολικά στο όρος Ζωοδόχος Πηγή (Πίνακας 5-2).

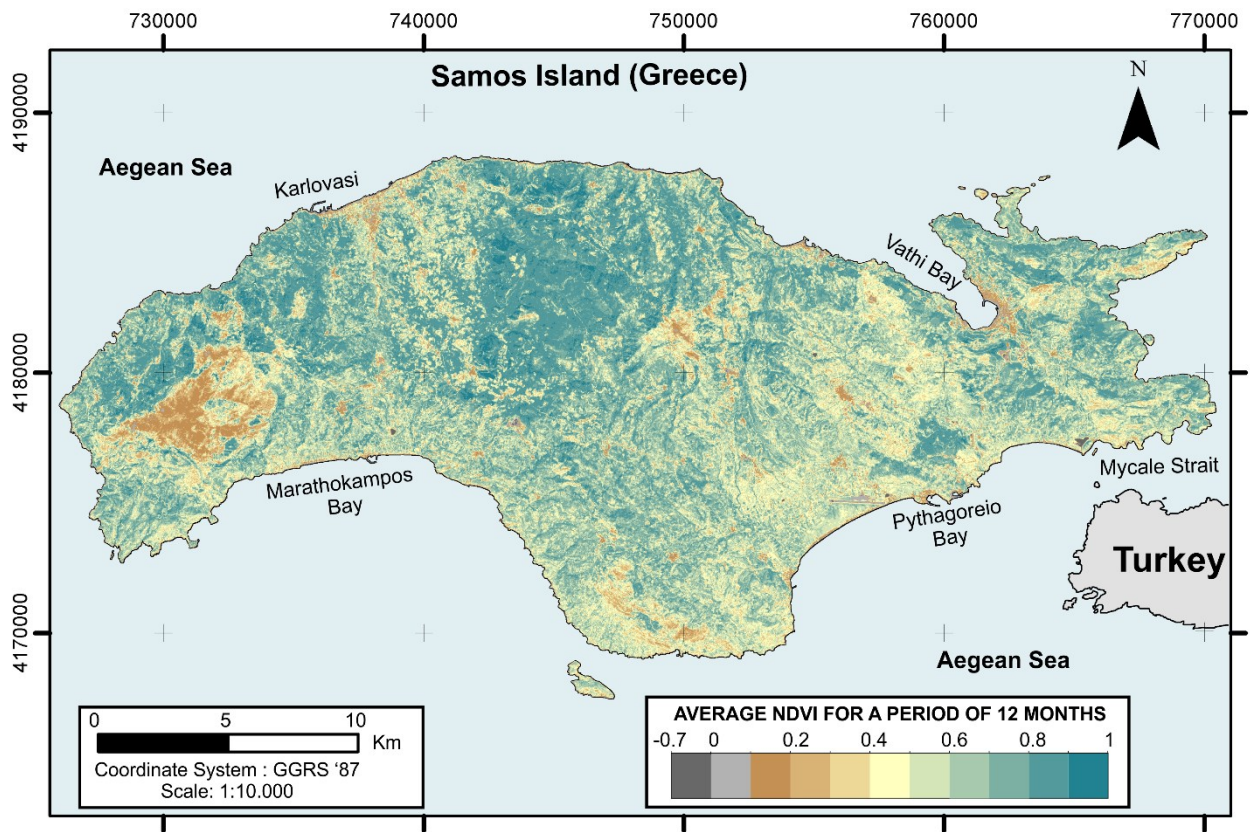
Πίνακας 5-7: Οι λιθολογικοί σχηματισμοί της νήσου Σάμου και η συχνότητα εμφάνισής τους στο νησί της Σάμου.



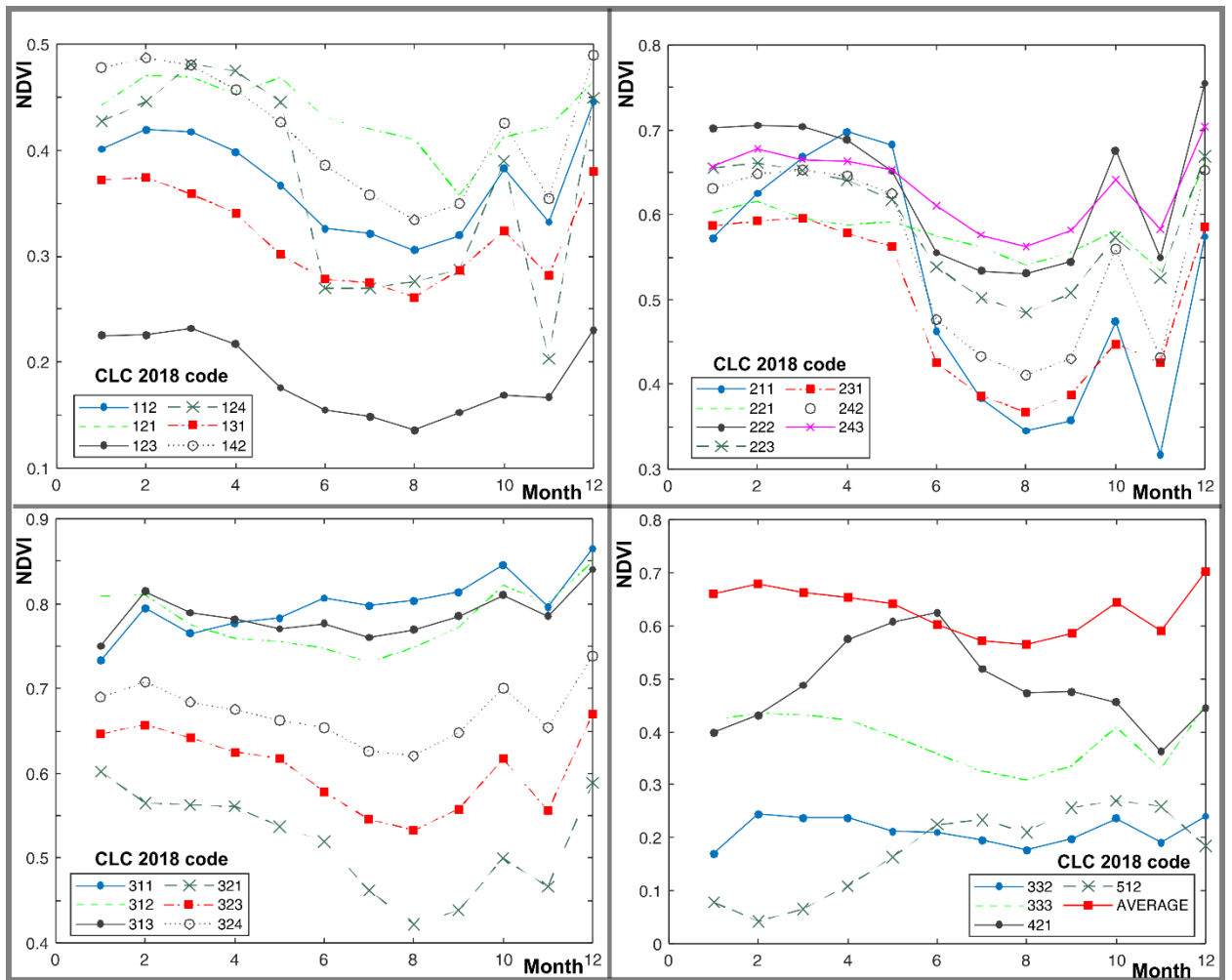
Σχήμα 5-17: Λιθολογικός χάρτης νήσου Σάμου.

5.4 Δείκτης NDVI

Ο μέσος δείκτης NDVI υπολογίστηκε για την περιοχή μελέτης, βάση της μεθοδολογίας και με τη χρήση δορυφορικών εικόνων του προγράμματος Sentinel. Οι δασικές εκτάσεις (κωδικοί Corine: 311-313) έχουν σταθερά υψηλές τιμές (γύρω από το 0.8) καθόλη τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να μεταβάλλονται πολύ. Οι αστικές, περιαστικές και βιομηχανικές ζώνες (κωδικοί 112,121,123,124,131,142) εμφανίζουν γενικά χαμηλές τιμές με σημαντική διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους. Οι διάφοροι τύποι αγροτικής δραστηριότητας (κωδικοί 211,221.222.223.231.242.243) εμφανίζουν υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, αλλά οι περισσότερες από αυτές εμφανίζουν μεγάλη μείωση του δείκτη κατά το καλοκαίρι και έως τον Σεπτέμβριο, με εξαίρεση τις εκτάσεις που ανήκουν στην ομάδα 243: “Καλλιέργειες μαζί με φυσική βλάστηση” οι οποίες εμφανίζουν τη μικρότερη διακύμανση. Τέλος οι περιοχές με θαμνώδη κάλυψη και οι λιβαδικές εκτάσεις (κωδικοί: 321, 323, 324, 332) εμφανίζουν μεσαίες-μικρές τιμές, οι οποίες έχουν μια μέση μεταβολή στο χρόνο, ενώ οι απογυμνωμένες περιοχές (κωδικός 332) αλλά και οι υδάτινες μάζες χερσαίων υδάτων εμφανίζουν πολύ χαμηλές τιμές, με τις τελευταίες μάλιστα να δείχνουν μια αύξηση κατά το καλοκαίρι εξαιτίας της αποξήρασης τους. Όσον αφορά τη μέση τιμή του δείκτη για όλη τη Σάμο αυτός παραμένει σχετικά σταθερός στο χρόνο με μια μέση τιμή 0.63.



Σχήμα 5-18: Μέση τιμή δείκτη NDVI για ένα διάστημα 12 μηνών στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5-19: Διακύμανση της μέσης τιμής του δείκτη NDVI, για κάθε ομάδα χρήσεων γης (σύμφωνα με το CORINE 2018) για την περίοδο Μάιος 2019-Απρίλιος 2020.

Η χωρική κατανομή του δείκτη είναι σε συμφωνία τόσο με τα δεδομένα του CORINE 2018 όσο και με τις παρατηρήσεις από εργασία υπαίθρου στην περιοχή μελέτης. Το όρος Άμπελος στην κεντρική Σάμο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές καθώς έχει την πιο πυκνή βλάστηση με μεγάλες δασικές εκτάσεις, όπως και η βορειοδυτική πλευρά του Κερκετέα στα ανατολικά. Αντίθετα οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται στη νοτιοανατολική πλευρά του Κερκετέα όπως αναμαίνεται καθώς η περιοχή εμφανίζει πολύ μεγάλες κλίσεις, ελάχιστη φυτοκάλυψη και σχεδόν μηδενική παρουσία εδάφους καθώς σε ολόκληρη την περιοχή εμφανίζεται το μητρικό πέτρωμα (ανθρακικά). Οι πεδινές εκτάσεις εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές ενώ οι αστικές περιοχές εμφανίζουν χαμηλές τιμές τόσο στην περιοχή της Σάμου (Βαθύ) όσο και του Καρλοβασίου. Ο χάρτης NDVI πλεονεκτεί όσον αφορά της χωρική ανάλυση (με μέγεθος κυψελίδας 10 μέτρα) αλλά και την χρονική κάλυψη (η τελευταία δορυφορική Sentinel-2 που ανακτήθηκε αφορά τον Μάιο του 2020) σε σχέση με τις χρήσεις γης του Corine. Το CLC πλεονεκτεί στο ότι παρέχει 23 κατηγορίες χρήσεων γης με σαφή διαχωρισμό μεταξύ τους.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων του σταθμού της Σάμου, η εφαρμογή της Παγκόσμιας Εξίσωσης εδαφικών απωλειών (RUSLE) και η υδρολογική ανάλυση τεσσάρων σημαντικών υδρολογικών λεκανών (και των υπολεκανών τους) της Σάμου μέσω της μεθόδου SCS-CN.

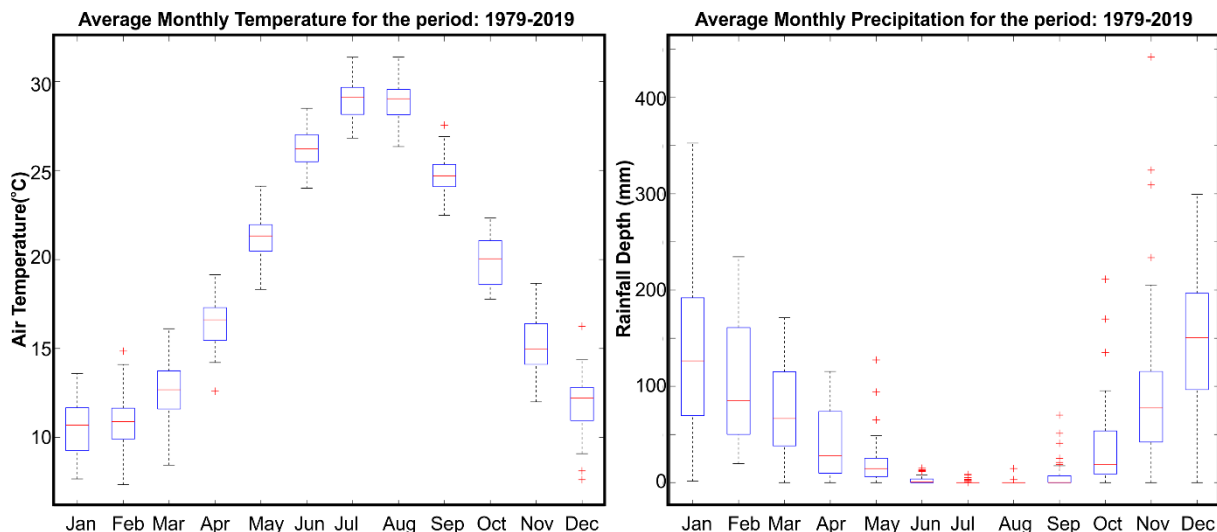
5.5 Ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων, με βάση την Μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Στο Κεφάλαιο 6.1 γίνεται ανάλυση των κλιματολογικών δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού της Σάμου επικεντρώνοντας την προσοχή μας στις τάσεις της βροχόπτωσης για τα τελευταία 40 χρόνια. Στα πλαίσια αυτά γίνεται στατιστική ανάλυση των δεδομένων και επιπλέον μελετάται η κατανομή των βροχερών ημερών στο χρόνο και χαρτογραφούνται οι συνεχόμενες ημέρες υγρασίας και ξηρασίας στη συγκεκριμένη περιοχή και η εξέλιξη τους στο χρόνο.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα της Σάμου καλύπτουν την περίοδο 1979-2019 και αναλύονται τόσο τα γενικά χαρακτηριστικά και η τάση της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, όσο και η συχνότητα εμφάνισης των έντονων βροχοπτώσεων αλλά και τα μοτίβα της κατανομής των βροχοπτώσεων στον χρόνο.

5.5.1 Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και ύψους βροχής

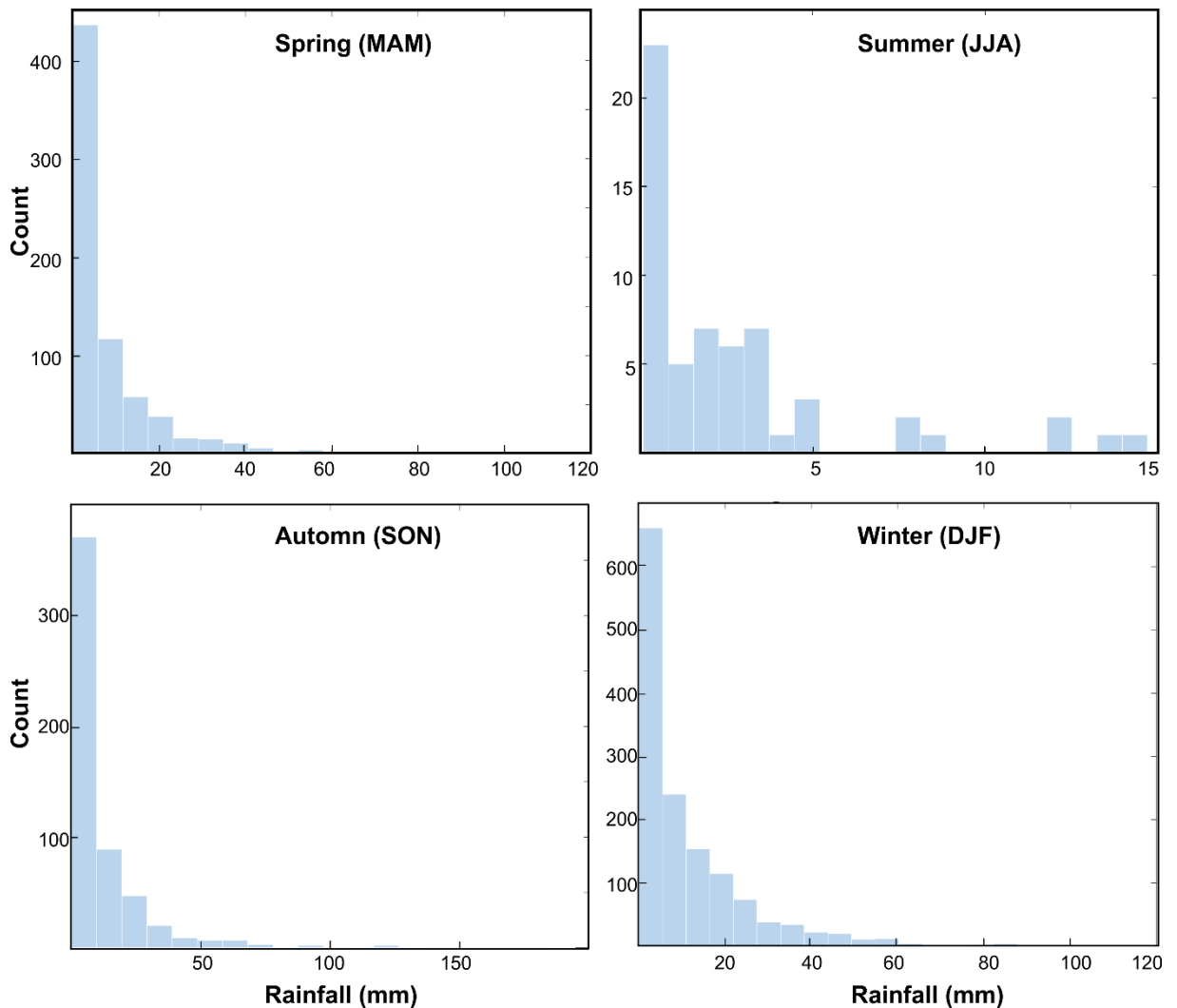
Οι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και ύψους βροχόπτωσης απεικονίζονται στο σχήμα 5-20. Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται τον Ιούλιο και των Αύγουστο (30°C και 29.9°C αντίστοιχα) και οι ελάχιστες τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο (10.6°C και 10.8°C αντίστοιχα). Η βροχόπτωση εμφανίζει πολύ υψηλές μέσες τιμές (>120 mm) κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, υψηλές τιμές (>50 mm) κατά τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο και Νοέμβριο και σχεδόν μηδενικές τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, συμπεριλαμβανομένου και του Σεπτεμβρίου. Μηνιαίες μέσες τιμές που πλησιάζουν ή και ξεπερνάνε τα 300 χιλιοστά δεν είναι ασυνήθιστες για τους δυο υγρότερους μήνες, ενώ ο Νοέμβριος είναι ο μήνας με την εμφάνιση πολύ μεγάλων ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης και συνεπακόλουθα μέσω των τιμών που για κάποιες χρονιές ξεπερνούν τα 400 χιλιοστά.



Σχήμα 5-20: Γραφήματα Box & Whisker για τη μέση μηνιαία θερμοκρασία και το μέσο μηνιαίο ύψος βροχής στην περιοχή της Σάμου

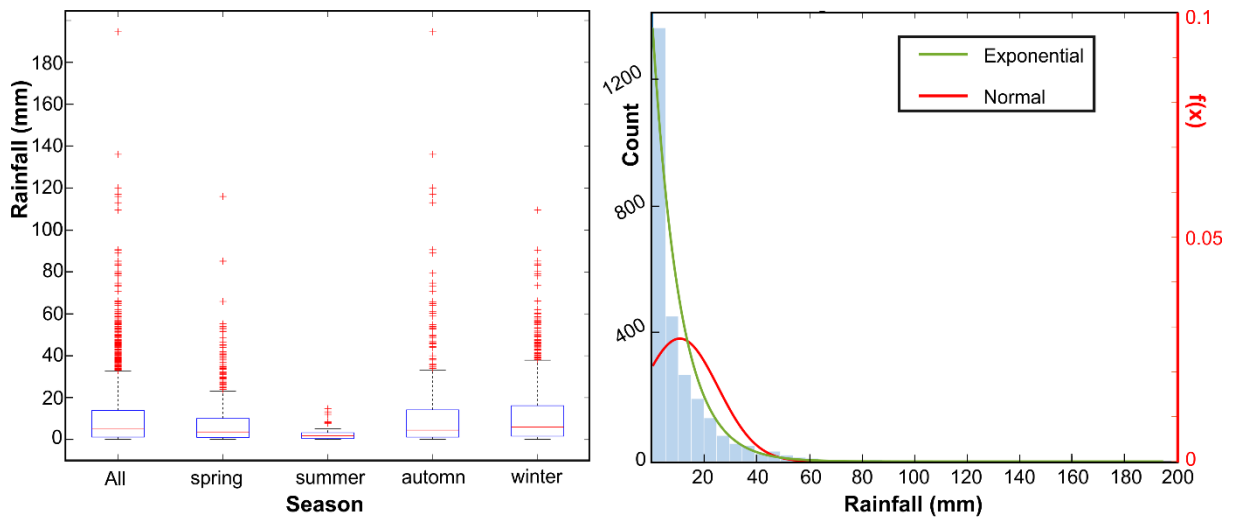
5.5.2 Ημερήσιες τιμές ύψους βροχής

Η κατανομή των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης, ομαδοποιημένες ανά εποχή απεικονίζονται στο σχήμα 5-21. Παρατηρούμε ότι κατά τον χειμώνα έχουμε σημαντικά αυξημένο αριθμό βροχερών ημερών, εκ των οποίων η πλειοψηφία αφορά γεγονότα μικρού ύψους βροχής (<10 mm), ενώ πιο έντονες βροχοπτώσεις εμφανίζονται ανά διαστήματα. Κατά το καλοκαίρι η βροχόπτωση είναι σπάνια και με μικρά ύψη βροχής (<10 mm) ενώ κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο έχουμε αρκετές βροχοπτώσεις κάποιες εκ των οποίων αφορούν σημαντικά γεγονότα, ειδικά κατά το φθινόπωρο (Σχήμα 6.2)



Σχήμα 5-21: Ημερήσιες τιμές βροχοπτώσεων, ομαδοποιημένες ανά εποχή για την περίοδο 1979 – 2019 στην περιοχή της Σάμου.

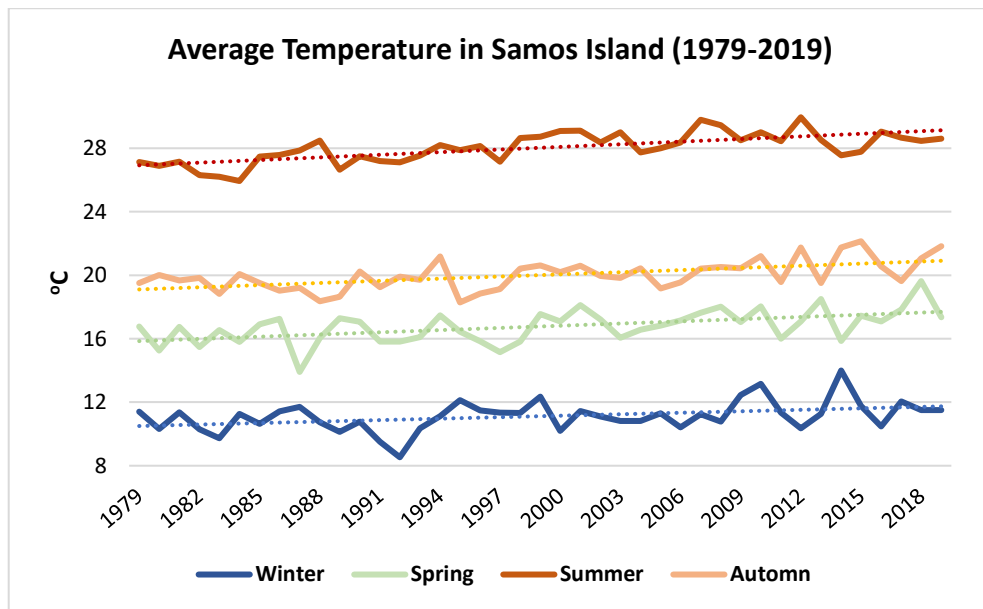
Η κατανομή των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης, για όλα τα διαθέσιμα δεδομένα (1979-2019) απεικονίζονται στο ιστόγραμμα του Σχήματος 5-22, ενώ η κατανομή των βροχοπτώσεων για το σύνολο των δεδομένων, αλλά και ομαδοποιημένων ανά εποχή συνοψίζονται στο διάγραμμα Box & Whisker του ίδιου σχήματος. Η μέση τιμή των βροχερών ημερών είναι 1 mm για τους καλοκαιρινούς μήνες και λιγότερο από 10mm για όλους τους υπόλοιπους, ενώ παρατηρούμε την παρουσία αρκετών ακραίων γεγονότων ειδικά κατά το φθινόπωρο και το χειμώνα, με τιμές που ξεπερνάνε τα 180 mm σε κάποιες περιπτώσεις.



Σχήμα 5-22: Διαγράμμα Box & Whisker για τις ημερήσιες τιμές βροχοπτώσεων, ομαδοποιημένες ανά εποχή αλλά και συνολικά, καθώς και το ιστόγραμμα των ημερήσιων βροχοπτώσεων για το σύνολο των δεδομένων για την περίοδο 1979 – 2019 στην περιοχή της Σάμου.

5.5.3 Τάση Θερμοκρασίας

Στο Σχήμα 5-23 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή τάση για κάθε εποχή του χρόνου στο σταθμό της Σάμου. Υπάρχει μια σαφής αυξητική τάση της μέσης θερμοκρασίας για όλες τις εποχές. Το καλοκαίρι εμφανίζεται η μεγαλύτερη τάση αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κατά περίπου 2.2°C , μέσα σε 40 έτη, με την άνοιξη και το φθινόπωρο να ακολουθούν (1.84°C και 1.81°C αντίστοιχα). Ο χειμώνας παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας με 1.24°C για την ίδια περίοδο. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συμβατά με τις εκτιμήσεις των Nykjaer, 2009; Casey et al., 2010; Skliris et al., 2012; Pisano et al., 2020 οι οποίοι εκτιμούν μια μέση αύξηση 0.05°C ανά έτος για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου με το καλοκαίρι και την άνοιξη να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με άλλες εποχές. Κάποιες διαφορές σε σχέση με το υπόλοιπο βορειοανατολικό Αιγαίο παρουσιάζονται εξαιτίας της γεωγραφικής τοποθέτησης του νησιού (κοντά στη Μικρά Ασία).

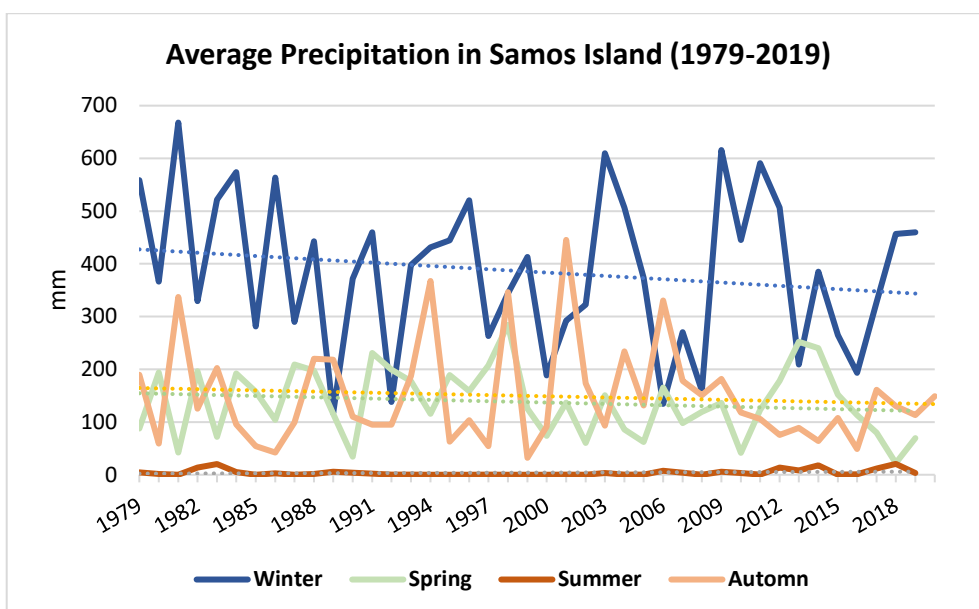


Σχήμα 5-23: Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας για διαφορετικές εποχές (Χειμώνας: Δεκ.-Φεβ., Άνοιξη: Μαρ.-Μαϊ., Καλοκαίρι: Ιουν.-Αυγ., Φθινοπώρο: Σεπ.-Νοε.) στο νησί της Σάμου.

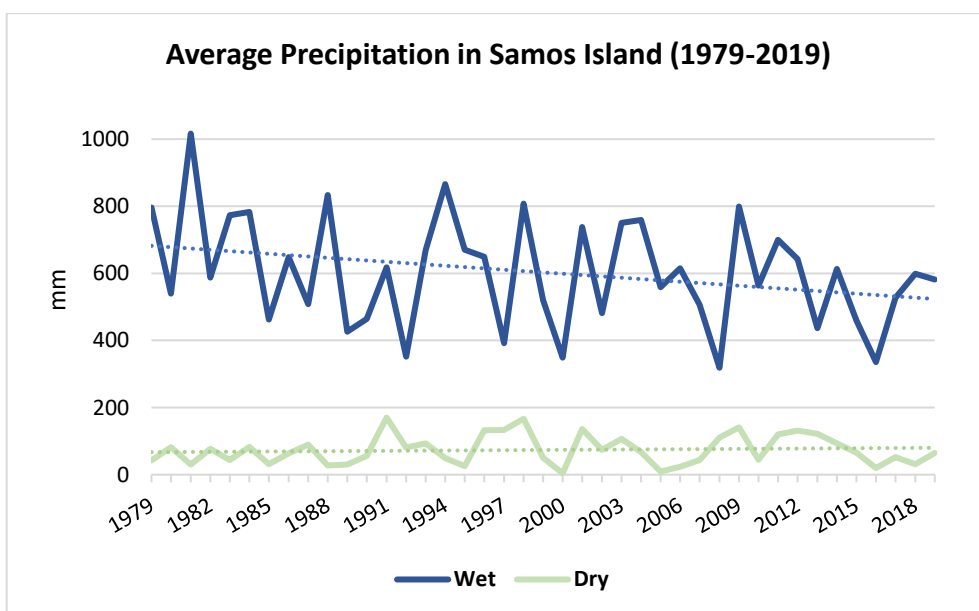
5.5.4 Τάση συνολικού ύψους βροχόπτωσης

Αντίστοιχα για τον ίδιο σταθμό και για την ίδια περίοδο (1979-2019) αναλύεται η βροχόπτωση για τις τέσσερες εποχές του χρόνου και η εξέλιξη τους κατά τη διάρκεια αυτού (Σχήμα 5-24). Η μέση βροχόπτωση κατά τη διάρκεια του χειμώνα εμφανίζει ξεκάθαρη πτώση κατά 19.5% για αυτή την περίοδο. Επίσης μεγάλη είναι η μείωση κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και της άνοιξης με 18.1% και 21.6% αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι βροχοπτώσεις είναι σχεδόν μηδενικές, και αν και κάποια έτη μετά το 2010 είχαμε μεγαλύτερες βροχοπτώσεις, δε διαφαίνεται κάποια σημαντική αλλαγή της τάσης. Τα αποτελέσματα είναι συμβατά με το μοντέλο των Brogli et al., 2019. Σε σχέση με τις εκτιμώμενες τιμές για τον ελληνικό χώρο (Kapsomenakis et al., 2011) υπάρχει συμφωνία αν και δε παρατηρείται η αναμενόμενη μικρή αύξηση κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, κάτι που ενδεχομένως να οφείλεται στη παρατεταμένη περίοδο από το 2010 και μετά, όπου παρατηρούνται ιδιαίτερα χαμηλές βροχοπτώσεις κατά τη φθινοπωρινή περίοδο.

Επιπλέον στο Σχήμα 5-25 αναλύεται η εξέλιξη της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της υγρής (Νοέμβριος έως Απρίλιος) και της ξηρής περιόδου (Μάιος έως Οκτώβριος). Παρατηρούμε ότι το σύνολο σχεδόν της βροχόπτωσης εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των έξι μηνών της υγρής περιόδου με σημαντική πτώση όμως κατά τη διάρκεια του χρόνου (23%) ενώ κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, οι βροχοπτώσεις είναι λίγες και αποτελούν μόνο ένα μικρό ποσοστό των ετήσιων βροχοπτώσεων. Παρουσιάζεται μια ανοδική τάση των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου αν και η τάση αυτή δεν είναι ξεκάθαρη.



Σχήμα 5-24: Εξέλιξη της βροχόπτωσης για διαφορετικές εποχές (Χειμώνας: Δεκ.-Φεβ., Άνοιξη: Μαρ.-Μαϊ., Καλοκαίρι: Ιουν.-Αυγ., Φθινόπωρο: Σεπ.-Νοε.) στο νησί της Σάμου.

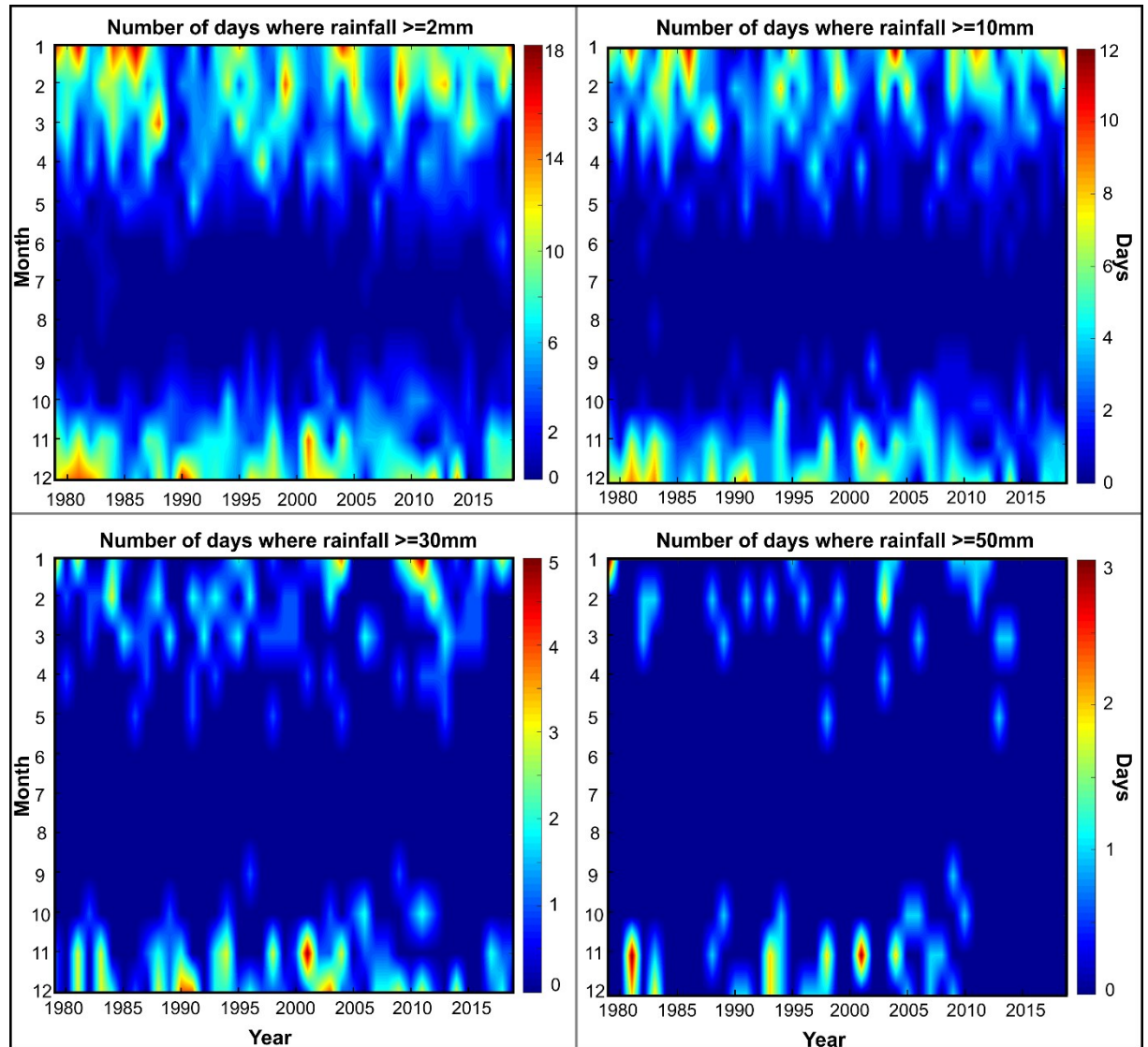


Σχήμα 5-25: Εξέλιξη της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της υγρής (Νοέμβριος έως Απρίλιος) και της ξηρής περιόδου (Μάιος έως Οκτώβριος) στο νησί της Σάμου.

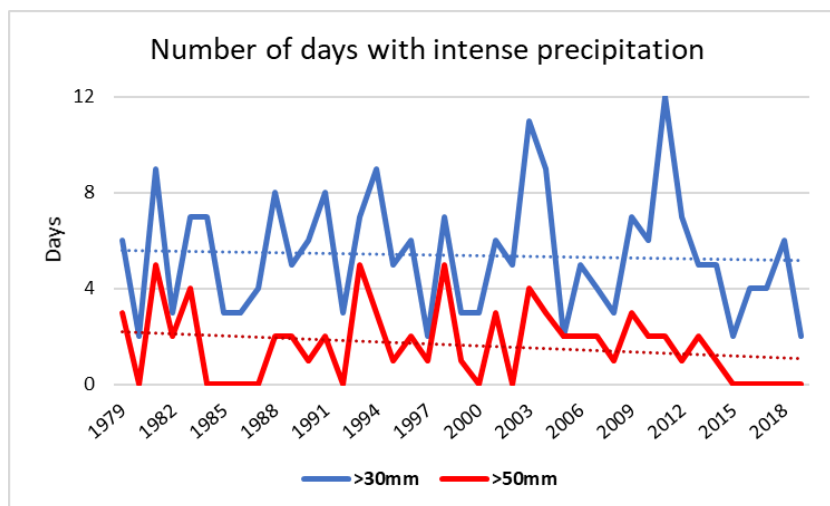
5.5.5 Ανάλυση της συχνότητας εμφάνισης των έντονων βροχοπτώσεων

Στο Σχήμα 5-26 αναλύονται οι βροχοπτώσεις με βάση το ύψος βροχής τους και τη συχνότητα τους εμφάνισης κατά τη διάρκεια ενός μήνα. Παρουσιάζονται με τη μορφή δισδιάστατου γραφήματος, στο οποίο βλέπουμε ότι έντονες βροχοπτώσεις (>10 mm) εμφανίζονται κυρίως κατά τους μήνες από Νοέμβριου έως και Μάρτιο ενώ ακόμα μεγαλύτερα φαινόμενα τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν πλημμύρες και έντονη

διάβρωση εμφανίζονται από το Νοέμβριο έως και το Φεβρουάριο. Τα ακραία γεγονότα (>50 mm) είναι σπάνια και συνήθως σχετίζονται με πλημμυρικά φαινόμενα (πχ κατά το Νοέμβριο του 2001). Όπως βλέπουμε και από το σχήμα 5-27 εμφανίζεται μια ελαφρώς πτωτική τάση στον αριθμό των ημερών όπου εμφανίζονται γεγονότα με πολύ υψηλά ύψη βροχής. Παρόλαυτα αν εξετάσουμε την περίοδο έως το 2013 παρατηρούμαι ότι υπήρχε μια αυξητική τάση.



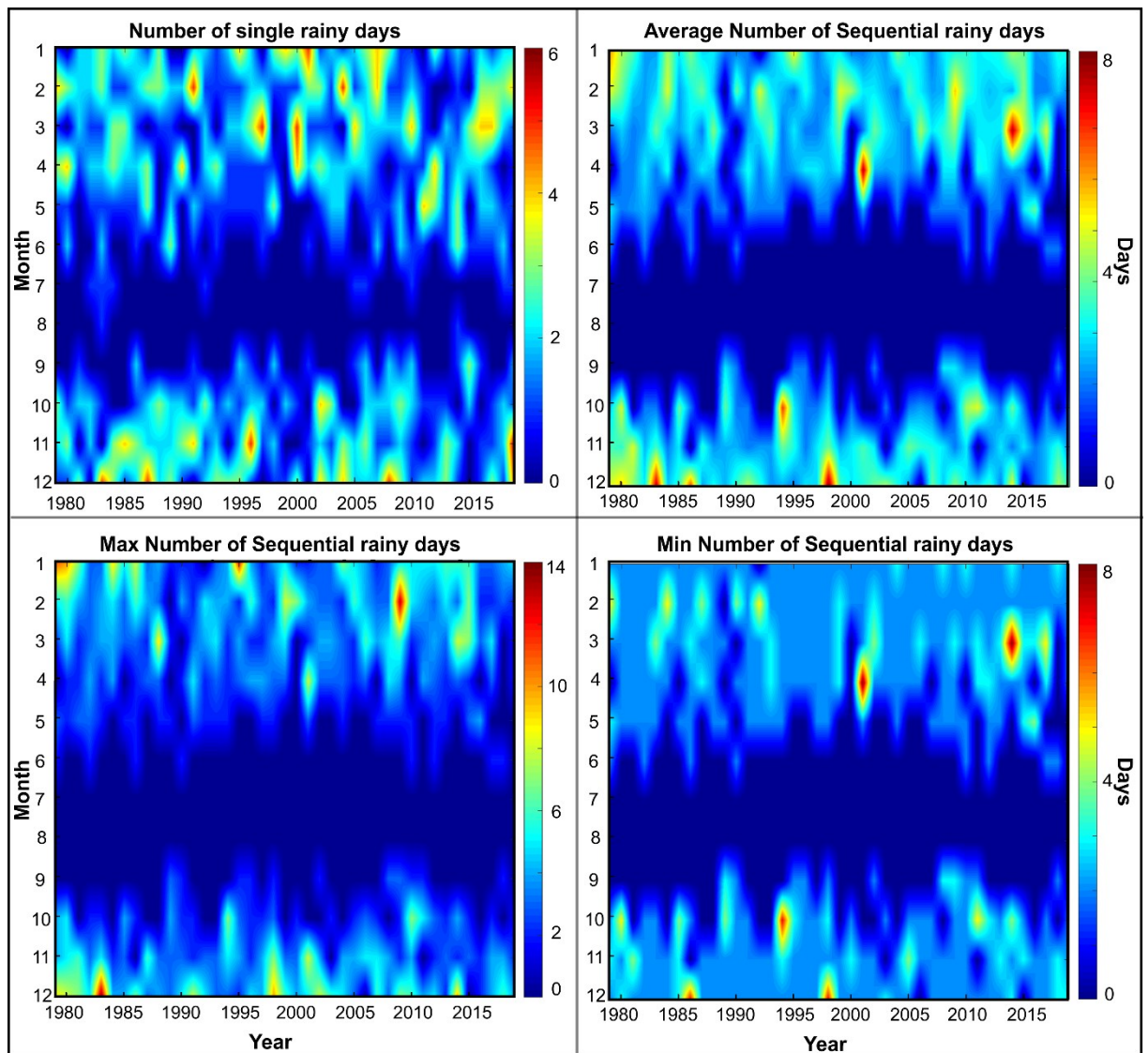
Σχήμα 5-26: Αριθμός βροχερών ημερών(ανά μήνα) για τις οποίες το ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο από : (α) 2mm, (β) 10mm, (γ) 30mm, (δ) 50mm.



Σχήμα 5-27: Η εξέλιξη με τον χρόνο του αριθμού των ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης.

5.5.6 Ανάλυση των μοτίβων εμφάνισης της βροχόπτωσης

Για την ίδια περιοχή μελέτης αναλύεται μέσω του MATLAB το μοτίβο εμφάνισης των βροχοπτώσεων στο χρόνο. Το Σχήμα 5-28 παρουσιάζει μέσω δισδιάστατης απεικόνισης την κατανομή των βροχερών ημερών στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι ημέρες όπου έχουμε μεμονωμένες βροχοπτώσεις, και επίσης οι συνεχόμενες βροχερές ημέρες υπό τη μορφή του μέσου όρου, του ελαχίστου και του μεγίστου συνεχόμενων βροχερών ημερών ανά σημείο του δυσδιάστατου χάρτη, σημείο το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιπροσωπεύει έναν μήνα.



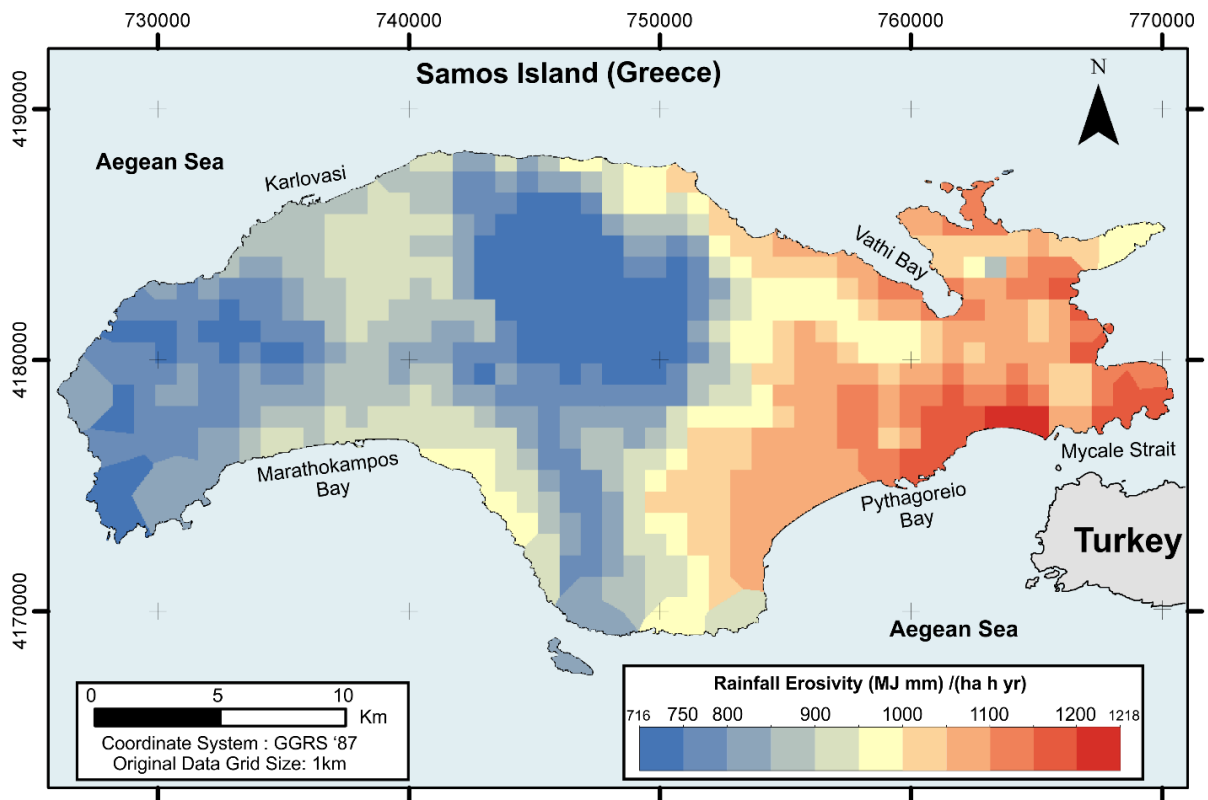
Σχήμα 5-28: Παρουσίαση του αριθμού των συνεχόμενων βροχερών ημερών ανά μήνα (*min, average, max*), καθώς και των απομονωμένων γεγονότων βροχόπτωσης.

5.7 Διάβρωση Εδαφών: Μοντέλο RUSLE

Όπως αναλύθηκε στη μεθοδολογία, αρχικά υπολογίζονται οι έξι παράγοντες που συνεισφέρουν στη διάβρωση σύμφωνα με τη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (RUSLE) και έπειτα υπολογίζεται η διάβρωση για κάθε σημείο της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας μέγεθος κυψελίδας 50 x 50m.

5.7.1 Παράγοντας R (διάβρωση λόγω της βροχής)

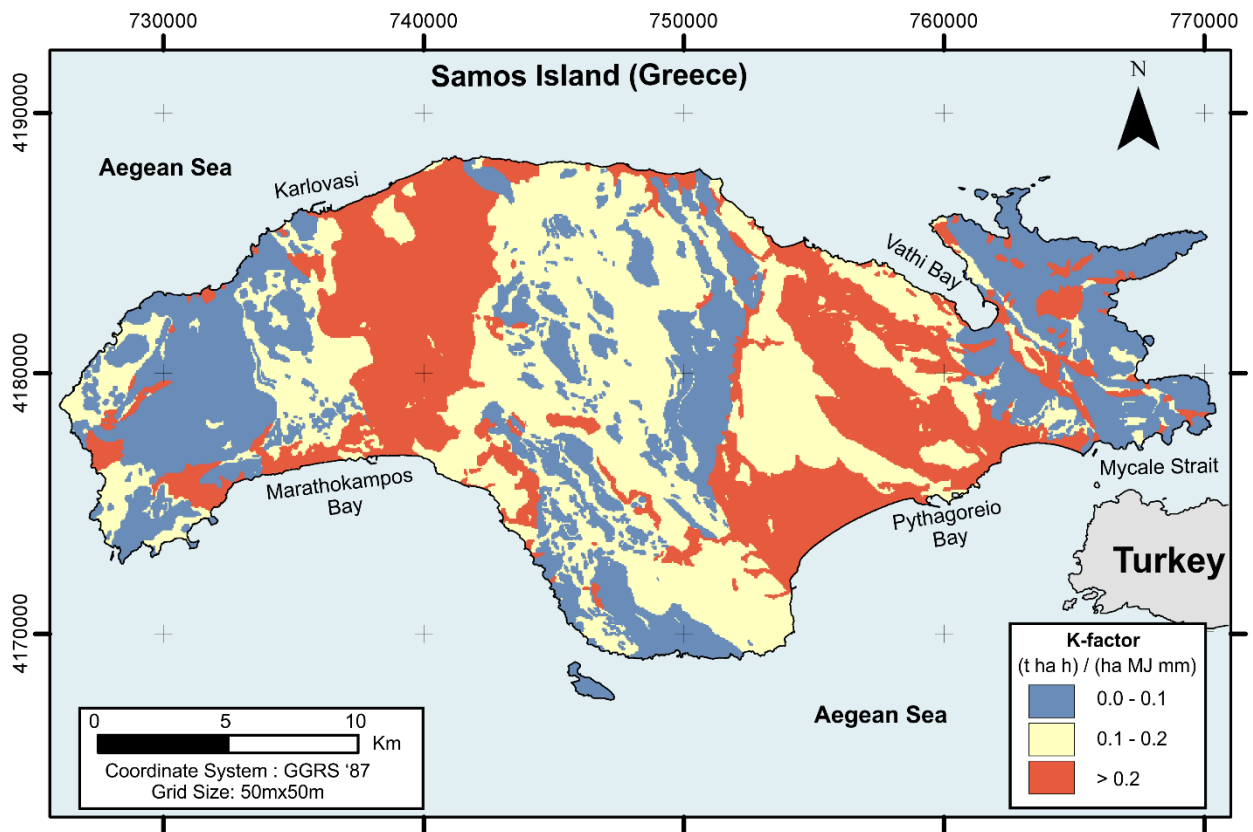
Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε προηγουμένως, σε περιβάλλον Γ.Σ.Π υπολογίζεται ο παράγοντας R για το νησί της Σάμου. Η μέση τιμή του παράγοντα R είναι $910.3 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ year}^{-1}$, με τυπική απόκλιση $129.7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ year}^{-1}$, ενώ στις ανατολικές περιοχές βλέπουμε ότι έχουμε τις μεγαλύτερες τιμές που ξεπερνάνε και τις 1200 μονάδες. Βλέπουμε ότι η μέση τιμή του παράγοντα είναι πολύ κοντά σε αυτή που υπολογίζεται μέσω εμπειρικού τύπου για την περιοχή μελέτης (Φλαμπούρης, 2008; $880 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ year}^{-1}$ όπως υπολογίστηκε στη μεθοδολογία). Αν και θα αναμέναμε στα ορεινά να έχουμε μεγαλύτερο ύψος βροχής αυτό δε φαίνεται να ισχύει τουλάχιστον σύμφωνα με τα δεδομένα του ESDAC. Ελλείψει άλλων στοιχείων για τον υπολογισμό της χωρικής του κατανομής, χρησιμοποιούμε τον παράγοντα R του σχήματος 5-20 ως είσοδο στο μοντέλο RUSLE.



Σχήμα 5-20: Παράγοντας R (ένταση διάβρωσης εξαιτίας της βροχής) για την περιοχή μελέτης βάση των στοιχείων του ESDAC.

5.7.2 Παράγοντας K (διαβρωσιμότητα του εδάφους)

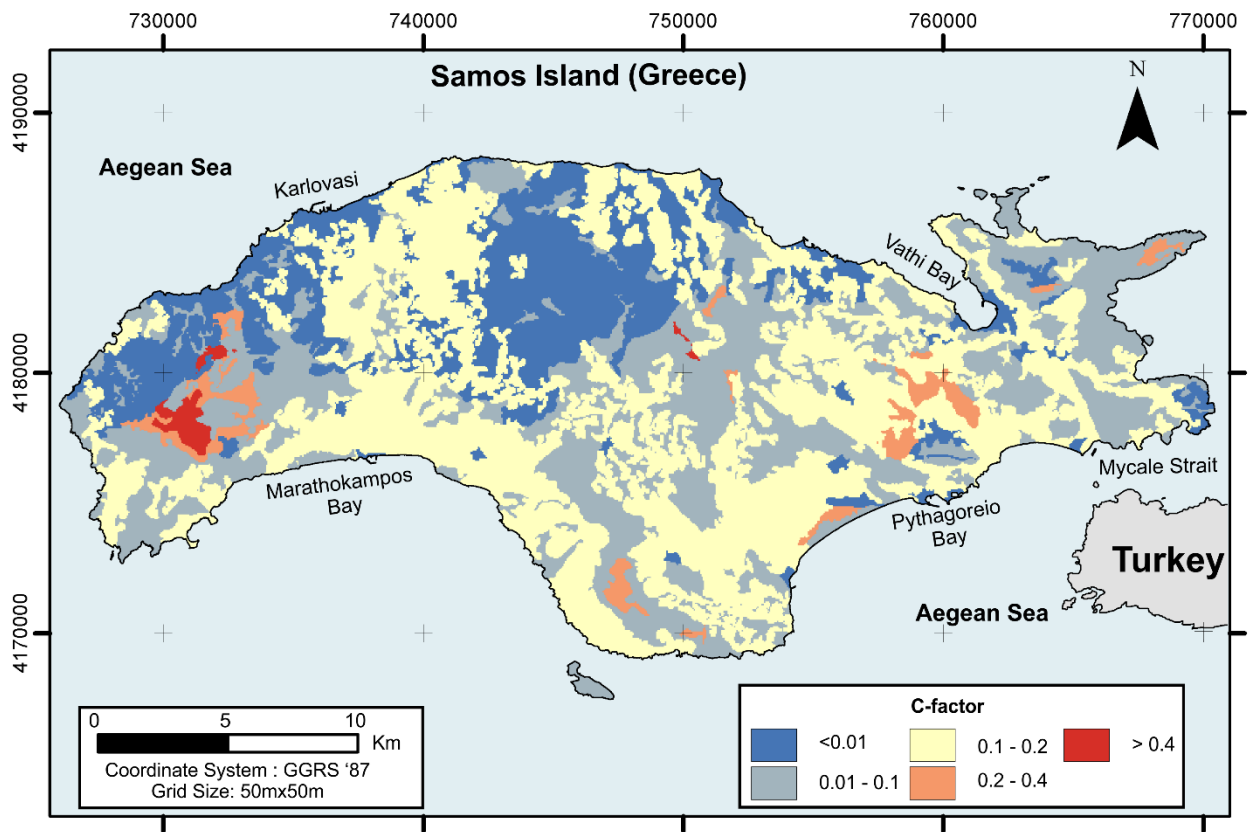
Ο παράγοντας K εκτιμήθηκε εμπειρικά, βάση των λιθολογικών σχηματισμών στην περιοχή, όπως προαναφέρθηκε στη Μεθοδολογία. Ο τελικός χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-21. Παρατηρούμε ότι στους ορεινούς όγκους του Κερκετέα στα δυτικά και της Ζωοδόχου Πηγής στα ανατολικά έχουμε πολύ μικρές τιμές ενώ στο κεντρικό τμήμα έχουμε μεγαλύτερες λόγω της λιθολογίας, καθώς σε αυτό το τμήμα επικρατούν οι σχιστόλιθοι, οι μάργες και τα τεταρτογενή. Στις νεογενείς λεκάνες ο παράγοντας K λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή του ($0.35 \text{ tons h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).



Σχήμα 5-21: Παράγοντας K (διαβρωσιμότητα εδάφους) για την περιοχή μελέτης.

5.7.3 Παράγοντας C (επίδραση χρήσεων γης)

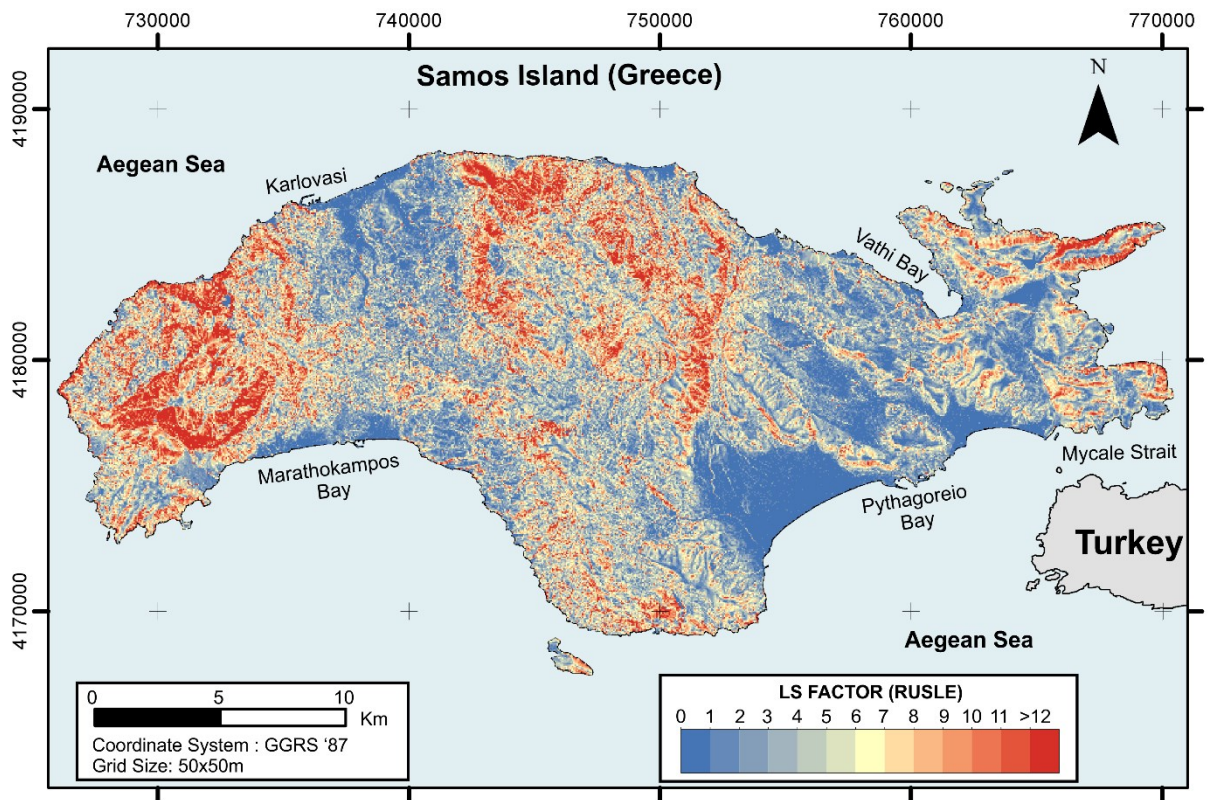
Ο παράγοντας C εκτιμήθηκε με βάση τα δεδομένα του Corine, όπως αναλύθηκε στη Μεθοδολογία. Ο τελικός χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-22. Σε ολόκληρη τη Σάμο παρατηρούνται γενικά μικρές τιμές του παράγοντα C, εξαιτίας της πυκνής βλάστησης που την χαρακτηρίζει. Πολύ λίγες περιοχές εμφανίζουν τιμές μεγαλύτερες από 0.2, και οι περισσότερες βρίσκονται σε περιοχές που έχουν πληγεί από πυρκαγιές κατά το παρελθόν (π.χ. Κερκετέας και βορειοανατολικότερο άκρο της νήσου). Εκτεταμένες περιοχές, κυρίως γύρω από τις νεογενείς λεκάνες χαρακτηρίζονται από μεσαίες τιμές (0.1 έως 0.2).



Σχήμα 5-22: Παράγοντας C (επίδραση χρήσεων γης στη διάβρωση) για την περιοχή μελέτης.

5.7.4 Παράγοντας LS (τοπογραφικός παράγοντας)

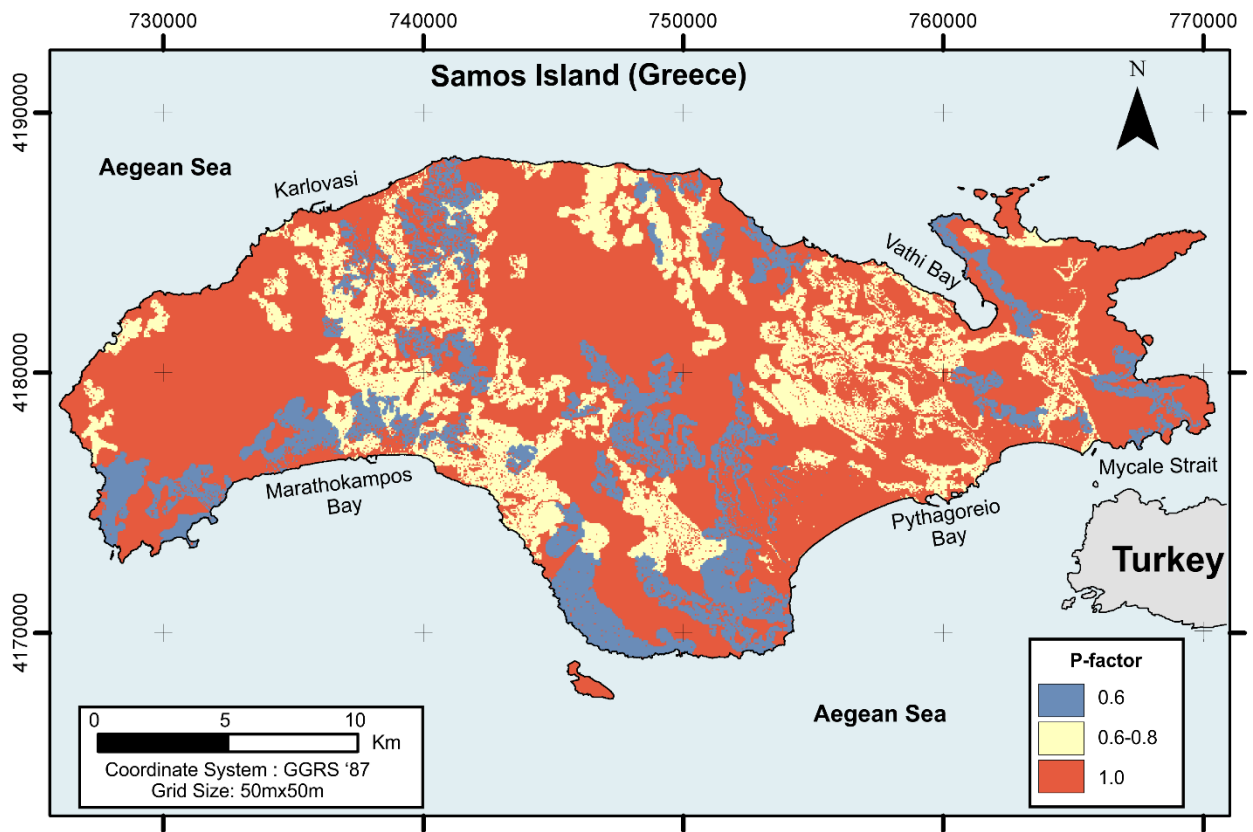
Ο παράγοντας LS υπολογίστηκε μέσω του SAGA GIS όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.2.1.2 της μεθοδολογίας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-23. Ο παράγοντας LS, Ο οποίος εισάγεται στο μοντέλο RUSLE έχει διάσταση κυψελίδας 50 x 50 m, ώστε να είναι συμβατός με την χωρική ανάλυση των υπόλοιπων παραγόντων του μοντέλου RUSLE. Δε παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στη χωρική κατανομή του παράγοντα LS με μέγεθος κυψελίδας 50x50 m και του παράγοντα που εισάγεται στα ασαφή μοντέλα, με μέγεθος κυψελίδας 5x5m (βλέπε ενότητα 5.1.2), ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στη προηγούμενη υποενότητα.



Σχήμα 5-23: Παράγοντας LS για την περιοχή μελέτης (μέγεθος κυψελίδας 50 x 50m – RUSLE INPUT)

5.7.5 Παράγοντας P (παράγοντας διαχειριστικών πρακτικών)

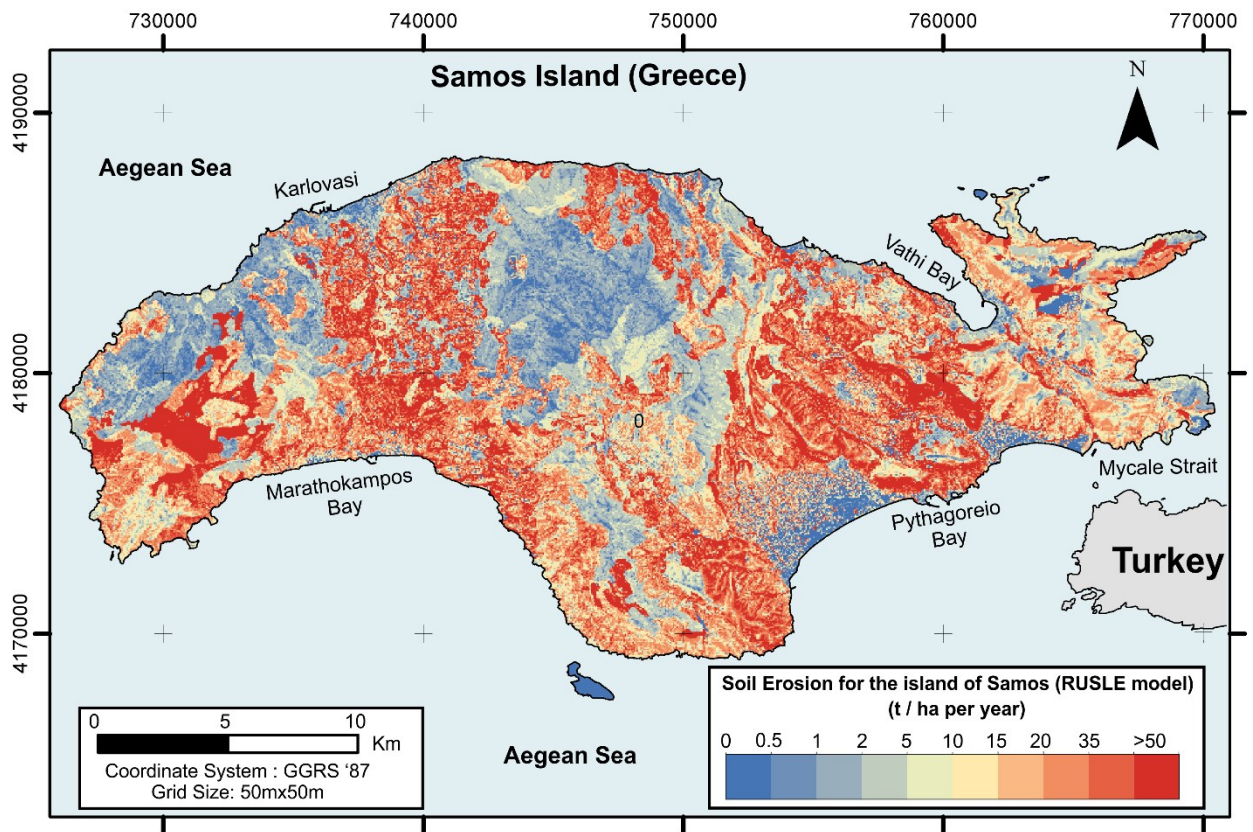
Ο παράγοντας P υπολογίστηκε μέσω Γ.Σ.Π. όπως έχει αναλυθεί στην Μεθοδολογία. Ο τελικός χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-24. Ο παράγοντας P λαμβάνει τη τιμή 1 σε μεγάλο μέρος της περιοχής μελέτης. Σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και καλλιέργειες (ιδίως ελαιώνες ή αμπέλια) παρατηρήθηκε χρησιμοποιούνται διάφορες διαχειριστικές τεχνικές, όπως αναβαθμίδες και μικρά τοιχία και σε αυτές τις περιοχές ο παράγοντας P λαμβάνει τιμές από 0.6 έως 0.8. Πρόκειται για περιοχές στα ημιορεινά και ιδίως εκατέρωθεν του όρους της Αμπέλου.



Σχήμα 5- 24: Παράγοντας P για την περιοχή μελέτης

5.7.6 Η εκτιμώμενη διάβρωση του εδάφους μέσω του μοντέλου RUSLE

Συνδυάζοντας τους παραπάνω πέντε παράγοντες μέσω Γ.ΣΠ. όπως αναλύθηκε στην μεθοδολογία μπορούμε να εκτιμήσουμε τη χωρική κατανομή της μέσης απώλειας εδάφους για την περιοχή μελέτης (Σχήμα 5-25). Ταξινομήσαμε τις τιμές σε 10 κλάσεις, βασισμένοι στη βιβλιογραφία (Rozos et al., 2013; Panagos et al., 2015) με τιμές (α) 0 έως 0.5, (β) 0.5 έως 1 (γ) 1 έως 2 (δ) 2 έως 5 (ε) 5 έως 10 (στ) 10 έως 15 (ζ) 15 έως 20 (η) 20 έως 35 (θ) 35 έως 50 και τέλος (ι) πάνω από $50 t ha^{-1} year^{-1}$ και κατόπιν οπτικοποιήσαμε τη διάβρωση για την περιοχή μελέτης. Κατά μέσο όρο για όλη την περιοχή μελέτης έχουμε μια εκτιμώμενη απώλεια $29 t ha^{-1} year^{-1}$. Πολύ υψηλές τιμές ($>50 t ha^{-1} year^{-1}$) παρατηρούνται στις νότιες πλαγιές του Κερκετέα, τις δυτικές πλαγιές της Αμπέλου αλλά και στη περιοχή ανάμεσα στο Πυθαγόρειο και το Βαθύ. Χαμηλές τιμές παρουσιάζονται στα επίπεδα τμήματα των νεογενών λεκάνων, στις ανατολικές πλαγιές της Αμπέλου και στο βόρειο τμήμα του Κερκετέα.

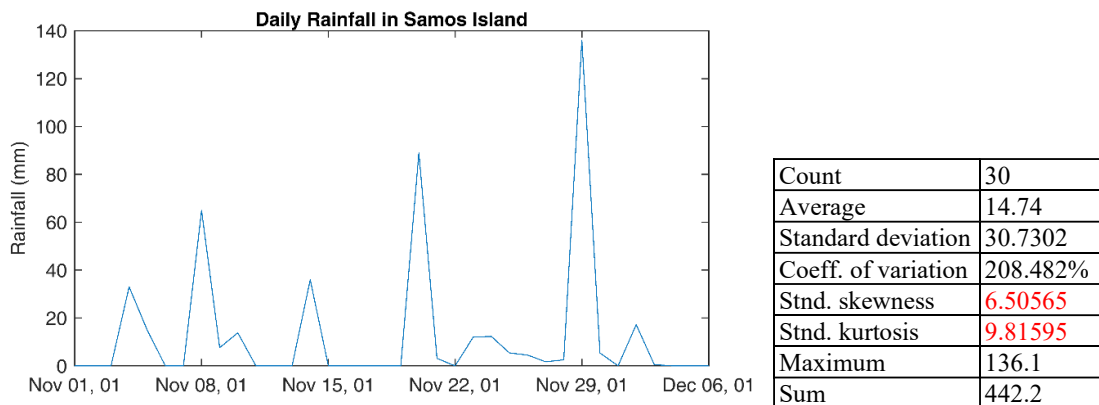


Σχήμα 5-25: Χάρτης Εκτίμησης της διάβρωσης για την περιοχή της Σάμου (RUSLE).

Από το ιστόγραμμα της κατανομής των προβλεπόμενων τιμών διάβρωσης του RUSLE παρατηρούμε ότι το 20% της περιοχής μελέτης παρουσιάζει χαμηλές τιμές (<2 t/ha per year), ενώ το 42% παρουσιάζει τιμές κάτω από 10 t/ha per year. Περίπου το 5% παρουσιάζει πολύ μεγάλες τιμές (>100 t/ha per year) ενώ το υπόλοιπο ποσόστο βρίσκεται μεταξύ 10 και 100 t/ha per year.

5.8. Υδρολογική ανάλυση SCS-CN

Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε στις τέσσερις λεκάνες της περιοχής μελέτης για να εκτιμηθούν τα υδρολογικά τους χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος και συγκεκριμένα των πλημμυρών που ακολούθησαν μια έντονη καταιγίδα το Νοέμβριο του 2001 περίοδο που πλημμύρησαν πολλές υδρογραφικές λεκάνες του νησιού. Μελετώντας το τη κατανομή των ημερήσιων βροχοπτώσεων παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου του 2001 είχαμε την εμφάνιση αρκετών καταιγίδων με ημερήσιο ύψος βροχής πάνω από 30 mm. Η μέση βροχόπτωση για όλο το μήνα ήταν 15 mm ενώ η ολική βροχόπτωση του Νοεμβρίου ήταν 442.2 mm (περίπου το 70% της ετήσιας βροχόπτωσης. Στο ακραίο γεγονός της 29^{ης} Νοεμβρίου η βροχόπτωση πλησίασε τα 140 mm στον σταθμό μέτρησης σε μια μόνο ημέρα (Σχημα....). Μάλιστα πληροφορίες από τοπικές υπηρεσίες αναφέρουν ότι στα ορεινά (Πάνδροσο, Βουρλιώτες) η βροχόπτωση πλησίασε τα 440 mm μέσα σε 7 ώρες. Για τον σταθμό της EMY που έχουμε τα επίσημα στοιχεία και μελετώντας τις πέντε προηγούμενες ημέρες από το μεγάλο επεισόδιο έχουμε 26.4 mm βροχής άρα είμαστε σε ενδιάμεσες συνθήκες προηγούμενης υγρασίας και χρησιμοποιούμε το CN(II).



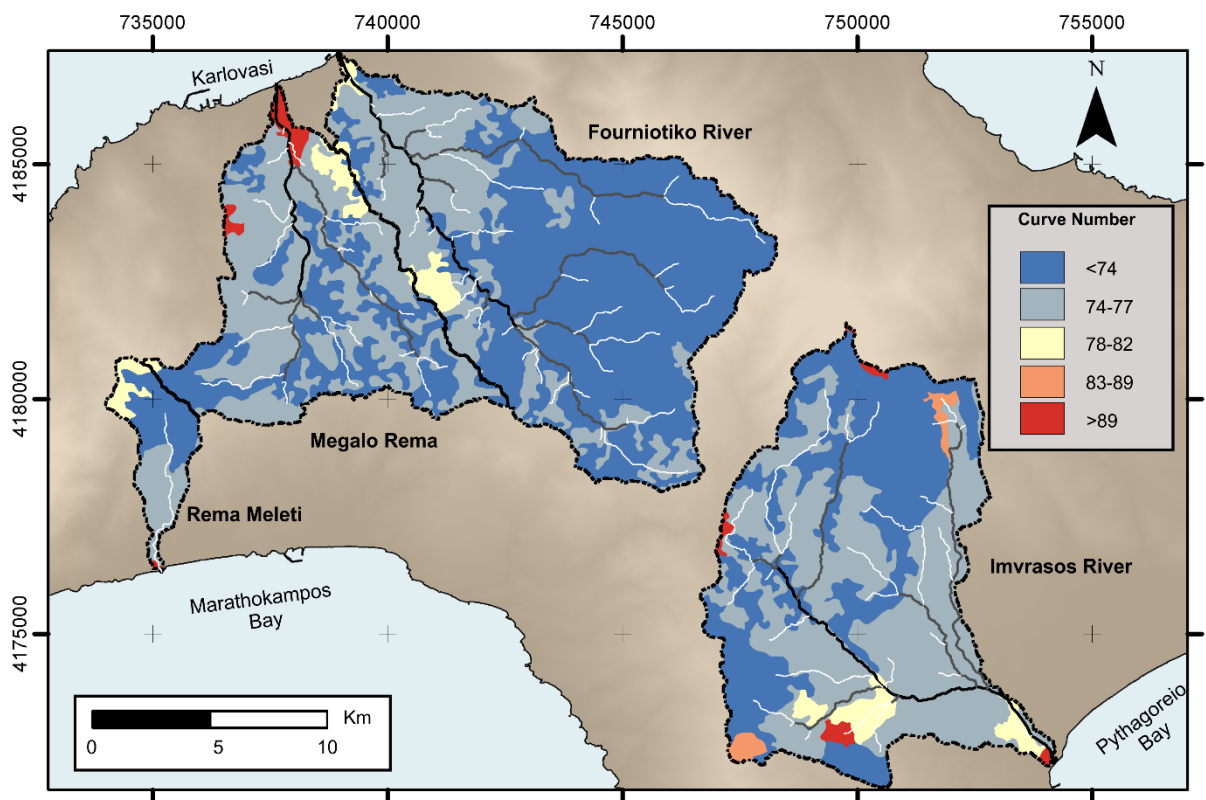
Σχήμα 5-26: Ημερήσια ύψη βροχής για τις προηγούμενες και τις επόμενες μέρες από το ακραίο γεγονός της 29^{ης} Νοεμβρίου 2001.

Όπως περιεγράφηκε στη μεθοδολογία υπολογίζονται τα Curve Numbers για τις τέσσερις λεκάνες και έπειτα για κάθε λεκάνη υπολογίζεται το συνολικό Curve Number (Composite Curve Number, μέσος όρος).

Έπειτα υπολογίζουμε την ενεργό βροχόπτωση για τις ενδιάμεσες συνθήκες υγρασίας και έπειτα την ενεργή βροχόπτωση. Κατόπιν ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για τον υπολογισμό των υπολοίπων παραγόντων. Για παράδειγμα για το Φουρνιώτικο ποταμό έχουμε:

- $S = \frac{1000}{73.09} - 10 = 3.68$
- $P_e = \frac{(5.35 \text{ inches} - 0.2 * 3.68)^2}{5.35 \text{ inches} + 3.68} = 2.36 \text{ inches} = 59.9 \text{ mm}$ ενεργή βροχόπτωση κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι εάν οι αρχικές συνθήκες ήταν υγρές θα είχαμε 95 mm.
- $t_L = \frac{13,060 m^{0.8} (2540 - 22.86 * 73.09)^{0.7}}{14104 * 73.09^{0.7} * 0.3758 \text{ m/m}} = 1.28 \text{ hours}$
- $t_c = \frac{5}{3} * 1.28 = 2.05 \text{ hours}$
- $t_R = 0.133 * 2.05 = 0.27 \text{ hours}$
- $t_p = \frac{0.27}{2} + 1.28 = 1.43 \text{ hours}$
- $t_{base} = 2.67 * 1.43 = 3.82 \text{ hours}$
- $Q_p = 2.08 \frac{45.999}{1.43} = 66.82 \text{ m}^3/\text{s}$ για κάθε εκατοστό ενεργής βροχόπτωσης σε χρόνο t_R

Για τις υπόλοιπες λεκάνες εκτελούμε τους υπολογισμούς με παρόμοιο τρόπο (Πίνακας 5-8)

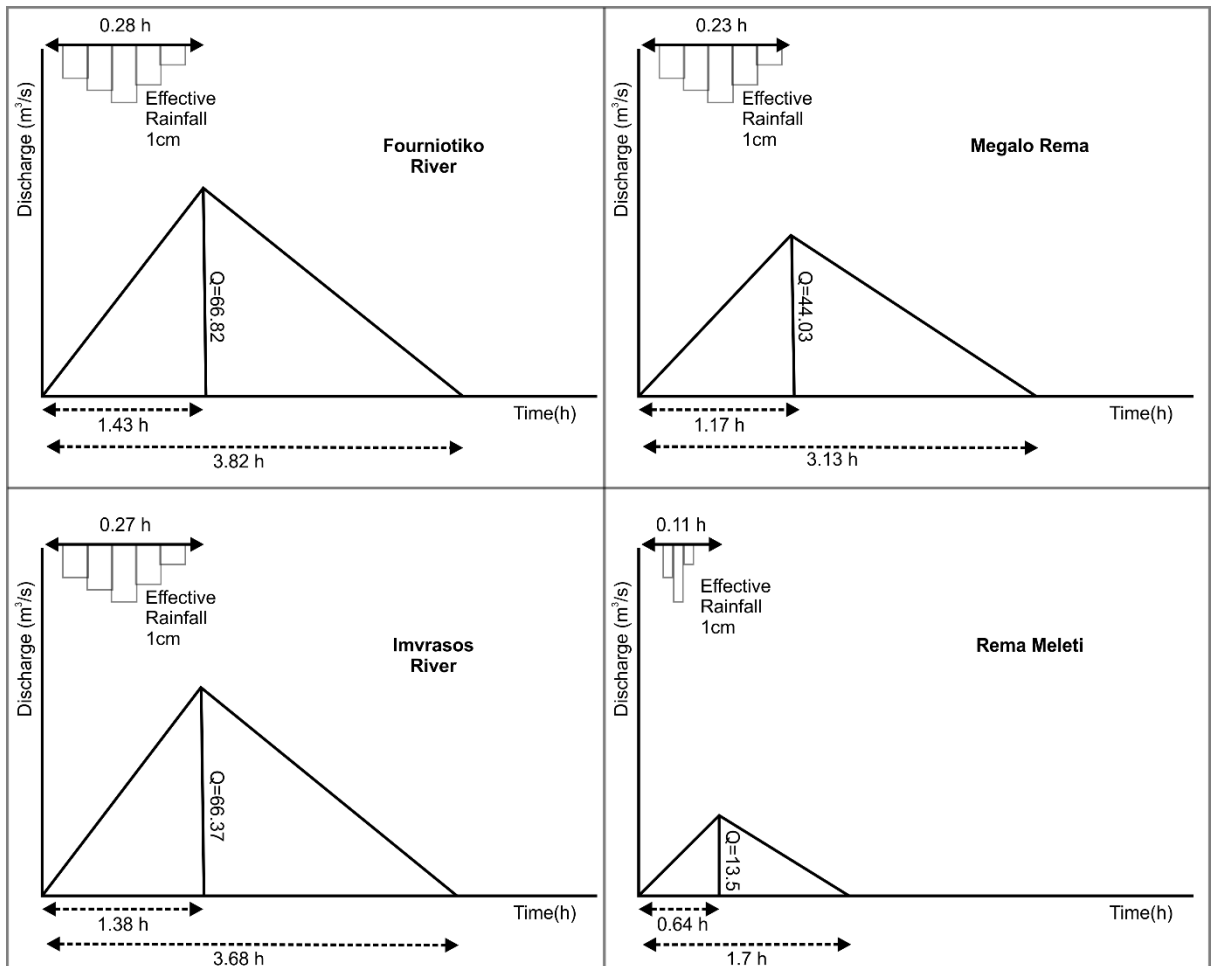


Σχήμα 5-27: Η χωρική κατανομή των τιμών Curve Number

Πίνακας 5-8: Υδρολογικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων υδρολογικών λεκανών, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου SCS.

Parameter	Fourniotiko	Megalo Rema	Imvrasos	Rema Meleti
Hydraulic length (m)	13,060	9,319	12,944	5,094
Slope (m/m)	0.376	0.299	0.343	0.504
Composite CN (II)	73.09	75.57	75.85	75.46
Potential maximum Retention: S	3.68	3.23	3.18	3.25
Excess Rainfall: P_e (mm)	59.9	65.5	66.1	65.2
Lag time: t_L	1.28	1.02	1.23	0.49
Time of Concetration: t_c	2.14	1.70	2.05	0.81
Duration of Rainfall Excess: t_R	0.28	0.23	0.27	0.11
Time to peak: t_p	1.43	1.17	1.38	0.64
t_{base}	3.82	3.13	3.68	1.70
Peak discharge: Q_p (m ³ /s)	66.82	44.03	66.37	13.5

Η απόκριση των τεσσάρων υδρολογικών λεκανών παρουσιάζεται μέσω τριγωνικών υδρογραφημάτων της μεθόδου SCS, τα οποία παρατίθενται στο σχήμα 5-28. Παρατηρούμε ότι ο Φουρνιώτικος αναμένεται να έχει τη μεγαλύτερη παροχή, αλλά και τους μεγαλύτερους χρόνους υστέρησης, συρροής, ανόδου και χρονικής διάρκειας της βροχόπτωσης. Παρόλαυτα το Φουρνιώτικο παρουσιάζει σημαντικά μικρότερο ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης εξαιτίας της εμφάνισης δασικών περιοχών σε μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του. Έτσι ο Ίμβρασος αν και αποστραγγίζει μικρότερη έκταση, εμφανίζει σχεδόν ίδια τιμή μέγιστης παροχής με τον Φουρνιώτικο, ενώ οι χρόνοι που προαναφέρθηκαν είναι μικρότεροι. Το Μεγάλο Ρέμα παρουσιάζει σημαντική μέγιστη απορροή για την έκταση της λεκάνης του, ενώ ο χρόνος συρροής και οι υπόλοιποι χρόνοι που παρουσιάζονται στο υδρογράφημα είναι μικρότεροι, απαιτώντας έτσι μικρότερο χρόνο για τη δημιουργία πλημμυρικής παροχής. Τέλος το Ρέμα Μελέτη είναι πολύ μικρότερο σε έκταση από τα υπόλοιπα, αλλά παρουσιάζει σχετικά υψηλή μέγιστη παροχή, και πολύ μικρούς χρόνους συγκέντρωσης, υστέρησης κ.α. Έτσι κατά τη διάρκεια γεγονότων μικρής διάρκειας μπορεί να εμφανιστούν πλημμυρικές παροχές, και καθώς εκβάλλει σε κατοικημένη περιοχή να προκληθούν σημαντικές καταστροφές.



Σχήμα 5-28: Τριγωνικά υδρογραφήματα για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου SCS.

5.9. Αυτοματοποιημένο ασαφές σύστημα εκτίμησης πάχους του εδάφους

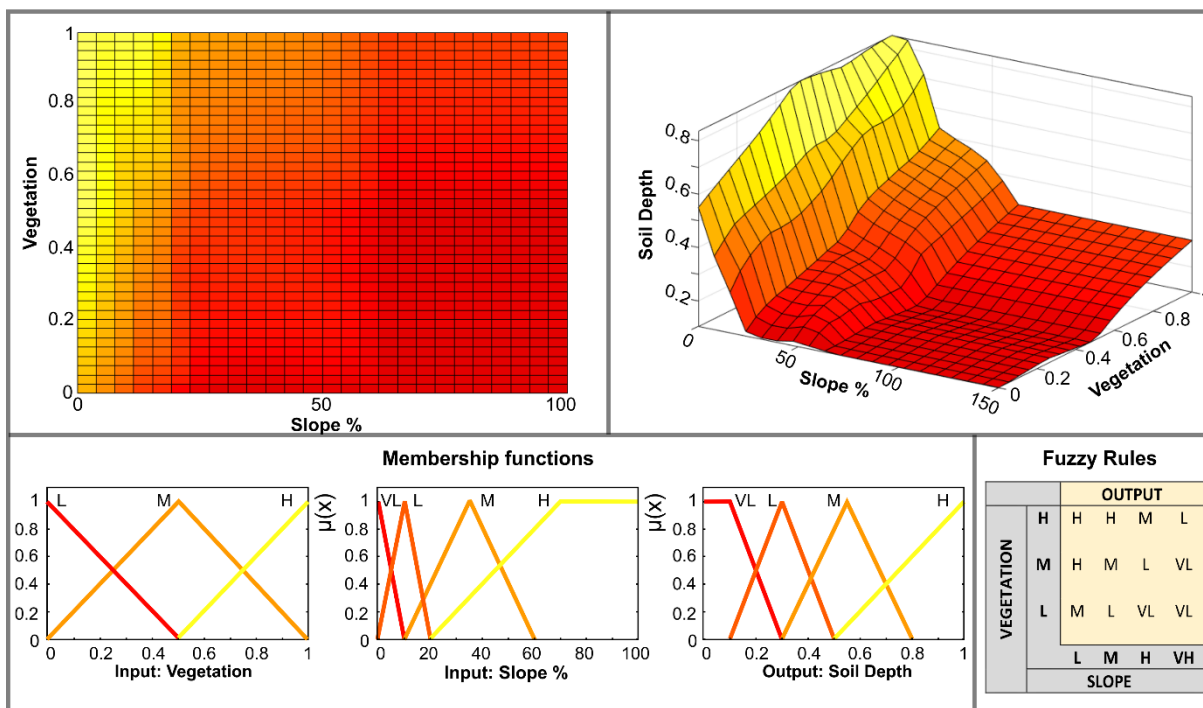
Το έδαφος και ιδιαίτερα το πάχος του αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος το οποίο επηρεάζει άμεσα τις υδρολογικές διεργασίες σε μια λεκάνη απορροής. Επίσης είναι και το υλικό το οποίο διαβρώνετε πιο ευκολα. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν αποδοτικοί τρόποι εκτίμησης του πάχους του εδάφους μέσω της ασαφούς λογικής με τη χρήση ευρέως διαθέσιμων δεδομένων όπως η κλίση και οι χρήσεις γης (Corine Land Cover 2018 ή NDVI). Έτσι ανάλογα με τη διαθεσιμότητα δεδομένων μπορούμε ευκολα να υπολογίσουμε το πάχος του εδάφους σε οποιαδήποτε περιοχή του κόσμου, μέσω των προτεινόμενων αυτοματοποιημένων τεχνικών σε Γ.Σ.Π.τα οποία υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια της Python (arcpy) σε περιβάλλον ArcGIS.

5.9.1. ΜΟΝΤΕΛΟ Π1: Εκτίμηση πάχους εδάφους με εισόδους την κλίση και το CLC 2018.

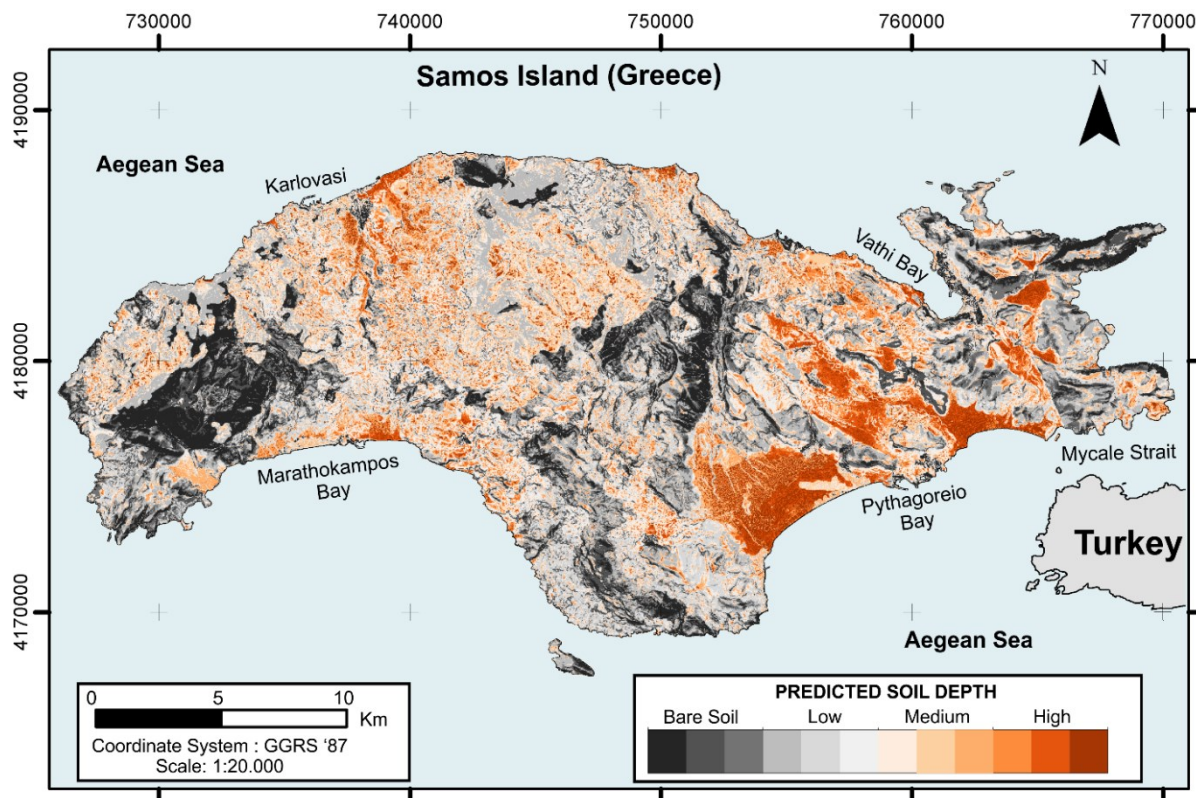
Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.6.2 και χρησιμοποιώντας ως εισόδους τη μορφολογική κλίση (%) και τις χρήσεις γης του Corine Land Cover δημιουργούμε ένα Σύστημα Ασαφούς Συμπερασματολογίας (FIS) τύπου Mamdami. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των δύο εισόδων και της εξόδου, καθώς και οι ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-29. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (τελεστής AND: min., συνεπαγωγή : prod., συνάθροιση κανόνων : max., αποασαφοποίηση: COA) για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα [0,1] το οποίο παρουσιάζεται μέσω διαγράμματος επιφάνειας εξόδου (2-D και 3-D) στο σχήμα που ακολουθεί.

Η έξοδος του ασαφούς συστήματος αντιπροσωπεύει το πάχος του εδάφους με τις μικρές τιμές να είναι ενδεικτικές της εμφάνισης του μητρικού πετρώματος στην επιφάνεια, ενώ υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε περιοχές όπου το πάχος αναμένεται να είναι μεγάλο. Μέσω Γ.Σ.Π οπτικοποιούμε το αποτέλεσμα (Σχήμα 5-30), στο οποίο οι συνεχείς τιμές που προέκυψαν από το ασαφές σύστημα, χωρίζονται σε 4 κύριες ομάδες και 12 υπο-ομάδες για την καλύτερη οπτικοποίηση του αποτελέσματος. Για τα όρια των 4 ομάδων χρησιμοποιούνται τα όρια των συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου, και πιο συγκεκριμένα τα εύρη για τα οποία μια ομάδα επικρατεί (π.χ. οι τιμές εξόδου του FIS έως 0.2 είναι κατά κύριο λόγο V.Low και αντιστοιχούν στην ομάδα ‘γυμνό έδαφος’ του σχήματος 5-30.).

Mamdani Fuzzy Inference System for soil depth prediction



Σχήμα 5-29: Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου ΠΙ (συναρτήσεις συμμετοχής, ασαφείς λογικοί κανόνες) ασαφούς συστήματος τύπου Mamdani για την εκτίμηση του βάθους του εδάφους στην περιοχή μελέτης, καθώς και διαγράμμα επιφάνειας εξόδου του συστήματος για το συνδυασμό των δυο εισόδων.



Σχήμα 5-30: Εκτιμώμενο βάθος του εδάφους στο νησί της Σάμου, μετά την εφαρμογή αυτοματοποιημένου συστήματος ασαφούς λογικής ΠΙ.

Εντοπίζουμε υψηλά βάθη εδάφους στις νεογενείς λεκάνες της περιοχής αλλά και σε κάποια σημεία του όρους Άμπελος, μηδενικά πάχη εδάφους στον Κερκετέα και σε κάποια άλλα ορεινά σημεία του νησιού και μέτρια πάχη εδάφους στις υπόλοιπες περιοχές. Στο σύνολο της Σάμου περίπου το 22% της επιφάνειας εμφανίζει μηδενικά πάχη εδάφους, το 38.5% έχει χαμηλό πάχος, το 27.3% μεσαίο και το 12.2% υψηλό πάχος. Σχεδόν όλες οι επίπεδες επιφάνειες εκτιμάται ότι θα έχουν υψηλό πάχος εδάφους (σε ποσοστό 92.1%), οι επιφάνειες με χαμηλές κλίσεις (<10%) αναμένεται να έχουν μεσαίο ή υψηλό πάχος εδάφους, οι επιφάνειες με μεσαίες κλίσεις (10%-20%) αναμένεται να έχουν κυρίως μεσαία πάχη εδάφους και σταδιακά στις μεγαλύτερες κλίσεις βλέπουμε ότι το έδαφος αρχίζει να έχει μικρότερη παρουσία (Πίνακας 5-9). Όσον αφορά τις χρήσεις γης βλέπουμε ότι για τις θαμνώδεις ή απογυμνωμένες εκτάσεις (κωδικοί 321 έως 332 του CLC) αλλά και τις αστικές περιοχές ή περιοχές με ανθρώπινη δραστηριότητα (κωδικοί 112-142) τα προβλεπόμενα πάχη εδάφους είναι πολύ μικρά, όπως είναι αναμενόμενο. Για τις δασικές περιοχές (κωδικοί 311 έως 313) έχουμε μέτρια πάχη εδάφους, ενώ οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, και ιδιαίτερα οι κωδικοί 211,222,242 εμφανίζουν μεγάλα πάχη εδάφους (Πίνακας 5-9).

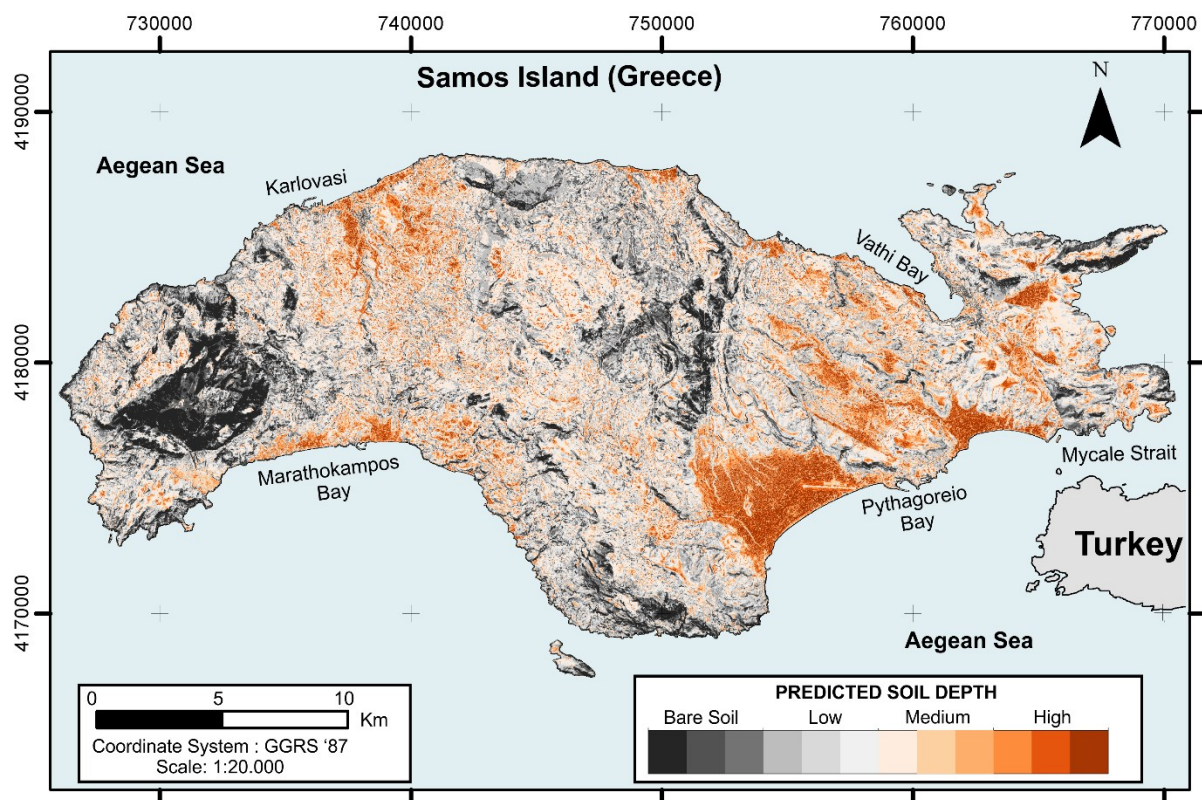
Πίνακας 5-9: Ποσοστιαία Κατανομή του προβλεπόμενου πάχους εδάφους για διαφορετικές χρήσεις γης και διαφορετική κλίση στο νησί της Σάμου.

SOIL DEPTH					SOIL DEPTH				
CLC_CODE	V.Low	Low	Medium	High	CLC_CODE	V.Low	Low	Medium	High
112	36.2%	32.5%	24.3%	7.1%	333	83.9%	10.5%	4.7%	0.8%
121	24.1%	40.8%	32.4%	2.6%	421	0.0%	0.2%	2.2%	97.6%
123	38.1%	34.9%	26.9%	0.0%	512	0.0%	1.1%	12.2%	86.7%
124	0.3%	8.2%	80.9%	10.6%					
131	59.8%	26.3%	11.5%	2.4%	SLOPE%	V.Low	Low	Medium	High
142	28.1%	30.6%	41.3%	0.0%	0-1	0.0%	0.0%	7.9%	92.1%
211	0.0%	1.3%	12.3%	86.4%	1-3	0.2%	0.4%	57.2%	42.2%
221	3.3%	40.3%	39.8%	16.7%	3-10	0.1%	3.8%	33.1%	63.1%
222	0.5%	5.4%	33.8%	60.3%	10-20	1.3%	14.3%	62.8%	21.5%
223	8.5%	55.8%	25.9%	9.8%	20-33	4.3%	58.8%	36.7%	0.2%
231	41.9%	9.2%	40.3%	8.6%	33-50	29.6%	49.4%	20.9%	0.0%
242	0.9%	3.1%	27.8%	68.2%	>50	61.3%	35.1%	3.7%	0.0%
243	7.9%	39.9%	36.3%	16.0%					
311	4.2%	56.6%	36.8%	2.4%					
312	1.3%	37.2%	52.9%	8.6%					
313	1.9%	39.2%	50.5%	8.3%					
321	87.8%	5.9%	5.9%	0.4%					
323	45.2%	40.2%	12.9%	1.7%					
324	53.0%	34.9%	10.5%	1.6%					
332	91.6%	6.7%	1.6%	0.1%					

5.9.2. MONTEAO Π2: Εκτίμηση πάχους εδάφους με εισόδους την κλίση και τον δείκτη NDVI.

Καθώς το Corine Land Cover δε καλύπτει ολόκληρο τον κόσμο, αλλά μόνο την Ευρώπη και κάποιες άλλες παρα-Μεσογειακές περιοχές το προηγούμενο μοντέλο δεν έχει παγκόσμια εφαρμογή. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε ως δευτερη είσοδο του ασαφούς συστήματος τον δείκτη NDVI, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί ευκολα σε παγκόσμιο επίπεδο. Με μικρές τροποποιήσεις στον κώδικα υπολογισμού του συστήματος ασαφούς λογικής (στην agrpy) λαμβάνουμε το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το αναμενόμενο πάχος του εδάφους, το οποίο σε γενικές γραμμές. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ασαφούς λογικής στην υλοποίηση μας παραμένουν αμετάβλητα ((Σχήμα 5-29), απλώς ως είσοδο για τη βλάστηση χρησιμοποιούμε τον NDVI. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μοντέλου Π-2 φαίνεται στο Σχήμα 5-31, ενώ για την οπτικοποίηση του αποτελέσματος χρησιμοποιούνται 4 κύριες ομάδες και 12 υπό-ομάδες (όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5.9.1)

Συγκρίνοντας το εκτιμώμενο πάχος του εδάφους των δυο μοντέλων (Π-1 και Π-2) παρατηρούμε ότι η γενικότερη εικόνα της περιοχής παραμένει παρόμοια. Το όρος Κερκετέας έχει μηδενικά πάχη εδάφους, στη νότια πλευρά του, οι πεδινές περιοχές χαρακτηρίζονται από καλά σχηματισμένο έδαφος μεγάλου πάχους, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές έχουν ενδιάμεσες τιμές. Το 20.2% της Σάμου αναμένεται να έχει μηδενικό πάχος εδάφους, το 38.6% και το 30.4% να έχουν μικρό ή μεσαίο πάχος αντίστοιχα, ενώ μόλις το 10.7% αναμένεται να έχει μεγάλο πάχος εδάφους. Με τη χρήση του NDVI φαίνεται ότι ενισχύονται οι ενδιάμεσες τιμές σε όλη την περιοχή μελέτης και μειώνονται οι περιοχές που θεωρούμε ως απογυμνωμένες, αλλά οι διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με το μοντέλο Π-1. Και τα δύο μοντέλα μπορούν να δώσουν καλά αποτελέσματα, όπως θα δούμε στην επόμενη υποενότητα και η χρήση του ενός ή του άλλου έγγειτε στη διαθεσιμότητα των δεδομένων αλλά και την χωρική ανάλυση της μελέτης. Το μοντέλο Π-2 πλεονεκτεί καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε παγκόσμιο επίπεδο, με μικρές τροποποιήσεις στους ασαφούς λογικούς κανόνες, ενώ το μοντέλο Π-1 απαιτεί μεγαλύτερες αλλαγές, και παρεμβάσεις από το χρήστη στη φάση της κρυφής βαθμονόμησης του μοντέλου, για να λειτουργήσει σε άλλες περιοχές μελέτης.



Σχήμα 5-31: Εκτιμώμενο βάθος του εδάφους στο νησί της Σάμου, μετά την εφαρμογή αυτοματοποιημένου συστήματος ασαφούς λογικής (Μοντέλο Π-2), χρησιμοποιώντας τον δείκτη NDVI ως είσοδο για την αναγνώριση των χρήσεων γης.

5.9.3 Σύγκριση των δυο περιπτώσεων

Μετά από εργασίες πεδίου δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει 50 σημεία ελέγχου για τα οποία γνωρίζουμε το πάχος του εδάφους. Για κάθε σημείο ελέγχου υπολογίστηκε, μέσω Γ.Σ.Π το εκτιμώμενο πάχος του εδάφους, για τα δυο ασαφή συστήματα (Π-1 και Π-2). Ο πίνακας σύγχυσης ο οποίος συγκρίνει την εκτιμώμενη κλάση του μοντέλου σε σχέση με τη πραγματική παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-10.

Για την πρώτη περίπτωση (εφαρμογή του μοντέλου με είσοδο την κλίση και τα δεδομένα από το CORINE) διαπιστώνουμε ότι η ακρίβεια εκτίμησης είναι καλή ειδικά για τα μεσαία και χαμηλά πάχη εδάφους. Για τα υψηλά πάχη εδάφους η απόδοση του μοντέλου φαίνεται να είναι μέτρια, αλλά αν δούμε πιο προσεκτικά τα δεδομένα ελέγχου, για τις περιπτώσεις αστοχίας βλέπουμε ότι στην πραγματικότητα πρόκειται για περιπτώσεις που είναι μεταβατικές ανάμεσα σε μεσαίο πάχος εδάφους και υψηλό πάχος εδάφους.

Στη δευτερη περίπτωση (χρήση του NDVI για την εκτίμηση του παράγοντας βλάστησης) βλέπουμε ότι έχουμε λίγο καλύτερη εκτίμηση για τις υψηλές τιμές, αλλά το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά της μεσαίες τιμές. Και σε αυτή την περίπτωση όμως οι πραγματικές διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες και οφείλονται σε μεταβατικές περιπτώσεις.

Προβλεπόμενη (Predicted Class)	Περίπτωση A				Περίπτωση B				
	Πραγματική (Actual Class)				Πραγματική (Actual Class)				
	H	M	L	VL	H	M	L	VL	
H	8	3	1	0	H	8	3	1	0
M	1	16	4	0	M	1	16	4	0
L	0	2	9	1	L	0	2	9	1
VL	0	0	0	6	VL	0	0	0	6

Πίνακας 5-10: Πίνακας Σύγχυσης (Confusion Matrix) για δυο περιπτώσεις εφαρμογής του μοντέλου με διαφορετική είσοδο για τις χρήσεις γης: A. Μοντέλο Π-1, B. Μοντέλο Π-2.

Με βάση τον πίνακα σύγχυσης και με τη χρήση της υπολογίζουμε κάποια βασικά μέτρα εκτίμησης της απόδοσης των δυο μοντέλων (Πίνακας 5-11), για τα οποία μια γενική περιγραφή έχει δοθεί στη Μεθοδολογία, στην ενότητα 4.6.2.

	Class=H	Class=M	Class=L	Class=VL
Precision	0.66 [0.75] *	0.76 [0.57] *	0.75 [0.67] *	1.0 [1.0] *
Recall	0.88 [1.0] *	0.76 [0.44] *	0.64 [0.71] *	0.86 [0.86] *
F1	0.76 [0.85] *	0.76 [0.53] *	0.69 [0.63] *	0.92 [0.92] *
ErrorRate	0.34 [0.25] *	0.24 [0.43] *	0.25 [0.33] *	0 [0] *
Accuracy	0.76 -pvalue: 3.2×10^{-7}		[0.68- pvalue: 1.3×10^{-6}]*	

Πίνακας 5-11: Μέτρα εκτίμησης των δυο εφαρμογών του μοντέλου ασαφούς λογικής.

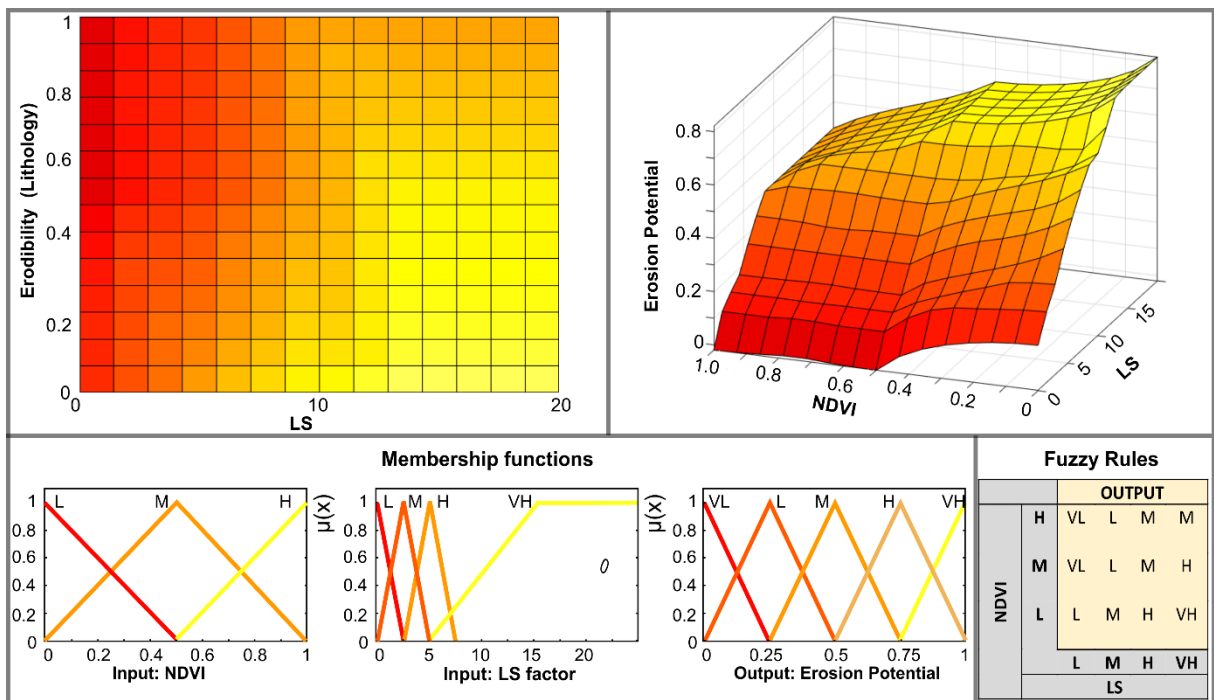
*Εκτίμηση για το Μοντέλο Π-2

Διαπιστώνουμε ότι κατά μέσο όρο εκτιμάται σωστά το 76% των σημείων στη περίπτωση του μοντέλου Π-1 και 68% στη περίπτωση του Π-2, το μοντέλο Π-1 φαίνεται να πλεονεκτεί στον υπολογισμό των μεσαίων τιμών πάχους εδάφους ενώ το Π-2 στον υπολογισμό των υψηλών και χαμηλών τιμών πάχους εδάφους. Το ποσοστό σφάλματος κυμαίνεται από 0 έως και 43%, ανάλογα με τη κλάση και το μοντέλο.

5.10 Εκτίμηση διάβρωσης του εδάφους μέσω μοντέλων ασαφούς λογικής

5.10.1 MONTEΛΟ Δ1: Ασαφές μοντέλο δυο μεταβλητών (LS factor & NDVI)

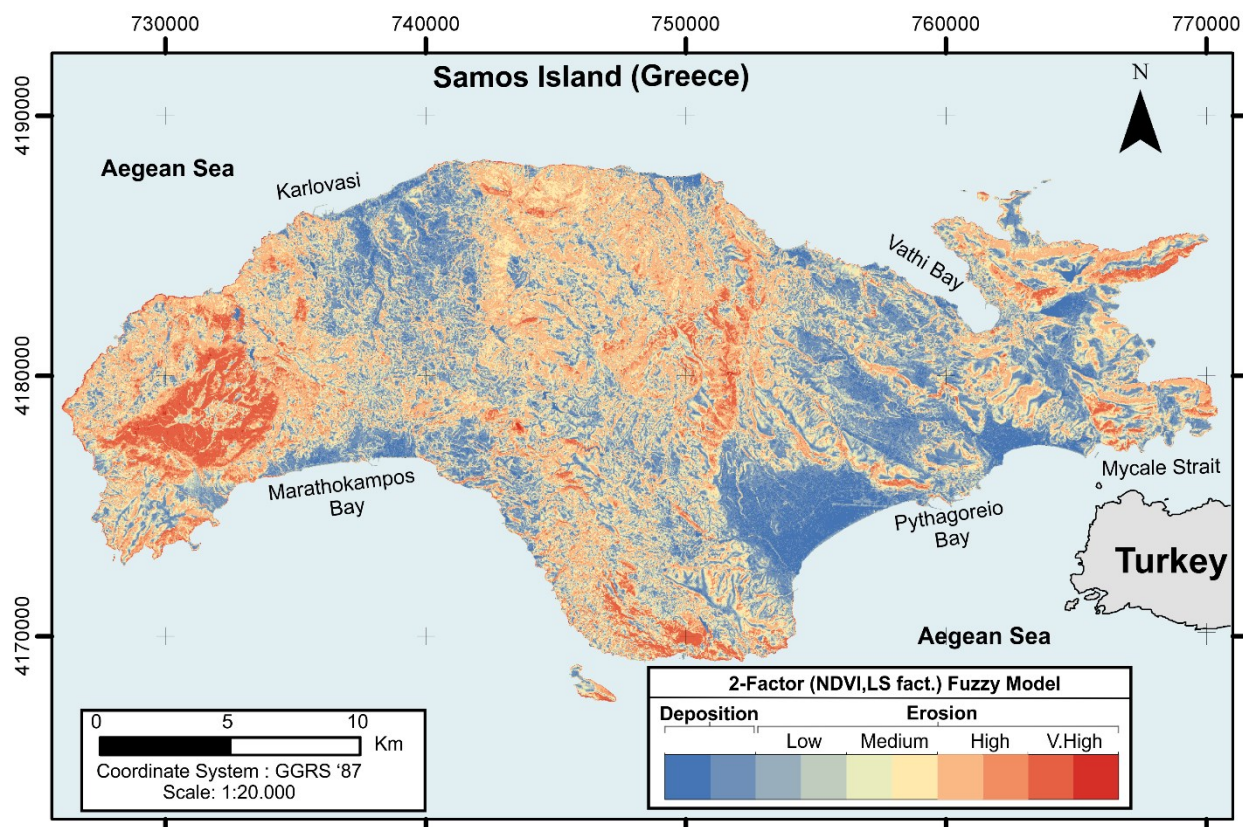
Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.6.3 και χρησιμοποιώντας ως είσοδους το παράγοντα LS (κλίση και μήκος κλίσης) και τον δείκτη NDVI, ως δείκτη βλάστησης δημιουργούμε ένα Σύστημα Ασαφούς Συμπερασματολογίας (FIS) τύπου Mamdani. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των δύο εισόδων και της εξόδου, καθώς και οι ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-32. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (τελεστής AND: min., συνεπαγωγή : prod., συνάθροιση κανόνων : max., αποασαφοποίηση: COA) για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα [0,1] το οποίο παρουσιάζεται μέσω διαγράμματος επιφάνειας εξόδου (2-D και 3-D) στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5-32: Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου Δ1 (συναρτήσεις συμμετοχής, ασαφείς λογικοί κανόνες) για την εκτίμηση της διάβρωσης στην περιοχή μελέτης, καθώς και διάγραμμα επιφάνειας εξόδου του συστήματος για το συνδυασμό των δυο εισόδων.

Η έξοδος του ασαφούς συστήματος αντιπροσωπεύει το δυναμικό διάβρωσης της περιοχής με τις μεγάλες τιμές να εμφανίζονται συνήθως όπου το μητρικό πέτρωμα αποκαλύπτεται ενώ χαμηλές τιμές εμφανίζονται σε ζώνες απόθεσης. Μέσω Γ.Σ.Π οπτικοποιούμε το αποτέλεσμα (Σχήμα 5-33), στο οποίο οι συνεχείς τιμές που προέκυψαν από το ασαφές σύστημα, χωρίζονται

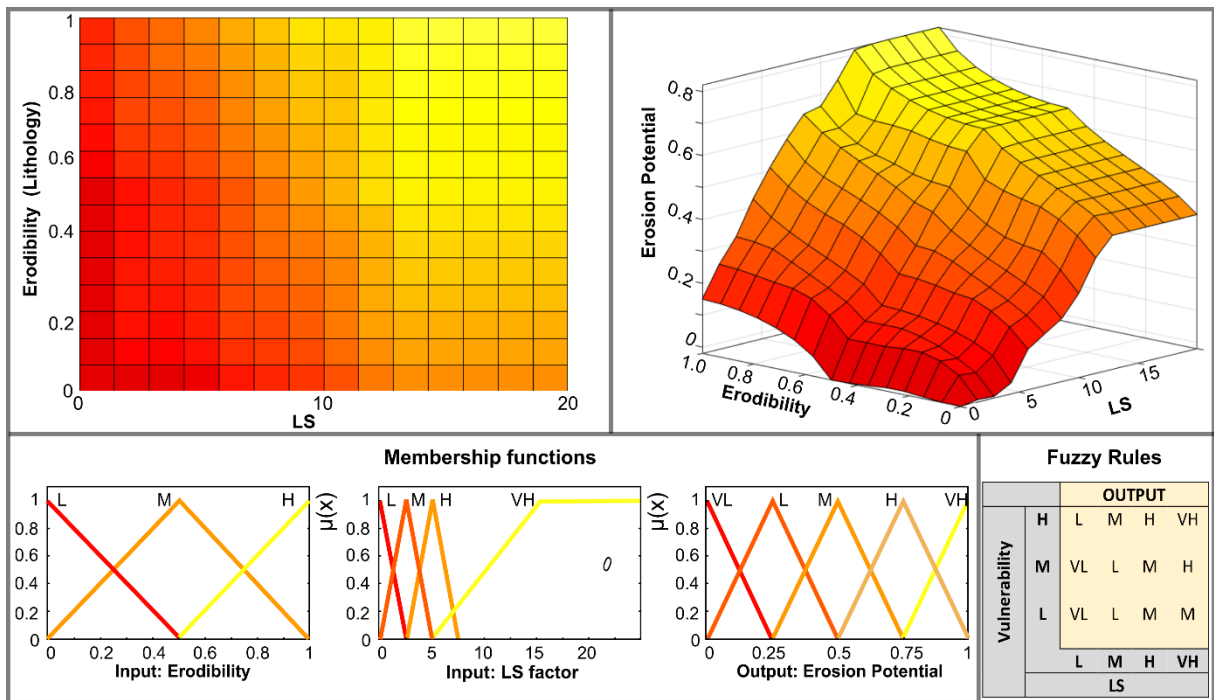
σε 5 κύριες ομάδες και 10 υπο-ομάδες για την καλύτερη οπτικοποίηση του αποτελέσματος. Για τα όρια των 5 ομάδων χρησιμοποιούνται τα όρια των συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου, και πιο συγκεκριμένα τα εύρη για τα οποία μια ομάδα επικρατεί (π.χ. οι τιμές εξόδου του FIS έως 0.13 είναι κατά κύριο λόγο V.Low και αντιστοιχούν στην ομάδα 'απόθεση' του σχήματος 5-33.).



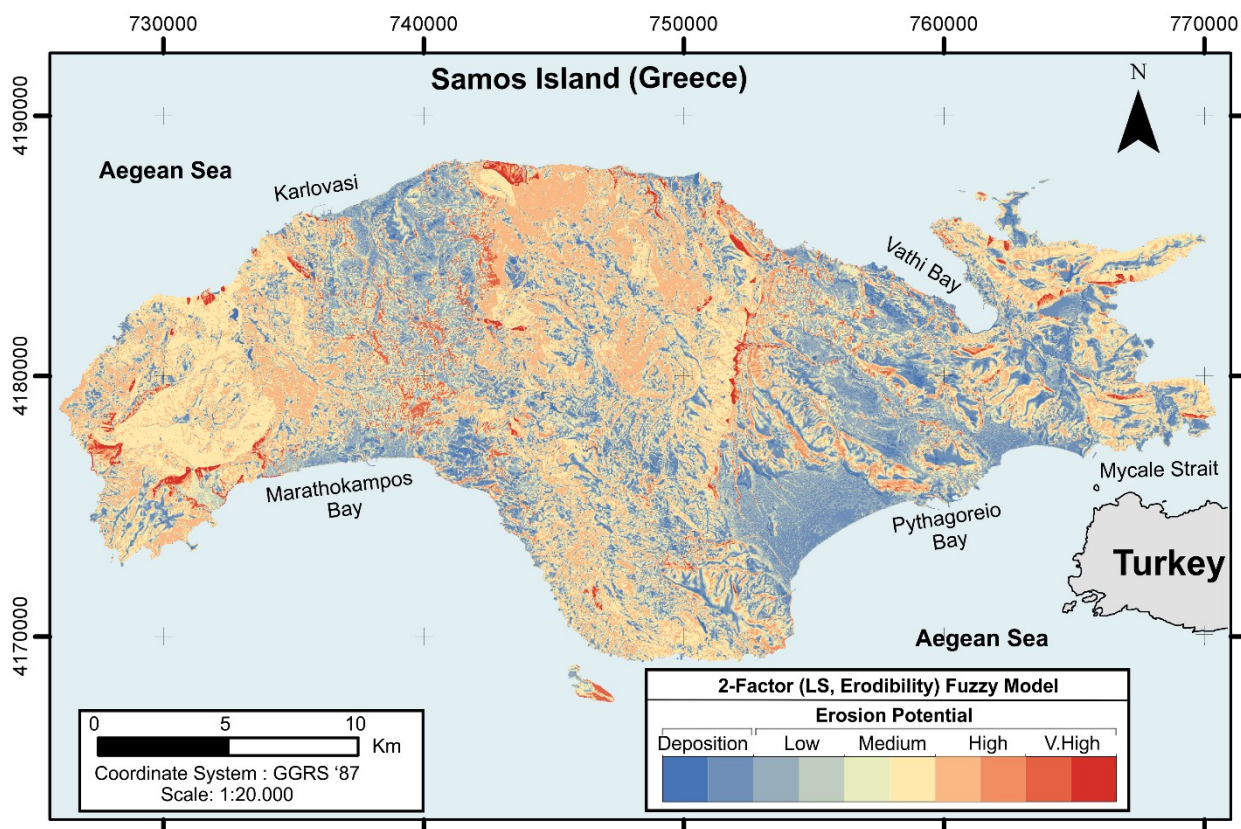
Σχήμα 5-33: Το δυναμικό της διάβρωσης για την περιοχή της Σάμου, μετά την εφαρμογή συστήματος ασαφούς λογικής (Μοντέλο Δ-1).

5.10.2 MONTEΛΟ Δ2: Ασαφές μοντέλο δυο μεταβλητών (LS factor & Erodibility)

Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.6.3 και χρησιμοποιώντας ως εισόδους το παράγοντα LS (κλίση και μήκος κλίσης) και την λιθολογία, ως δείκτη διαβρωσιμότητας δημιουργούμε ένα Σύστημα Ασαφούς Συμπερασματολογίας (FIS) τύπου Mamdami. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των δύο εισόδων και της εξόδου, καθώς και οι ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-34. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (τελεστής AND: min., συνεπαγωγή : prod., συνάθροιση κανόνων : max., αποασαφοποίηση: COA) για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα [0,1] το οποίο παρουσιάζεται μέσω διαγράμματος επιφάνειας εξόδου (2-D και 3-D) στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5-34: Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου Δ2 (συναρτήσεις συμμετοχής, ασαφείς λογικοί κανόνες) για την εκτίμηση της διάβρωσης στην περιοχή μελέτης, καθώς και διάγραμμα επιφάνειας εξόδου του συστήματος για το συνδυασμό των δυο εισόδων.

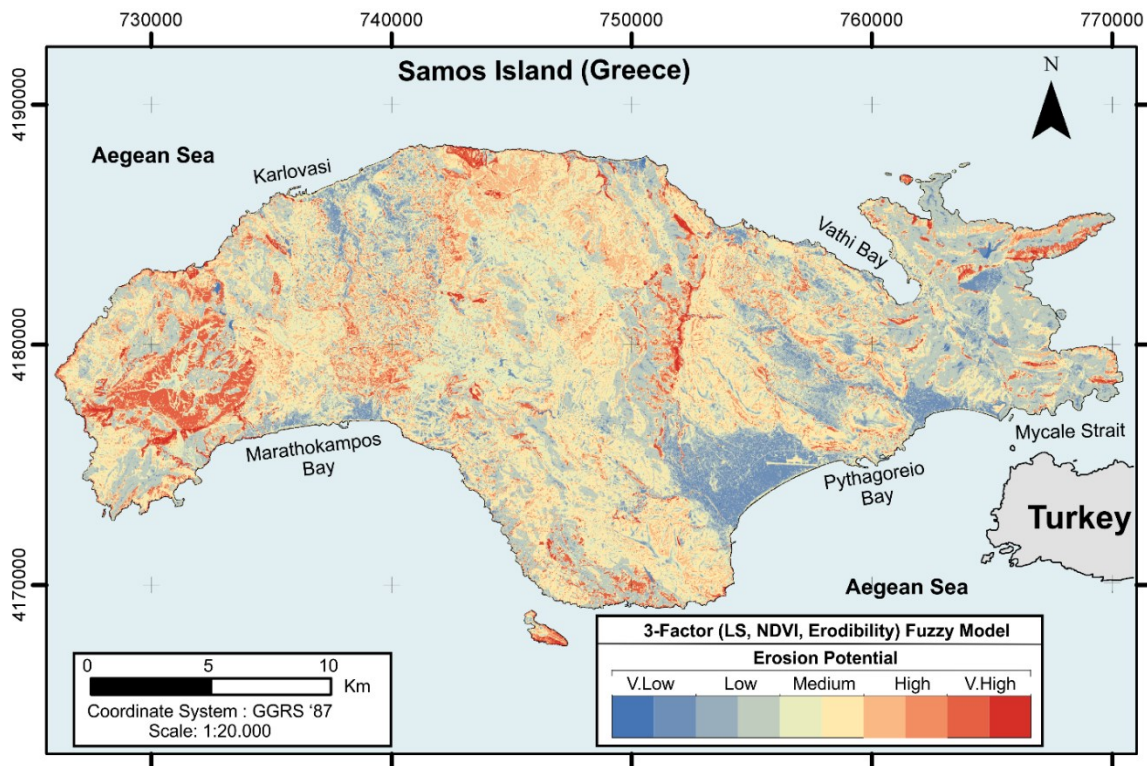


Σχήμα 5-35: Το δυναμικό της διάβρωσης για την περιοχή της Σάμου, μετά την εφαρμογή συστήματος ασαφούς λογικής (Μοντέλο Δ-2).

Η έξοδος του ασαφούς συστήματος αντιπροσωπεύει το δυναμικό διάβρωσης της περιοχής με τις μεγάλες τιμές να εμφανίζονται συνήθως όπου το μητρικό πέτρωμα αποκαλύπτεται ενώ χαμηλές τιμές εμφανίζονται σε ζώνες απόθεσης. Μέσω Γ.Σ.Π οπτικοποιούμε το αποτέλεσμα (Σχήμα 5-35), στο οποίο οι συνεχείς τιμές που προέκυψαν από το ασαφές σύστημα, χωρίζονται σε 5 κύριες ομάδες και 10 υπο-ομάδες για την καλύτερη οπτικοποίηση του αποτελέσματος. Για τα όρια των 5 ομάδων χρησιμοποιούνται τα όρια των συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου, και πιο συγκεκριμένα τα εύρη για τα οποία μια ομάδα επικρατεί. Παρατηρούμε ότι μεγάλο μέρος της περιοχής μελέτης εκτιμάτε να έχει μεσαίο δυναμικό διάβρωσης, ενώ απόθεση ή πολύ έντονη διάβρωση εμφανίζεται σε πολύ μικρές εκτάσεις του νησιού.

5.10.3 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ3: Ασαφές μοντέλο τριών μεταβλητών (LS, NDVI, Erodibility)

Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.6.3 και χρησιμοποιώντας ως εισόδους το παράγοντα LS (κλίση και μήκος κλίσης), το δείκτη βλάστησης NDVI και την λιθολογία, ως δείκτη διαβρωσιμότητας δημιουργούμε ένα Σύστημα Ασαφούς Συμπερασματολογίας (FIS) τύπου Mamdami με 3 εισόδους. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των τριών εισόδων και της εξόδου είναι παρόμοιοι με αυτούς που περιγράφηκαν στις προηγούμενες 2 υποενότητες (Σχήματα 5-32, 5-34). Οι 27 ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Πίνακα 5-12. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα $[0,1]$, η οποία οπτικοποιείται σε περιβάλλον Γ.Σ.Π (Σχήμα 5-36), με παρόμοια λογική όπως στις προηγούμενες υποενότητες. Παρατηρούμε ότι οι μεσαίες τιμές επικρατούν, ενώ μεγάλο δυναμικό διάβρωσης εμφανίζεται στον Κερκετέα και χαμηλό στις νεογενείς λεκάνες.



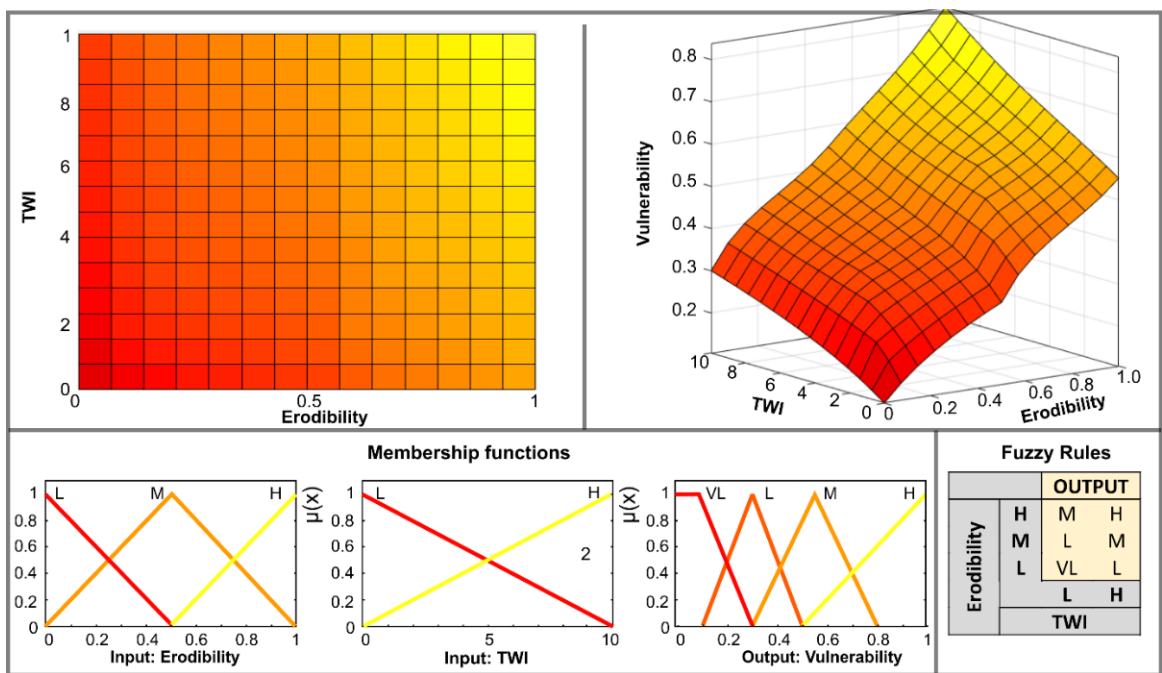
Σχήμα 5-36: Το δυναμικό της διάβρωσης για την περιοχή της Σάμου, μετά την εφαρμογή συστήματος ασαφούς λογικής (Μοντέλο Δ-3).

Πίνακας 5-12: Οι ασαφείς λογικοί κανόνες για το μοντέλο Δ3 (3 παραγόντων)

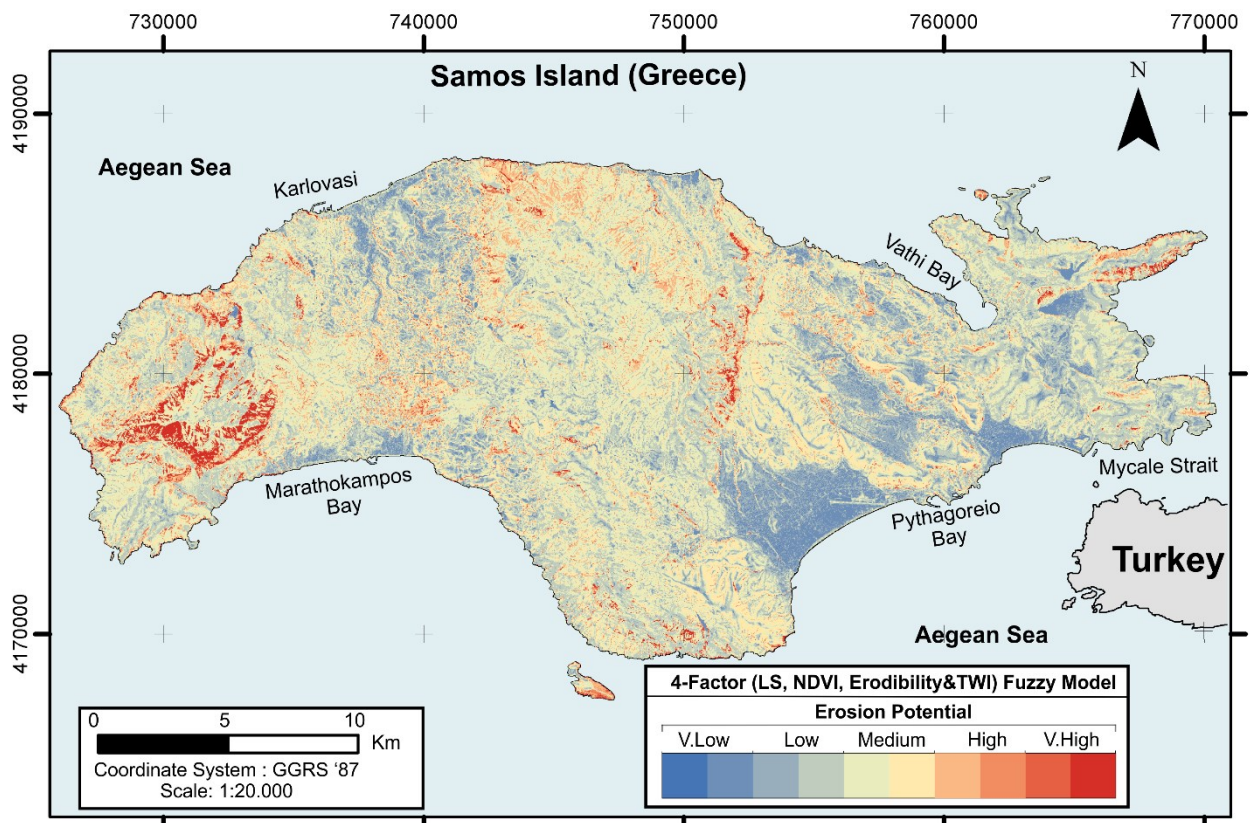
LS FACTOR	LITHOLOGY	NDVI	OUTPUT
IF LS FACTOR IS LOW AND	ERODIBILITY IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS LOW
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS V.LOW
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS V.LOW
	ERODIBILITY IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS LOW
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS LOW
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS V.LOW
	ERODIBILITY IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS MODERATE
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS LOW
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS V.LOW
IF LS FACTOR IS MEDIUM AND	ERODIBILITY IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS MODERATE
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS LOW
	ERODIBILITY IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS MODERATE
	ERODIBILITY IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS V.HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS HIGH
IF LS FACTOR IS HIGH AND	ERODIBILITY IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS MODERATE
	ERODIBILITY IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS V.HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS HIGH
	ERODIBILITY IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	EROSION IS V.HIGH
		NDVI IS MEDIUM THEN	EROSION IS V.HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	EROSION IS HIGH

5.10.4 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ4: Ασαφές μοντέλο τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον TWI.

Επεκτείνουμε το προηγούμενο μοντέλο προσθέτοντας ακόμα έναν παράγοντα ο οποίος είναι ενδεικτικός των υδρολογικών συνθηκών στη περιοχή αλλά και της προυπάρχουσας υγρασίας (TWI). Αρχικά συνδυάζουμε τη λιθολογία με τον δείκτη TWI μέσω ενός ασαφούς μοντέλου 2 παραγόντων, δημιουργώντας έναν **παράγοντα τρωτότητας** και έπειτα χρησιμοποιούμε το μοντέλο 3 για να παράξουμε το τελικό αποτέλεσμα. Για το ενδιάμεσο αυτό μοντέλο παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής των δύο εισόδων και της εξόδου, καθώς και οι ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-37. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (τελεστής AND: min., συνεπαγωγή : prod., συνάθροιση κανόνων : max., αποασαφοποίηση: COA) για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα [0,1] το οποίο παρουσιάζεται μέσω διαγράμματος επιφάνειας εξόδου (2-D και 3-D) στο σχήμα που ακολουθεί. Μετά τον εκτέλεση του ενδιάμεσου υπολογισμού εφαρμόζουμε το μοντέλο Δ3 χρησιμοποιώντας ως εισόδους τους δείκτες LS, NDVI καθώς και τη νέα τρωτότητα η οποία προέκυψε μέσω του συνδυασμού της λιθολογίας και του TWI.



Σχήμα 5-37: Ενδιάμεσος υπολογισμός της τρωτότητας από τα λιθολογικά χαρακτηριστικά και τον δείκτη TWI

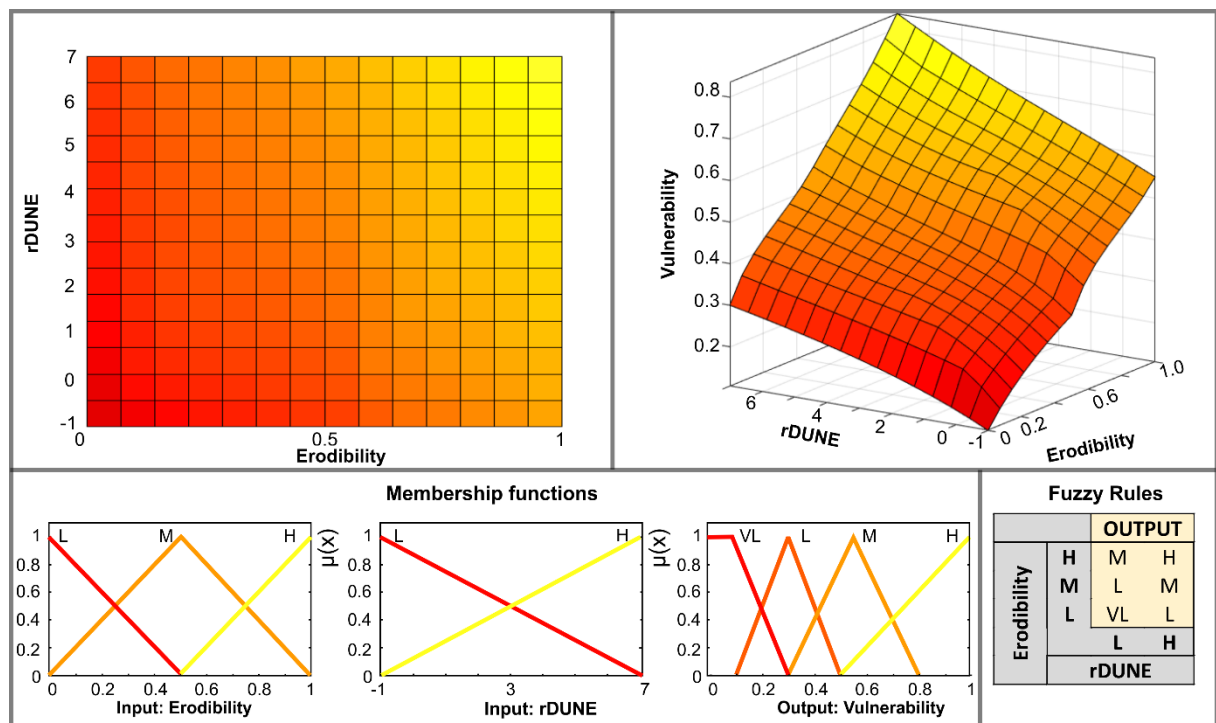


Σχήμα 5-38: Εφαρμογή μοντέλου ασαφούς λογικής 4 παραγόντων για την περιοχή της Σάμου. Ο χάρτη προέκυψε αφού πρώτα υπολογίστηκε η τρωτότητα (ενδιάμεσο βήμα) και έπειτα εφαρμόστηκε ένα μοντέλο τριών μεταβλητών.

Το τελικό αποτέλεσμα οπτικοποιείται μέσω Γ.Σ.Π. (Σχήμα 5-38), χρησιμοποιώντας, κατά τα γνωστά, 5 κύριες ομάδες και 10 υποομάδες. Παρατηρούμε ότι οι υψηλές τιμές του δυναμικού διάβρωσης εντείνονται σε κάποια σημεία του Κερκετέα ενώ ελαττώνονται σε κάποια άλλα σημεία (ιδίως της Άμπελου). Οι ενδιάμεσες τιμές φαίνεται να επικρατούν, ενώ χαμηλές τιμές εμφανίζονται κυρίως στις νεογενείς λεκάνες.

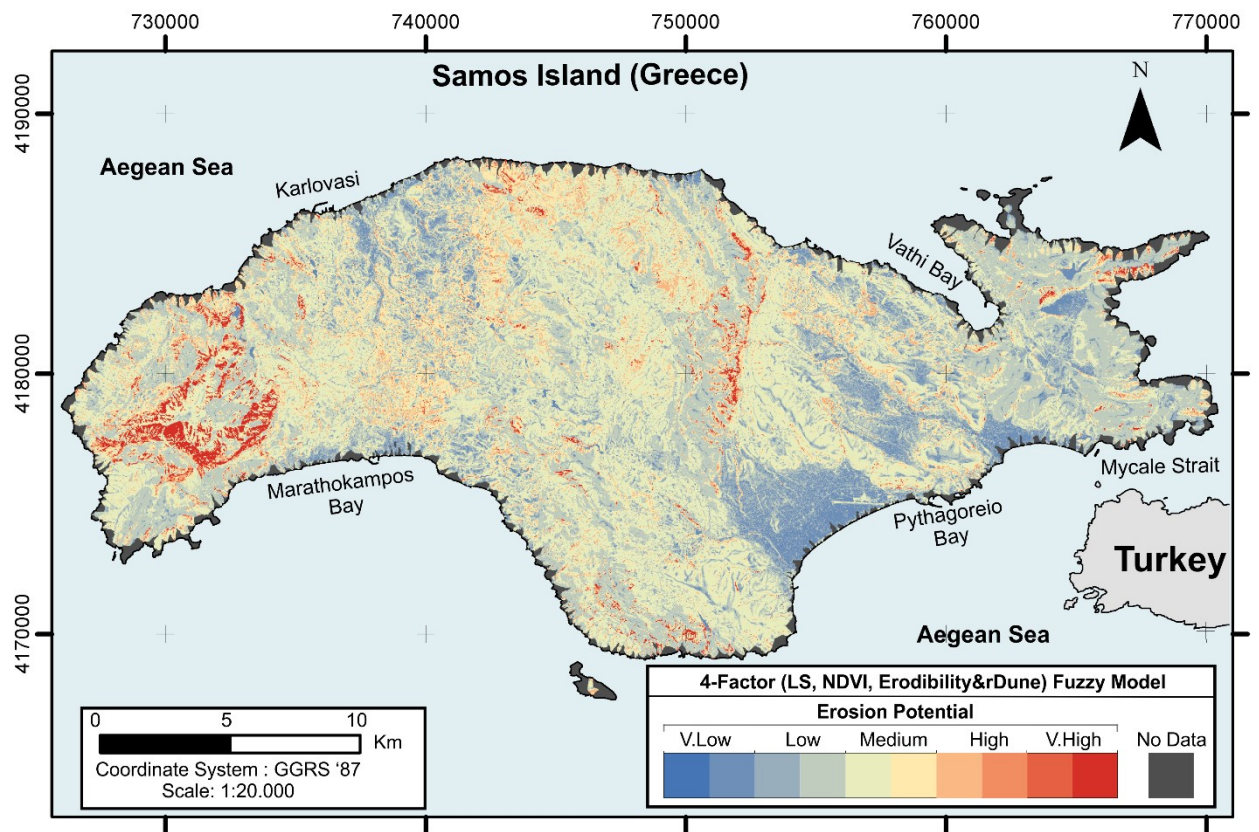
5.10.5 ΜΟΝΤΕΛΟ Δ5: Ασαφές μοντέλο τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον rDUNE.

Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς μεθοδολογία όπως και για το μοντέλο Δ4, κατασκευάζουμε το μοντέλο Δ5. Η μόνη τους διαφορά βρίσκεται στη χρήση του δείκτη rDUNE αντί για του TWI. Μέσω ενός ενδιάμεσου ασαφούς συστήματος (Σχήμα 5-39) υπολογίζεται μια νέα τρωτότητα η οποία εισάγεται στο ασαφές σύστημα Δ3 για την εκτίμηση του δυναμικού της διάβρωσης για την περιοχή μελέτης



Σχήμα 5-39: Ενδιάμεσος υπολογισμός της τρωτότητας από τα λιθολογικά χαρακτηριστικά και τον δείκτη rDUNE

Το τελικό αποτέλεσμα οπτικοποιείται μέσω Γ.Σ.Π. (Σχήμα 5-40), χρησιμοποιώντας, κατά τα γνωστά, 5 κύριες ομάδες και 10 υποομάδες. Παρατηρούμε ότι οι υψηλές τιμές του δυναμικού διάβρωσης εντείνονται σε κάποια σημεία του Κερκετέα ενώ ελαττώνονται σε κάποια άλλα σημεία (ιδίως της Άμπελου). Οι ενδιάμεσες τιμές φαίνεται να επικρατούν, ενώ χαμηλές τιμές εμφανίζονται κυρίως στις νεογενείς λεκάνες. Το μοντέλο Δ5 φαίνεται να πλεονεκτεί σε σχέση με το Δ4 αλλά και με τα άλλα μοντέλα, καθώς διαχωρίζει καλύτερα τις μεσαίες τιμές, ενώ οι μεγάλες τιμές αλλά και οι χαμηλές τιμές φαίνεται να διαχωρίζονται καλύτερα μεταξύ τους.

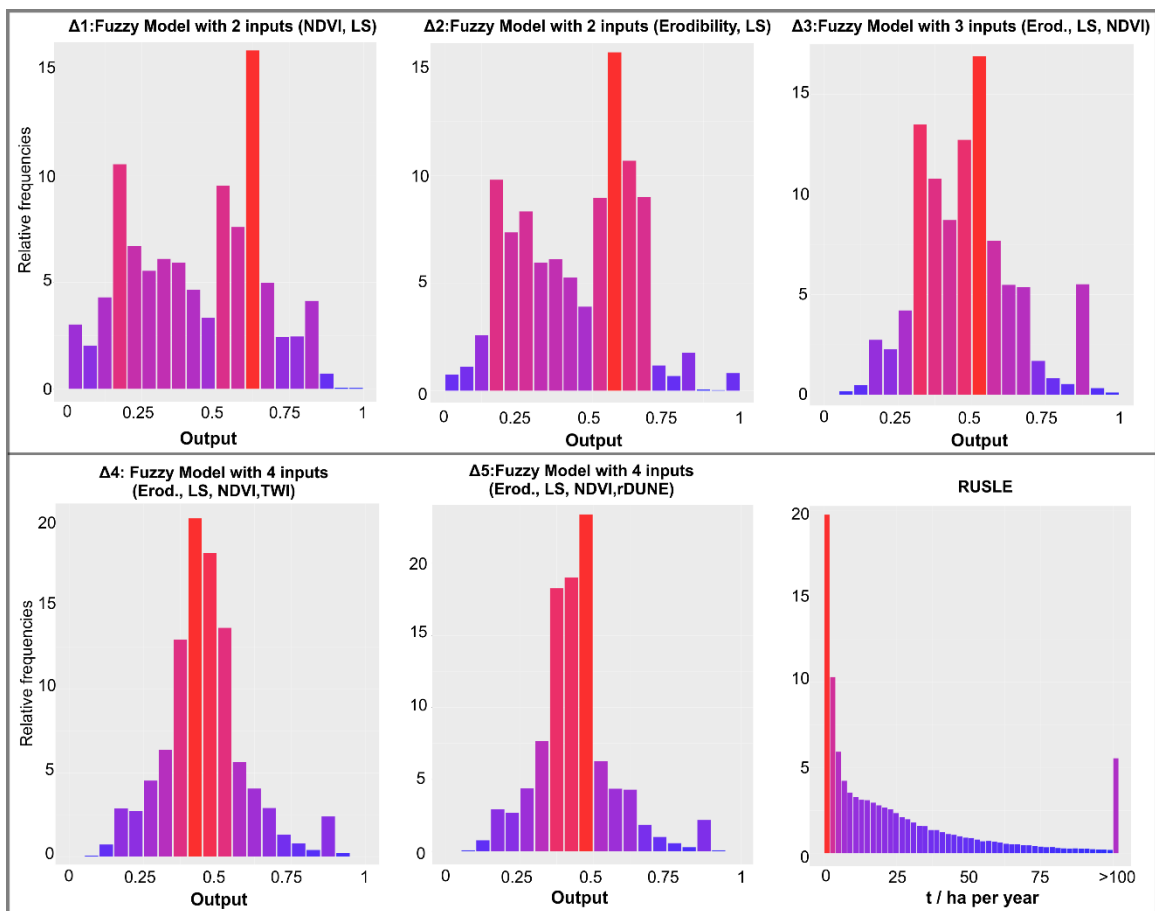


Σχήμα 5-40: Εφαρμογή μοντέλου ασαφούς λογικής 4 παραγόντων για την περιοχή της Σάμου. Ο χάρτη προέκυψε αφού πρώτα υπολογίστηκε η τρωτότητα (ενδιάμεσο βήμα) και έπειτα εφαρμόστηκε ένα μοντέλο τριών μεταβλητών.

5.11. Συγκριση μοντέλων ασαφούς λογικής και μοντέλου RUSLE

5.11.1 Ιστογράμματα

Καθώς έχουμε υπολογίσει το εκτιμώμενο ποσό διάβρωσης για κάθε σημείο της Σάμου για όλα τα μοντέλα ασαφούς λογικής αλλά και το μοντέλο RUSLE σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., μπορούμε να κάνουμε διάφορες συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα για να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά υπολογίζουμε μέσω της «R Programming Language» ιστογράμματα για τα πέντε μοντέλα ασαφούς λογικής και το μοντέλο RUSLE. Επιλέγεται η R καθώς είναι ευκολη στο χειρισμό και μπορεί να δουλέψει αποδοτικά για τη στατιστική ανάλυση ψηφιδωτών δεδομένων μέσω των βιβλιοθηκών “raster”, “rgdal” και “ggplot”. Χρησιμοποιούνται 20 κλάσσεις για τα πέντε πρώτα ιστογράμματα (τα οποία έχουν τιμές στο διάστημα [0,1] και 50 κλάσσεις για το ιστογράμμα του μοντέλου RUSLE (για το οποίο τιμές πάνω από 100 εμφανίζονται ως μια ομάδα).



Σχήμα 5-41: Ιστογραμματα της κατανομής των τιμών εξόδου για τα έξι διαφορετικά μοντέλα εκτίμησης διάβρωσης τα οποία δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

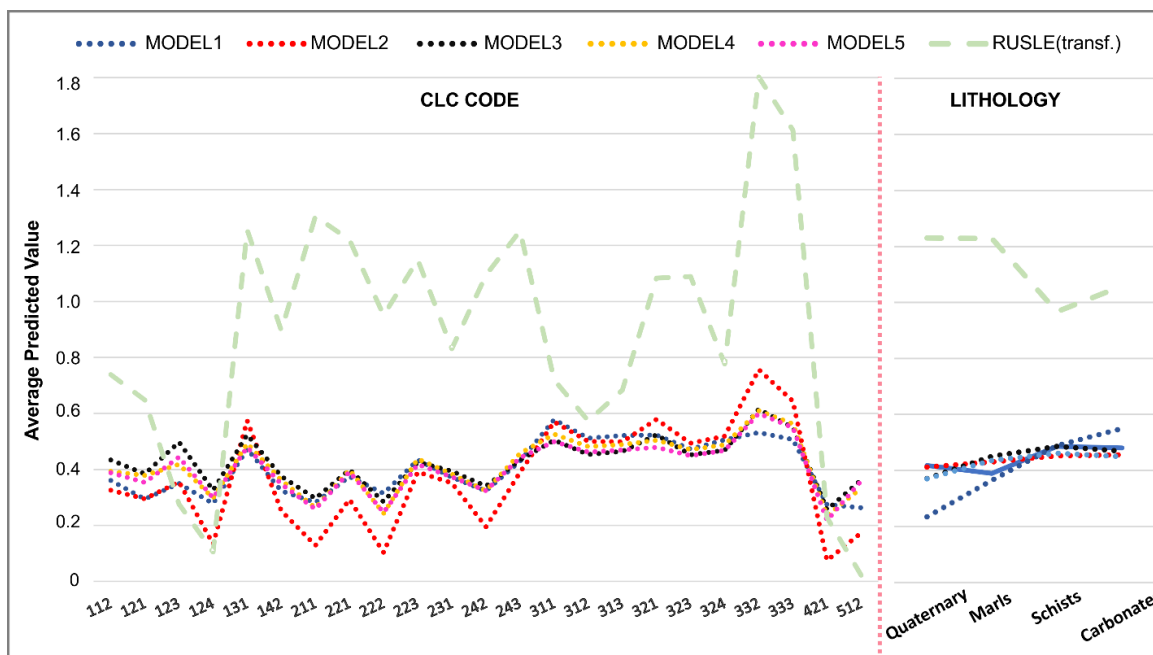
5.11.2 Κατανομή μέσων τιμών για κάθε τύπο χρήσεων γης και λιθολογίας

Η έξοδος (δυναμικό διάβρωσης) των ασαφών συστημάτων μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον αριθμό αλλά και το είδος των εισόδων που εισέρχονται σε αυτά. Στα μοντέλα Δ1 και Δ (2 μεταβλητών) παρατηρούμε κατανομές με δυο κορυφές (bimodal) με μια συγκέντρωση των τιμών κοντά στο 0.2 και το 0.6. Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο τριών μεταβλητών (Δ3) έχουμε μια μεγαλύτερη συγκέντρωση στις μεσαίες τιμές επικινδυνότητας διάβρωσης, γεγονός που έχει παρατηρηθεί και στο παρελθόν από άλλους ερευνητές (Mitra et al., 1998), τάση η οποία συνεχίζεται και για τα ασαφή μοντέλα τεσσάρων μεταβλητών (Δ4 και Δ5).

Επιπλέον υπολογίζεται η μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης, ανά χρήση γης αλλά και ανά λιθολογία, για τα 5 ασαφή μοντέλα αλλά και το RUSLE. Για να μπορούν να συγκριθούν πιο άμεσα οι τιμές μεταξύ τους και για την καλύτερη οπτικοποίηση τους εφαρμόζουμε ένα λογαριθμικό μετασχηματισμό στις εξόδους τους RUSLE, πολλαπλασιάζοντας με έναν παράγοντα κλιμάκωσης (scaling factor) δηλαδή:

$$R = \ln(RUSLE) * 0.3.$$

Βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές οι μέσες τιμές του δυναμικού διάβρωσης ανά τύπο χρήσης γης και λιθολογίας έρχονται σε συμφωνία, με μικρές διαφοροποιήσεις ιδιαίτερα για το μοντέλο RUSLE σε σχέση και με τη λιθολογία.



Σχήμα 5-42: Μέσες τιμές δυναμικού διάβρωσης των εξεταζόμενων μοντέλων για διαφορετικούς τύπους χρήσεων γης (CLC 2018) και λιθολογίας

5.11.3 Σύγκριση μέσων τιμών ανά υδρολογική λεκάνη

Καθώς η έννοια της υδρολογικής λεκάνης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον καθορισμό των υδρολογικών διεργασιών και συνεπακόλουθα και του δυναμικού διάβρωσης, πραγματοποιούμε μια σύγκριση του μέσου όρου του δυναμικού της διάβρωσης όπως προκύπτει για κάθε μεθοδολογία, σε σχέση με το μέσο όρο του RUSLE για το RUSLE ομαδοποιούνται βάση της βιβλιογραφίας (Mitra, 1998) προσαρμοσμένα όμως στα δεδομένα της περιοχής μελέτης μας και το γεγονός ότι έχουμε μια μέση τιμή για κάθε λεκάνη του νησιού. Στα μοντέλα ασαφούς λογικής χρησιμοποιούμε τρεις ομάδες τιμών (Χαμηλό, Μεσαίο, Υψηλό δυναμικό διάβρωσης) αναθέτοντας στην πρώτη ομάδα μέσες τιμές που είναι <0.3 για τη δεύτερη ομάδα τιμές μεταξύ 0.3 και 0.5 και για την τελευταία ομάδα πάνω από 0.5 (επιλέγουμε αυτά τα διαστήματα λόγω της χρήσης μέσων τιμών). Ομοίως για το RUSLE για τις τρεις ομάδες θέτουμε ως διαστήματα το 0 έως 5 , 5 έως 50 και >50 . Μέσω της R Programming Language και της βιβλιοθήκης “heuristics” υπολογίζουμε τον πίνακα σύγκρισης για κάθε περίπτωση συγκρίνοντας κάθε μοντέλο ασαφούς λογικής με την εκτίμηση του μοντέλου RUSLE.

Πίνακας 5-13: Μέτρα εκτίμησης των πέντε ασαφών συστημάτων εκτίμησης του δυναμικού της διάβρωσης και της κλασσικής μεθόδου RUSLE (για 3 ομάδες σε κάθε περίπτωση : L, M, H) εφαρμογών του μοντέλου ασαφούς λογικής.

MODEL	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5
ACCURACY	0.519	0.434	0.633	0.644	0.681
PRECISION (L-M-H)	0.39-0.81- 0.2	0.37-0.76- 0.1	0.62-0.76- 0.2	0.55-0.77- 0.19	0.51-0.79- 0.26
RECALL (L-M-H)	0.5-0.51- 0.61	0.53-0.42- 0.35	0.37-0.76- 0.47	0.31-0.78- 0.37	0.46-0.79- 0.32
F1 (L-M-H)	0.44-0.63- 0.28	0.43-0.54- 0.15	0.46-0.76- 0.29	0.39-0.77- 0.25	0.48-0.79- 0.3
ERROR RATE	0.61-0.19- 0.8	0.63-0.24- 0.9	0.38-0.24- 0.8	0.45-0.23- 0.81	0.49-0.21- 0.74

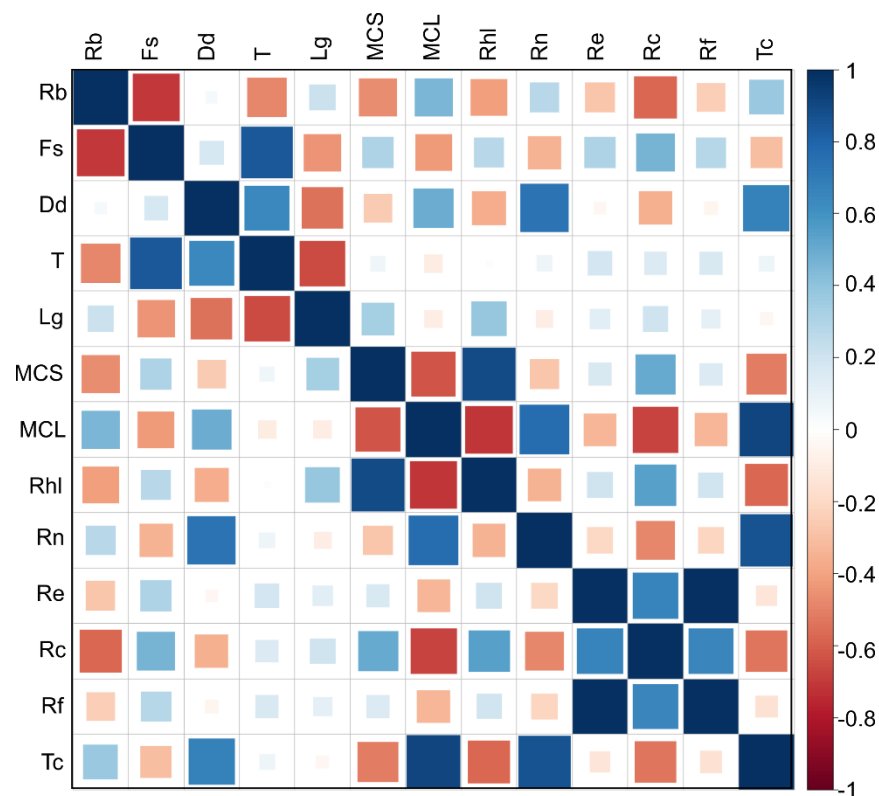
Στον πίνακα 5-13 φαίνονται οι γενικές επιδόσεις κάθε μοντέλου όσον αφορά την ακρίβεια πρόβλεψης, όταν συγκρίνουμε την εκτιμώμενη μέση τιμή ανά υδρολογική λεκάνη τη μέση τιμή που δίνει το RUSLE. Τα μοντέλα με 2 μεταβλητές φαίνεται να μη δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, ενώ τα μοντέλα με τρεις ή τέσσερις μεταβλητές εισόδου φαίνεται να είναι ισοδύναμα. Το μοντέλο τεσσάρων μεταβλητών Δ5 φαίνεται να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η ακρίβεια κατά την ταξινόμηση μιας λεκάνης ως χαμηλής, μέτριας ή υψηλής επικινδυνότητας σε διάβρωση είναι περίπου 70%, σε σύγκριση με το αποτέλεσμα που δίνει το RUSLE. Οι περισσότερες λεκάνες ταξινομούνται ως μέσης επικινδυνότητας στην περιοχή και σε αυτή την περίπτωση έχουμε πολύ καλή ακρίβεια με ποσοστό σφάλματος 20%. Οι λεκάνες χαμηλής επικινδυνότητας ταξινομούνται αρκετά καλά με ποσοστό σφάλματος λιγότερο από 50% ενώ οι λεκάνες με υψηλή επικινδυνότητα φαίνεται να μην εκτιμώνται σωστά. Παρόλαυτα η πλειοψηφία των σφαλμάτων αφορά μεταβατικές περιπτώσεις. Για το καλύτερο μοντέλο που προέκυψε (μοντέλο Δ5) παρουσιάζεται ο πίνακας σύγχυσης (Πίνακας 5-14)

Πίνακας 5-14: Πίνακας Σύγχυσης (Confusion Matrix) το βέλτιστο μοντέλο εκτίμησης της διάβρωσης Δ5

ΠΡΟΒΛΗΘΕΝΗ (PREDICTED CLASS)	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ (ACTUAL CLASS)		
	L	M	H
L	60	55	4
M	62	346	31
H	9	37	16

5.12 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου μέσω ασαφούς συστήματος

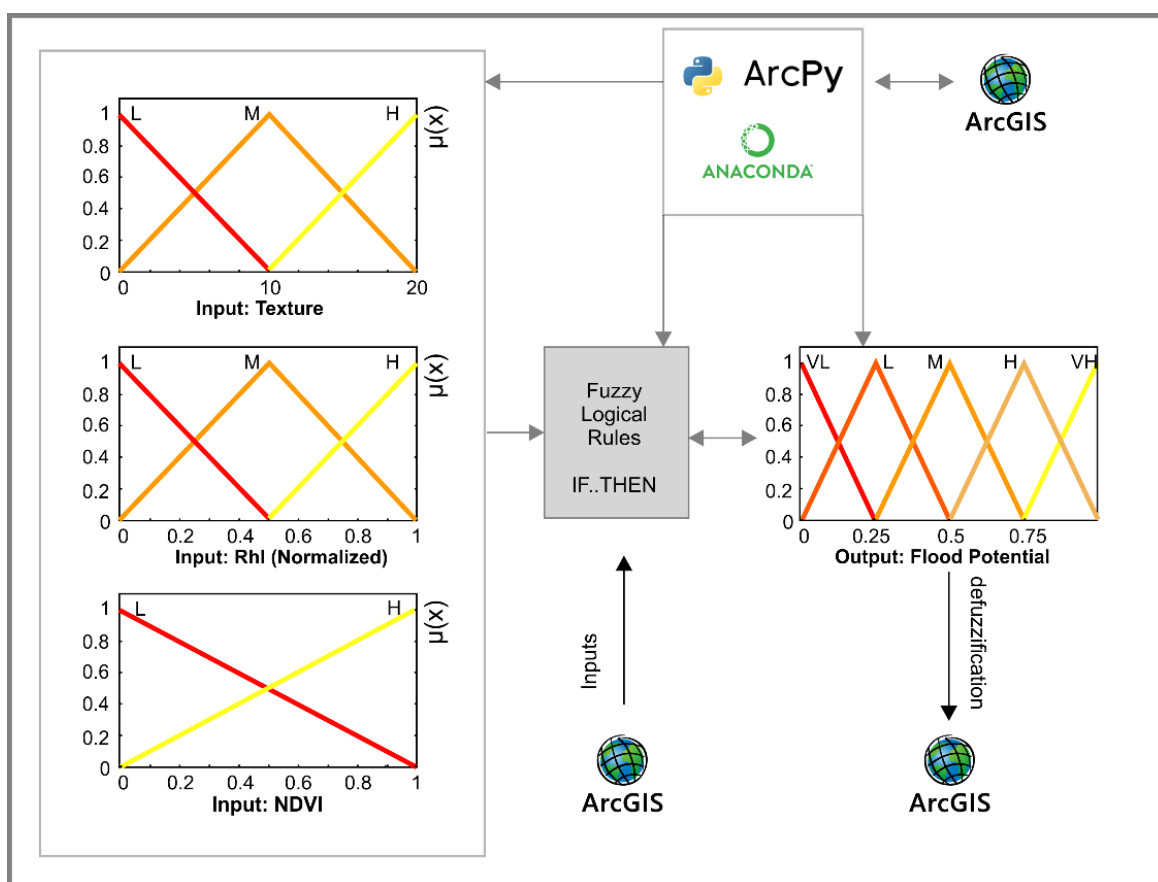
Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.6.4 και τους τοπογραφικούς δείκτες οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί στην ενότητα 5.2.1 για 4 σημαντικές υδρολογικές λεκάνες του νησιού, αρχικά κατασκευάζουμε ένα πίνακα συσχέτισης (correlation matrix) ώστε να αναγνωρίσουμε τους τοπογραφικούς δείκτες οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Ο πίνακας συσχέτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-43, από το οποίο διαπιστώνουμε ότι πολλοί τοπογραφικοί δείκτες είναι άμεσα συσχετιζόμενοι, όπως ήταν αναμενόμενο, εξαιτίας του τρόπου υπολογισμού τους.



Σχήμα 5-43: Πίνακας συσχέτισης μορφομετρικών παραμέτρων των 4 υδρολογικών λεκανών (και των υπολεκανών τους) του νησιού της Σάμου για τα οποία εκτιμάτε ο πλημμυρικός κίνδυνος.

Επιλέγουμε 2 τοπογραφικούς δείκτες οι οποίοι έχουν ελάχιστη συσχέτιση μεταξύ τους: (α) την υδρογραφική υφή (Texture), και το λόγο αναγλύφου - Relief Ratio ως κύριες συνιστώσες (principal components) και βάση αυτών κατηγοριοποιούμε τις λεκάνες ανάλογα με την ένταση αλλά και τη συνεισφορά στη συνολική απορροής ολόκληρης της λεκάνης που αναμένεται να έχουν κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Οι παραπάνω παράγοντες επιλέχθηκαν και με ένα άλλο κριτήριο, την ευκολία υπολογισμού τους κάτι που τους κάνει ιδανικούς για να χρησιμοποιηθούν

σε μεγάλο πλήθος υδρογραφικών λεκανών σε μια περιοχή μελέτης χωρίς να χρειάζονται χρονοβόροι υπολογισμοί όπως πχ στην περίπτωση του χρόνου συγκέντρωσης ή της μέσης κλίσης κυρίως καναλιού. Οι επιλεγέντες τοπογραφικοί δείκτες συνδυάζονται με το μέσο δείκτη NDVI για κάθε υπολεκάνη και εισάγονται σε ένα σύστημα ασαφούς λογικής Mamdani (για λεπτομέρειες βλέπε ενότητα 4.6.4. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των τριών εισόδων και της εξόδου, καθώς και οι ασαφείς λογικοί κανόνες οι οποίοι κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των ειδικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-44 και τον πίνακα 5-15. Με βάση αυτούς αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, τα οποία αναλύθηκαν στη Μεθοδολογία (τελεστής AND: min., συνεπαγωγή : prod., συνάθροιση κανόνων : max., αποασαφοποίηση: COA) για δεδομένες εισόδους προκύπτει μια τιμή εξόδου στο διάστημα $[0,1]$, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα ασαφή συστήματα.



Σχήμα 5-44: Το ασαφές σύστημα για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε επίπεδο υπολεκάνης

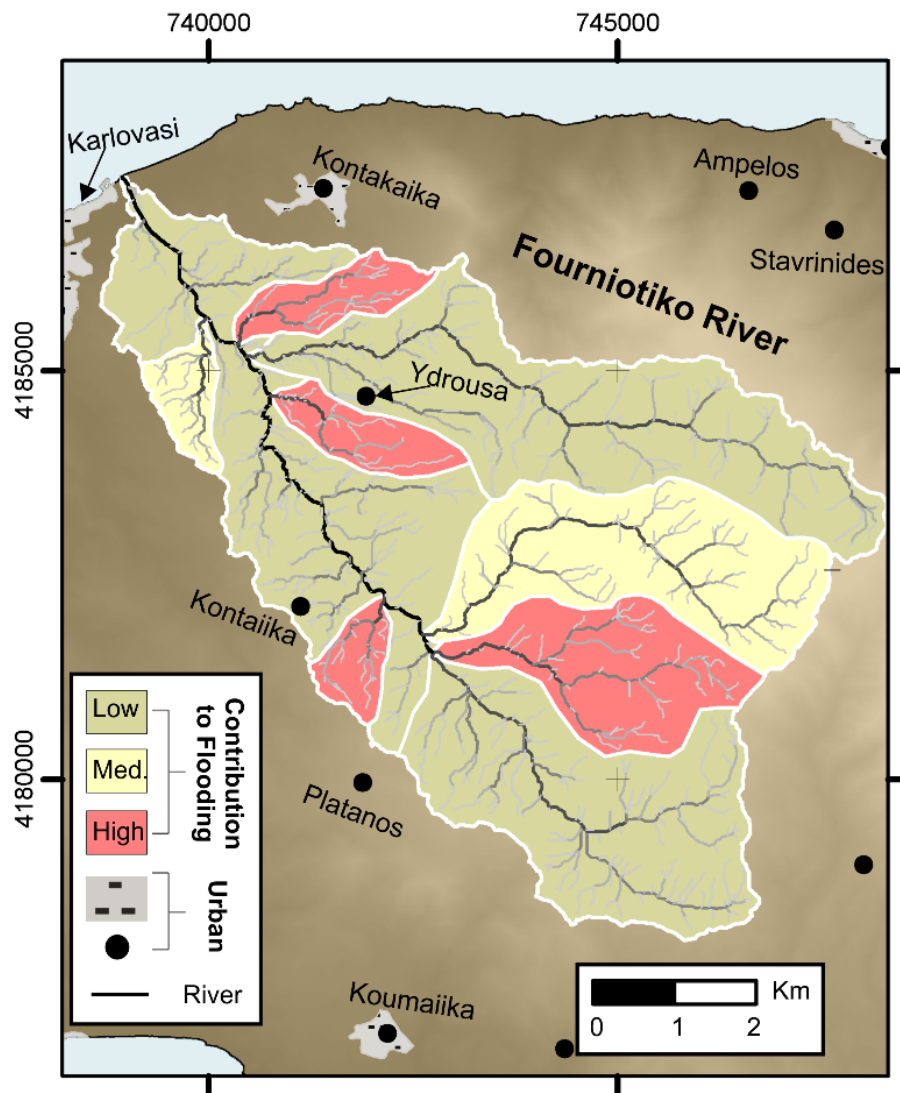
Πίνακας 5-15: Οι ασαφείς λογικοί κανόνες για το ασαφές σύστημα ΠΚ (εκτίμηση συνεισφοράς υπολεκάνης στον πλημμυρικό κίνδυνο)

TEXTURE	RELIEF RATIO (Rhl)	NDVI	OUTPUT (FLOOD POT.)
IF TEXTURE IS LOW AND	RELIEF IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS LOW
		NDVI IS HIGH THEN	POTENTIAL IS V.LOW
	RELIEF IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	POTENT. IS MODERATE
		NDVI IS HIGH THEN	POTENTIAL IS LOW
	RELIEF IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	POTENT. IS MODERATE
IF TEXTURE IS MEDIUM AND	RELIEF IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	POTENT. IS MODERATE
		NDVI IS HIGH THEN	POTEN. IS V.LOW
	RELIEF IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	POTENT. IS MODERATE
	RELIEF IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS V.HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	POTENTIAL IS HIGH
IF TEXTURE IS HIGH AND	RELIEF IS LOW AND	NDVI IS LOW THEN	POTENT. IS MODERATE
		NDVI IS HIGH THEN	POTENT. IS LOW
	RELIEF IS MEDIUM AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS V.HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	POTENTIAL IS HIGH
	RELIEF IS HIGH AND	NDVI IS LOW THEN	POTENTIAL IS V.HIGH
		NDVI IS HIGH THEN	POTENTIAL IS V.HIGH

Το τελικό αποτέλεσμα οπτικοποιείται μέσω Γ.Σ.Π. (Σχήμα 5-38), χρησιμοποιώντας τρεις κατηγορίες (low, medium, high) για την εκτίμηση του πλημμυρικού δυναμικού κάθε υπολεκάνης. Παρατηρούμε ότι οι ορεινές περιοχές με καλά σχηματισμένο δίκτυο φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο, συνεισφέροντας μεγαλύτερη παροχή νερού προς τα κατάντι σε μικρό χρονικό διάστημα. Συνήθως αυτές οι υπο-λεκάνες έχουν ‘κυκλικό σχήμα’ το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι ο χρόνος συρροής και τα άλλα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος τους αναμένεται να είναι μικρά. Για καθεμία από τις 4 λεκάνες παρουσιάζεται ξεχωριστά ο εκτιμώμενος πλημμυρικός κίνδυνος.

5.12.1 Πλημμυρικός κίνδυνος Φουρνιώτικου

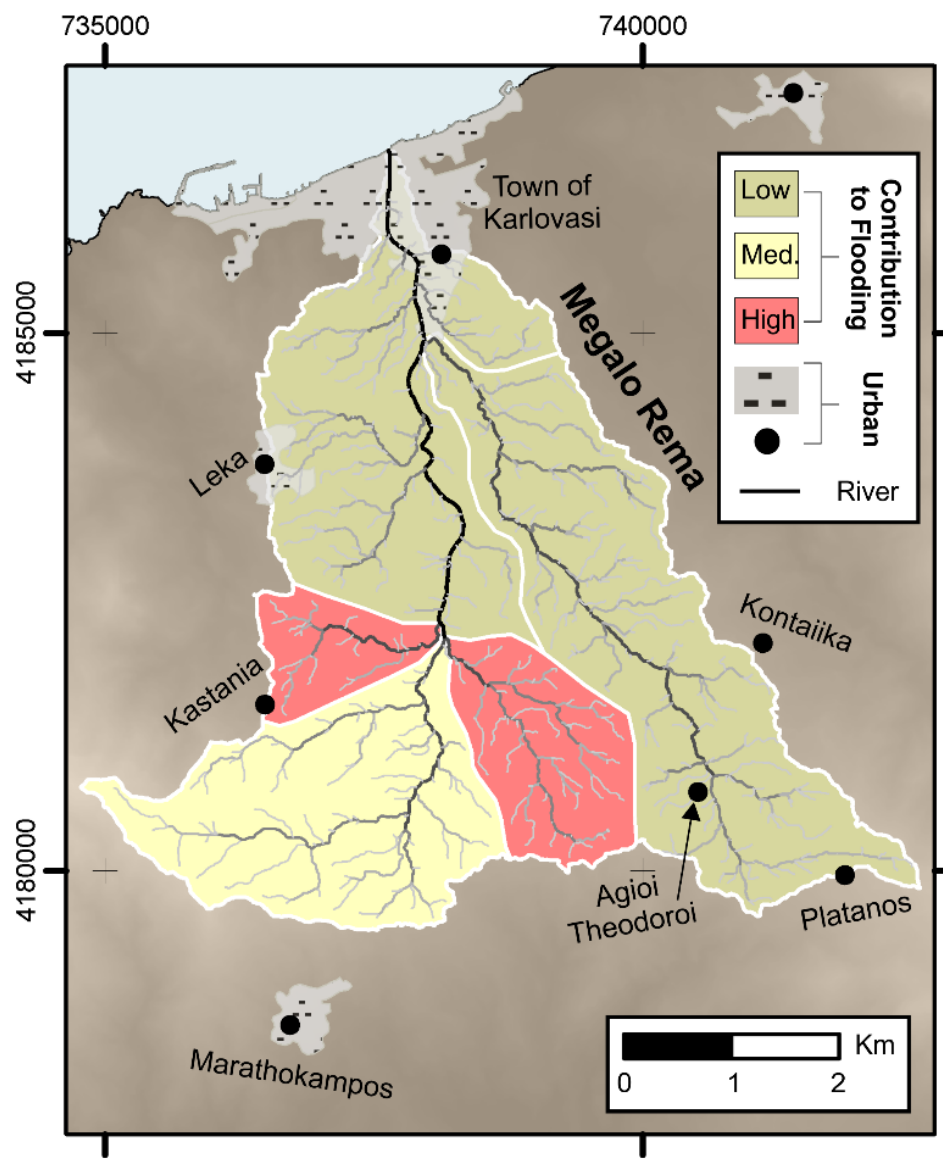
Στο σχήμα 5-45 παρουσιάζεται ο εκτιμώμενος πλημμυρικός κίνδυνος ή αλλιώς η συνεισφορά κάθε υπό-λεκάνης στη συνολική παροχή της κεντρικής κοίτης, όπως υπολογίστηκε μέσω του ασαφούς συστήματος ΠΚ. Παρατηρούμε ότι οι μεγάλες υπολεκάνες, οι οποίες έχουν και μικρές εν γένει κλίσεις και μεγάλους χρόνους συγκεντρώσεως παρουσιάζουν τη μικρότερη συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο της λεκάνης του Φουρνιώτικου. Οι ορεινές λεκάνες μεσαίου μεγέθους οι οποίες πηγάζουν από τον ορεινό όγκο της Αμπέλου, καθώς και οι μικρές λεκάνες εμφανίζονται να έχουν το μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο.



Σχήμα 5-45: Ιεράρχηση των υπο-λεκανών του Φουρνιώτικου ποταμού ανάλογα με το πλημμυρικό κίνδυνο που αυτές παρουσιάζουν, και τη συνεισφορά στην πλημμυρική παροχή της κεντρικής κοίτης

5.12.2 Πλημμυρικός κίνδυνος Μεγάλου Ρέματος

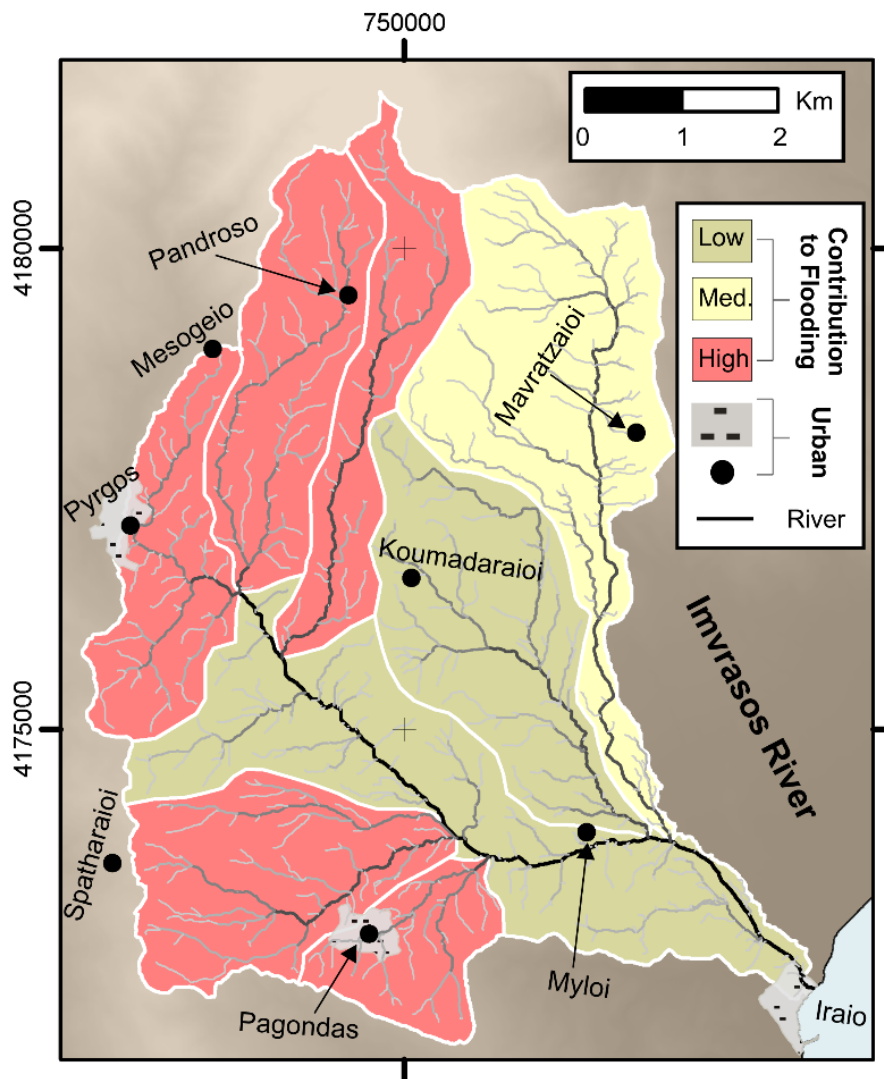
Στο σχήμα 5-46 παρουσιάζεται ο εκτιμώμενος πλημμυρικός κίνδυνος ή αλλιώς η συνεισφορά κάθε υπό-λεκάνης στη συνολική παροχή της κεντρικής κοίτης, όπως υπολογίστηκε μέσω του ασαφούς συστήματος ΠΚ. Παρατηρούμε ότι οι μεγάλες υπολεκάνες, οι οποίες έχουν και μικρές εν γένει κλίσεις και μεγάλους χρόνους συγκεντρώσεως παρουσιάζουν τη μικρότερη συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο της λεκάνης του Μεγάλου Ρέματος. Οι μικρές ορεινές λεκάνες οι οποίες πηγάζουν από τον ορεινό όγκο του Κερκετέα, εμφανίζονται να έχουν το μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο.



Σχήμα 5-46: : Ιεράρχηση των υπο-λεκανών του Μεγάλου Ρέματος ανάλογα με το πλημμυρικό κίνδυνο που αυτές παρουσιάζουν, και τη συνεισφορά στην πλημμυρική παροχή της κεντρικής κοίτης

5.12.3 Πλημμυρικός κίνδυνος Ίμβρασου ποταμού

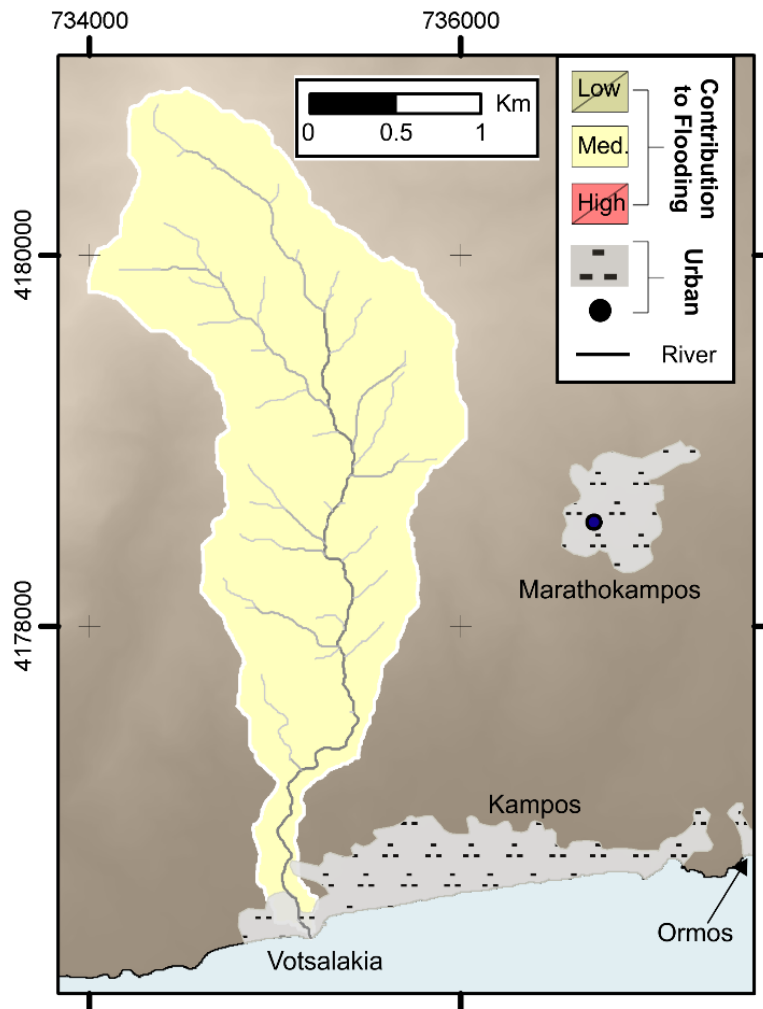
Στο σχήμα 5-47 παρουσιάζεται ο εκτιμώμενος πλημμυρικός κίνδυνος ή αλλιώς η συνεισφορά κάθε υπό-λεκάνης στη συνολική παροχή της κεντρικής κοίτης, όπως υπολογίστηκε μέσω του ασαφούς συστήματος ΠΚ. Παρατηρούμε ότι οι μεγάλες υπολεκάνες, οι οποίες έχουν και μικρές εν γένει κλίσεις και μεγάλους χρόνους συγκεντρώσεως παρουσιάζουν τη μικρότερη συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο της λεκάνης του Ίμβρασου ποταμού. Στη περίπτωση του Ίμβρασου όλες οι ορεινές λεκάνες (κοντά στα χωριά Πάνδροσο, Σπαθαράιοι, Πύργος) παρουσιάζουν υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο εξαιτίας του πολύ καλά ανεπτυγμένου υδρογραφικού δικτύου και των υψηλών κλίσεων που παρουσιάζουν.



Σχήμα 5-47: Ιεράρχηση των υπο-λεκανών του Ίμβρασου ποταμού ανάλογα με το πλημμυρικό κίνδυνο που αυτές παρουσιάζουν, και τη συνεισφορά στην πλημμυρική παροχή της κεντρικής κοίτης

5.12.4 Πλημμυρικός κίνδυνος ρέματος Μελέτη

Το ρέμα Μελέτη είναι ένα μικρό ρέμα με αρκετά μικρότερη έκταση από τις προηγούμενες υδρολογικές λεκάνες. Παρόλαυτα κατά το παρελθόν έχει προκαλέσει σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή του Κάμπου. Η υδρολογική του λεκάνη είναι τρίτης τάξης και για αυτό είναι άμεσα συγκρίσιμη με τις υπολεκάνες των άλλων μεγαλύτερων ποταμών. Στα πλαίσια αυτά η υδρολογική αυτή λεκάνη εμφανίζεται να έχει μέσο πλημμυρικό κίνδυνο, καθώς ενώ έχει σημαντικές κλίσεις το υδρογραφικό δίκτυο φαίνεται να μην είναι καλά ανεπτυγμένο και παρουσιάζει μικρή υδρογραφική συχνότητα και πυκνότητα. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση με υπο-λεκάνες δευτέρας τάξης δε φαίνεται να μπορεί ευκολα να γίνει εξαιτίας του πολύ μικρού εμβαδού τους.

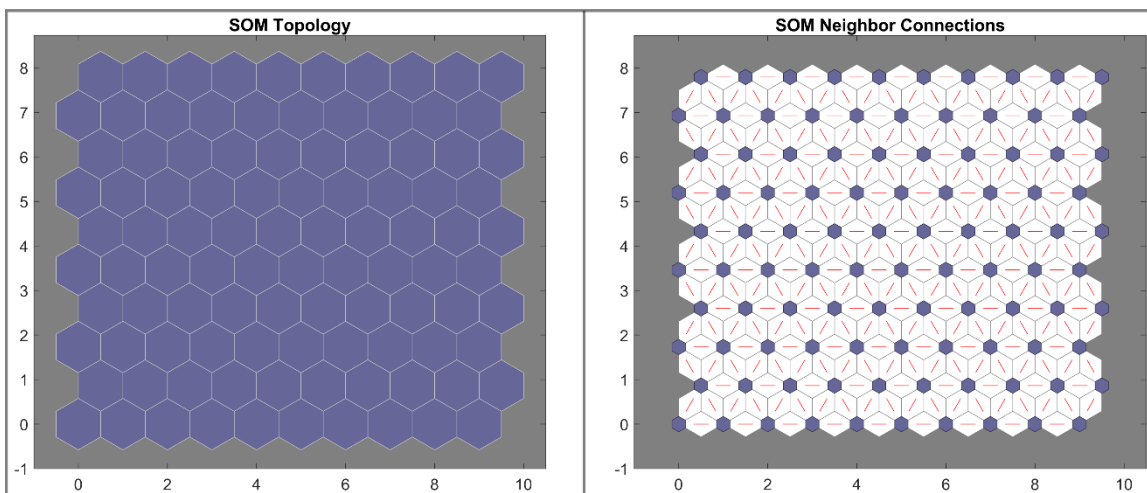


Σχήμα 5-48: Η λεκάνη του ρέματος Μελέτη η οποία έχει εκδηλώσει σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα κατά το παρελθόν παρόλο το μικρό της μέγεθος.

5.13 Εκτίμηση διάβρωσης του εδάφους με τη χρήση νευρωνικών δικτύων (SOM)

Για την εκτίμηση της διάβρωσης μέσω ΤΝΔ (ANN), χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιοι συνδυασμοί δεδομένων (τρωτότητα λιθολογικού σχηματισμού, χρήσεις γης (NDVI), LS factor και rDUNE ή TWI) με τα μοντέλα ασαφούς λογικής ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ τους. Δοκιμάστηκαν πολλές διαφορετικές τοπολογίες (πλέγματα) του SOM, όπως 1x3, 3x3, 3x5, 5x5 και καταλήξαμε να χρησιμοποιούμε ένα πλέγμα 10x10 καθώς φάνηκε ότι διαχωρίζει καλύτερα τις ομάδες μεταξύ τους. Από το σύνολο των δεδομένων, λάβαμε ένα τυχαίο δείγμα μεγέθους $n=50.000$ και εκπαιδεύσαμε το SOM, μέσω της R Programming Language (βιβλιοθήκη kohonen) όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στη μεθοδολογία. Έπειτα προβλέψαμε το τελικό αποτέλεσμα για κάθε σημείο του πληθυσμού των δεδομένων και αναγνωρίσαμε οπτικά τις ομάδες που σχηματίζονται. Ο βέλτιστος αριθμός των κλάσεων υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου “Silhouette”, (βιβλιοθήκη factoextra) και έπειτα ταξινομήσαμε τους νευρώνες μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια ιεραρχική προσέγγιση η οποία εφαρμόστηκε στο βαθμό γειτονικότητας και υλοποιήθηκε επίσης στην R (εντολή hclust). Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις υλοποιήσεις της μεθόδου όπως και οι γειτονικές συνδέσεις του πλέγματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-49.

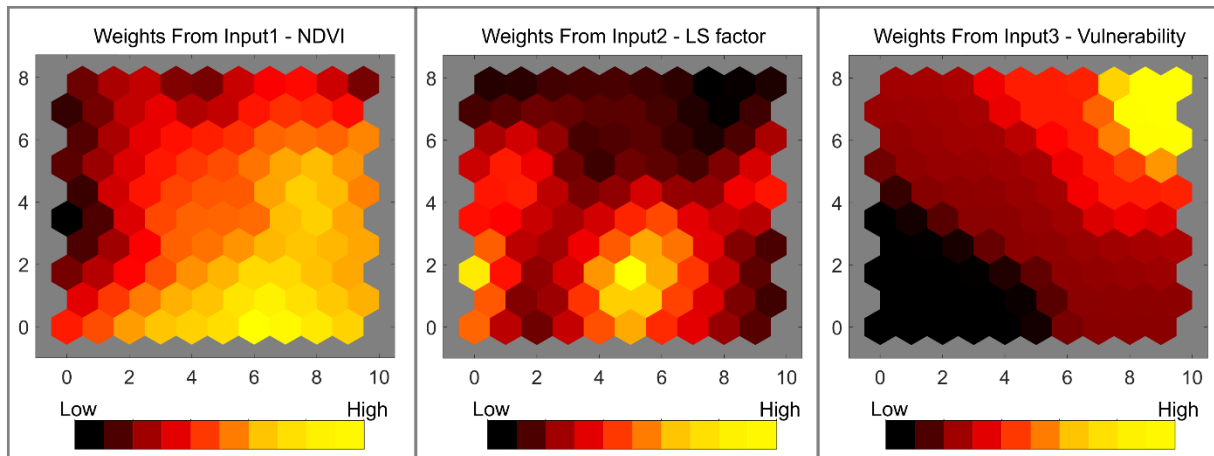
Τα αποτελέσματα για τις τρεις εφαρμογές της μεθόδου ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5-49: Τοπολογία δικτύου SOM και οι συνδέσεις μεταξύ γειτονικών νευρώνων.

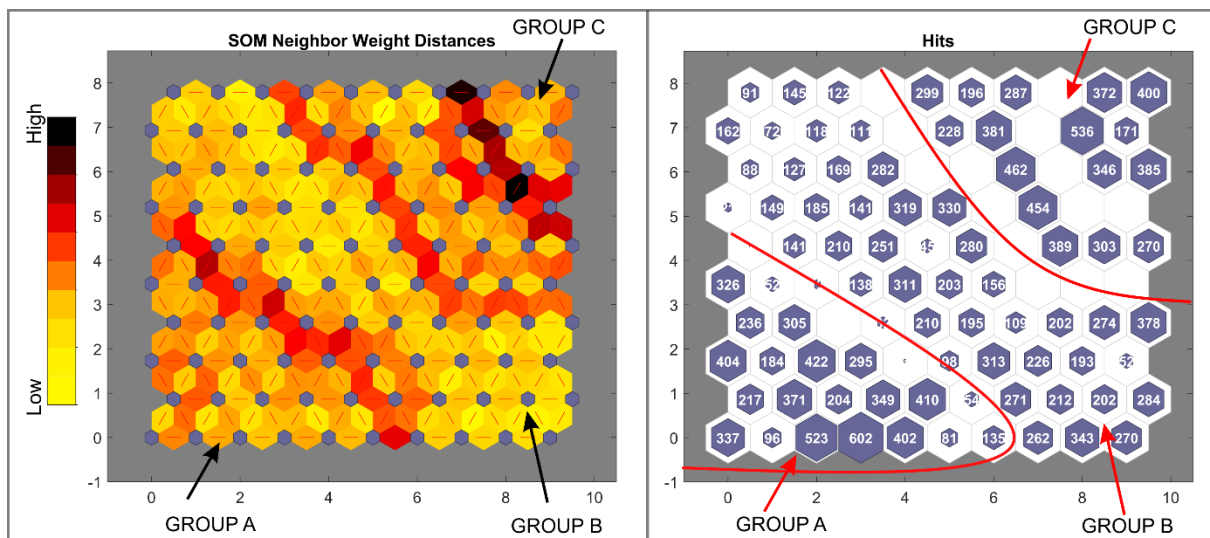
5.12.1 MONTELO N1: Χάρτης SOM τριών μεταβλητών

Ακολουθώντας τα βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.7.3 και χρησιμοποιώντας ως εισόδους το παράγοντα LS (κλίση και μήκος κλίσης) και τον δείκτη NDVI, ως δείκτη βλάστησης δημιουργούμε ένα Αυτοοργανούμενο Χάρτη (SOM) χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα 10x10 νευρώνων. Μετά από την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, μέσω της “R Programming Language” τα βάρη εισόδου (δηλαδή των νευρώνων πρώτου επιπέδου), ενώ οι τελικές τους τιμές απεικονίζονται στο σχήμα 5-50.



Σχήμα 5-50: Βάρη νευρώνων πρώτου επιπέδου (Input Layer).

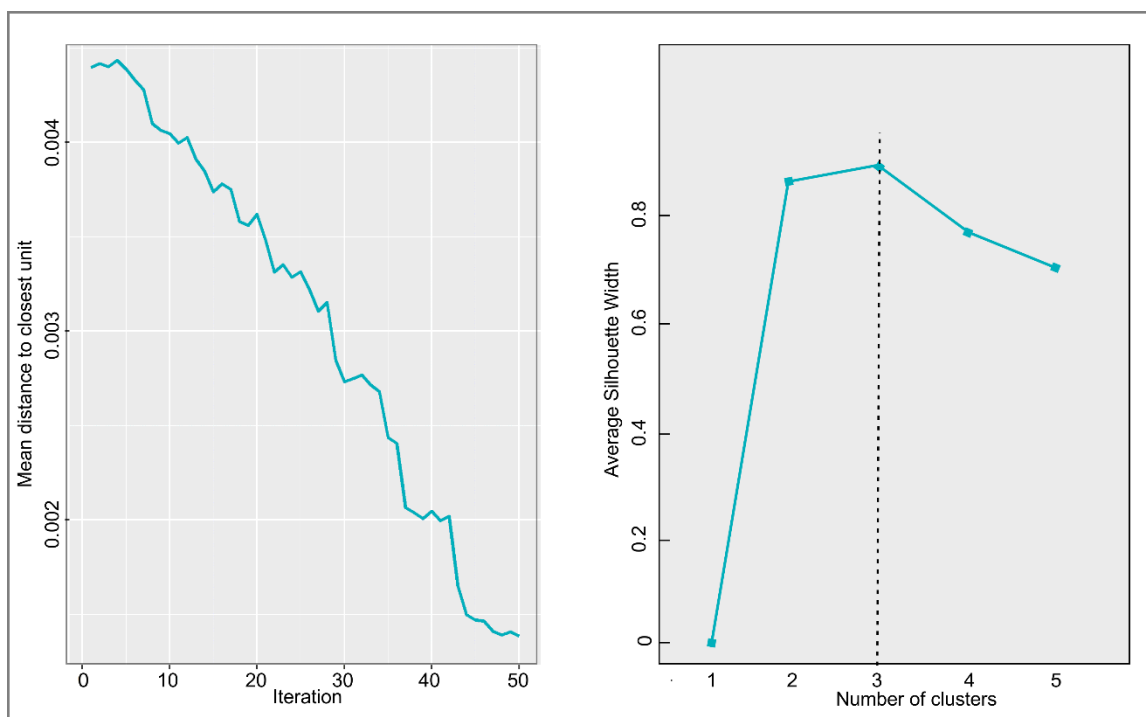
Για κάθε νευρώνα τους δευτέρου επιπέδου, βλέπουμε στο Σχήμα 5-50 τα βάρη με τα οποία ενώνονται αυτοί με τους νευρώνες του πρώτου επιπέδου (δηλαδή με τους νευρώνες εισόδου). Ανοιχτά χρώματα υποδηλώνουν υψηλά βάρη ενώ σκούρα χρώματα χαμηλά βάρη. Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε ότι καμία είσοδος δεν έχει παρόμοιο μοτίβο με κάποια άλλη κάτι που υποδηλώνει ότι καμία είσοδος δεν είναι εξαρτώμενη από κάποια άλλη, αλλά είναι όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Σχήμα 5-51: Αποστάσεις μεταξύ γειτονικών νευρώνων, αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης τα οποία ανήκουν στο σύμπλεγμα κάθε νευρώνα και κατηγοριοποίηση σε τρεις ομάδες.

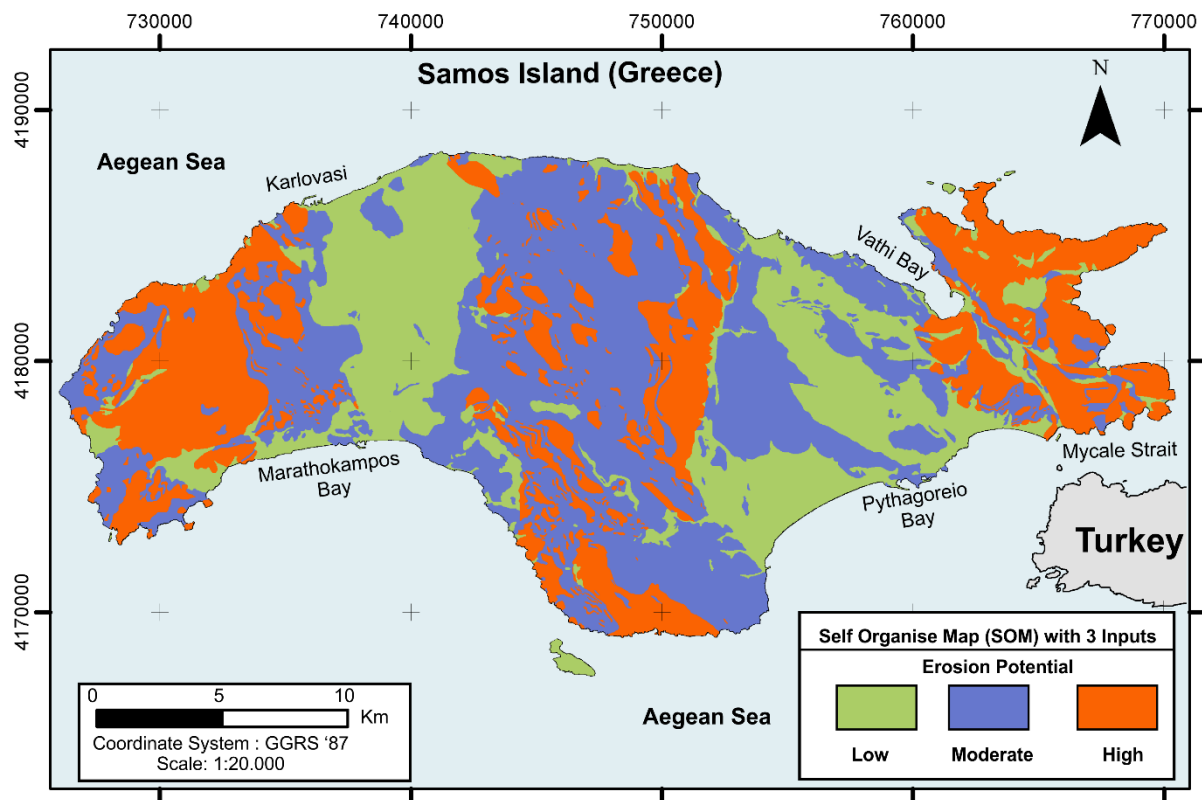
Απεικονίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ γειτονικών βαρών (Σχήμα 5-51) μπορούμε να οπτικοποιήσουμε το αποτέλεσμα της εκπαίδευσης και να αναγνωρίσουμε ομάδες νευρώνων οι οποίοι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Από το σχήμα διακρίνουμε ότι τα δεδομένα μας μπορούν να χωριστούν σε τρεις ή και 4 ομάδες. Επιπλέον στο σχήμα 5-45 βλέπουμε ότι σε κάθε νευρώνα κατηγοριοποιείτε ένας αριθμός δειγμάτων. Στα όρια μεταξύ των ομάδων δεν έχουμε πολλά δείγματα ενώ βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές τα δεδομένα έχουν κατανομηθεί σχετικά ομαλά σε διαφορετικούς νευρώνες.

Για τον καθορισμό του βέλτιστου αριθμού συστάδων εφαρμόζουμε το δείκτη “Silhouette”, ο οποίος αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.7.1, και μέσω του οποίου βλέπουμε ότι ο βέλτιστος αριθμός συστάδων για το συγκεκριμένο μοντέλο που τρέξαμε είναι 3. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και για κάθε επανάληψη (εποχή) υπολογίστηκε η μέση απόσταση των αντικειμένων από τους νευρώνες στους οποίους κατηγοριοποιείτε. Βλέπουμε ότι έως και τη 45^η επανάληψη η απόσταση μειώνεται ταχύτατα, δείχνοντας μια βελτίωση της ακρίβειας του χάρτη, ενώ από εκεί και πέρα η απόσταση σταθεροποιείτε. Μέσω αυτού του μεγέθους επιλέγουμε και τον αριθμό των επαναλήψεων (50 στη συγκεκριμένη περίπτωση).



Σχήμα 5-52: Μέση απόσταση των αντικειμένων προς ταξινόμηση από τον πλησιέστερο νευρώνα εξόδου και βέλτιστος αριθμός συστάδων όπως προσδιορίστηκε από την εφαρμογή του δείκτη “Silhouette”

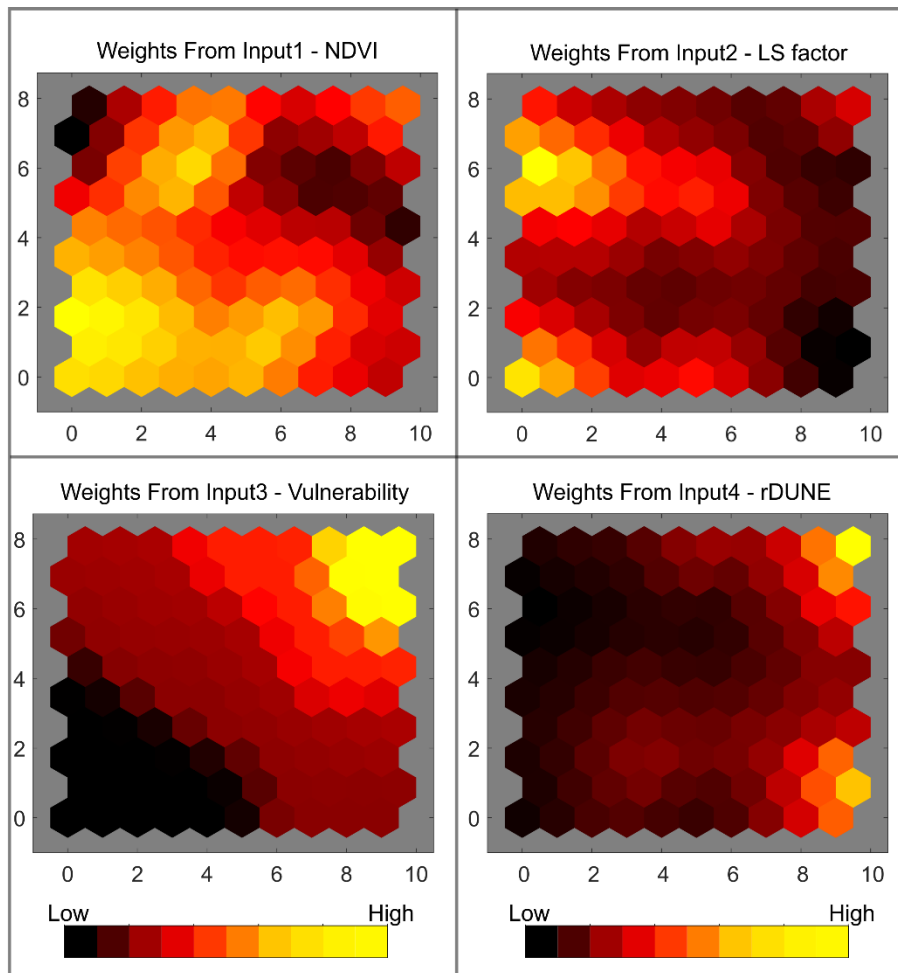
Πλέον έχουμε τον αριθμό των βέλτιστων συστάδων αλλά και την ομαδοποίηση που προέκυψε από το χάρτη SOM. Ομαδοποιούμε τους νευρώνες σε 3 ομάδες εφαρμόζοντας μια ιεραρχική ταξινόμηση σε περιβάλλον R και εξάγουμε το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο φορτώνεται σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., μέσω του οποίου οπτικοποιείται (Σχήμα 5-53). Παρατηρούμε ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει αναγνωρίσει ότι οι ορεινές περιοχές και ειδικά στον ορεινό όγκο και της Ζωοδόχου πηγής αναμένετε να έχουν υψηλό δυναμικό διάβρωσης, ενώ οι νεογενείς λεκάνες έχουν χαμηλό δυναμικό διάβρωσης το οποίο μπορεί να μεταφραστεί και ως δυναμικό απόθεσης. Το όρος Άμπελος εμφανίζει ενδιάμεσες τιμές, όπως και κάποιες περιοχές στις παρυφές του Κερκετέα. Τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι συμβατά με τα αποτελέσματα του RUSLE και των ασαφών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, ενώ καθώς η έξοδος του νευρωνικού δικτύου έχει διακριτές τιμές (L,M,H) δε μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στατιστικές συγκρίσεις με τις μέσες τιμές σε υδρολογικές λεκάνες ή σε τύπους χρήσεων γης όπως έγινε στις υλοποιήσεις μέσω ασαφών συστημάτων.



Σχήμα 5-53: Επικινδυνότητα διάβρωσης για την περιοχή μελέτης μετά από την εφαρμογή ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου SOM 3 εισόδων (LS factor, NDVI, Vulnerability)

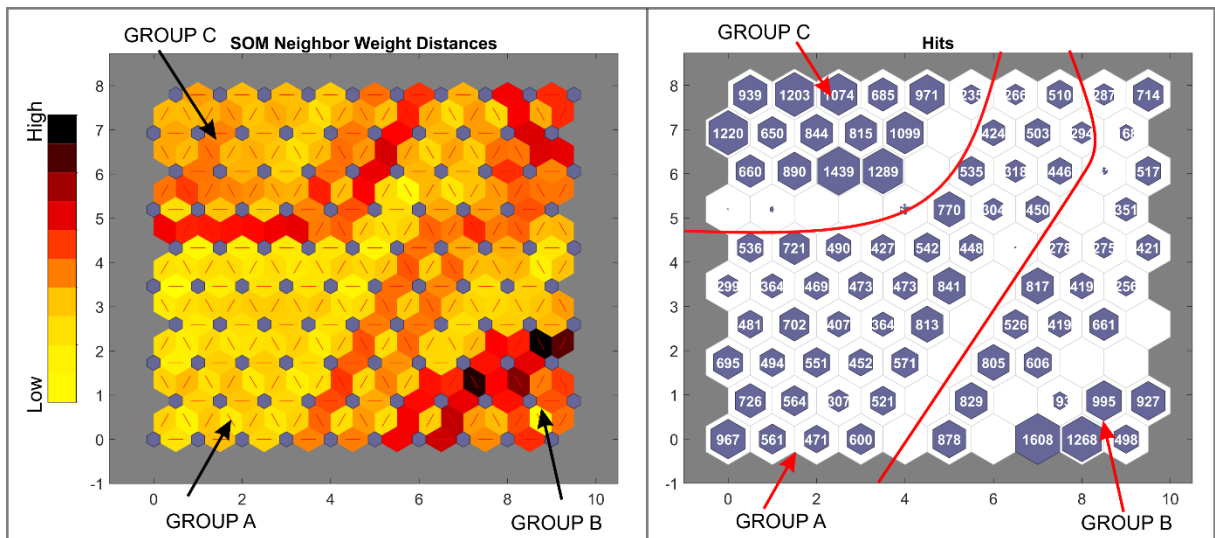
5.12.2 MONTEΛΟ N2: Χάρτης SOM τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον rDUNE.

Εφαρμόζουμε τα βήματα που αναλύθηκαν και προηγουμένως αλλά αυτή τη φορά με 4 μεταβλητές εισόδους τους δείκτες LS, NDVI, rDUNE και το δείκτη τρωτότητας της λιθολογίας. Οπτικοποιούμε τα βάρη των νευρώνων του πρώτου επιπέδου σε σχέση με το πώς αυτά συνδέονται με το δεύτερο επίπεδο. Όπως και στη προηγούμενη μέθοδο καμία από τις εισόδους δεν έχει παρόμοιο μοτίβο με κάποια άλλη κάτι που υποδηλώνει ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.



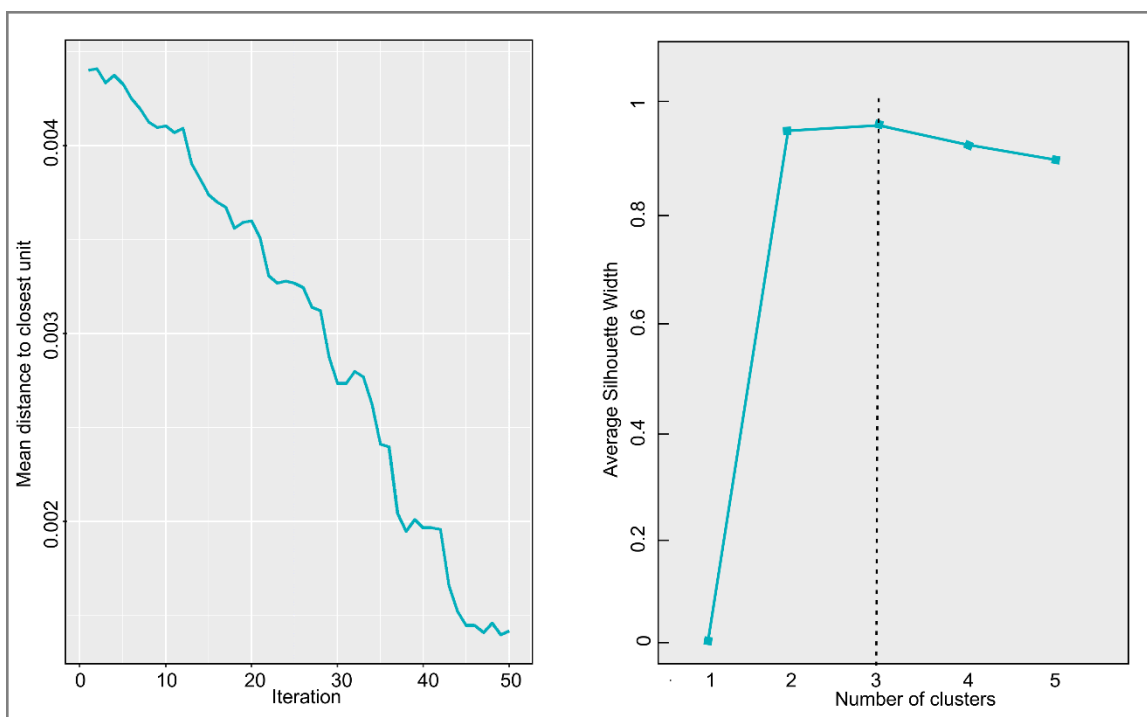
Σχήμα 5-54: Βάρη νευρώνων πρώτου επιπέδου (Input Layer) για το μοντέλο NI.

Απεικονίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ γειτονικών βαρών (Σχήμα 5-55) αναγνωρίζουμε ομάδες νευρώνων οποίοι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Από το σχήμα διακρίνουμε ότι τα δεδομένα μας μπορούν να χωριστούν σε τρεις ή και 4 ομάδες, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα βλέπουμε ότι τα δεδομένα έχουν κατανομηθεί σχετικά ομαλά σε διαφορετικούς νευρώνες.



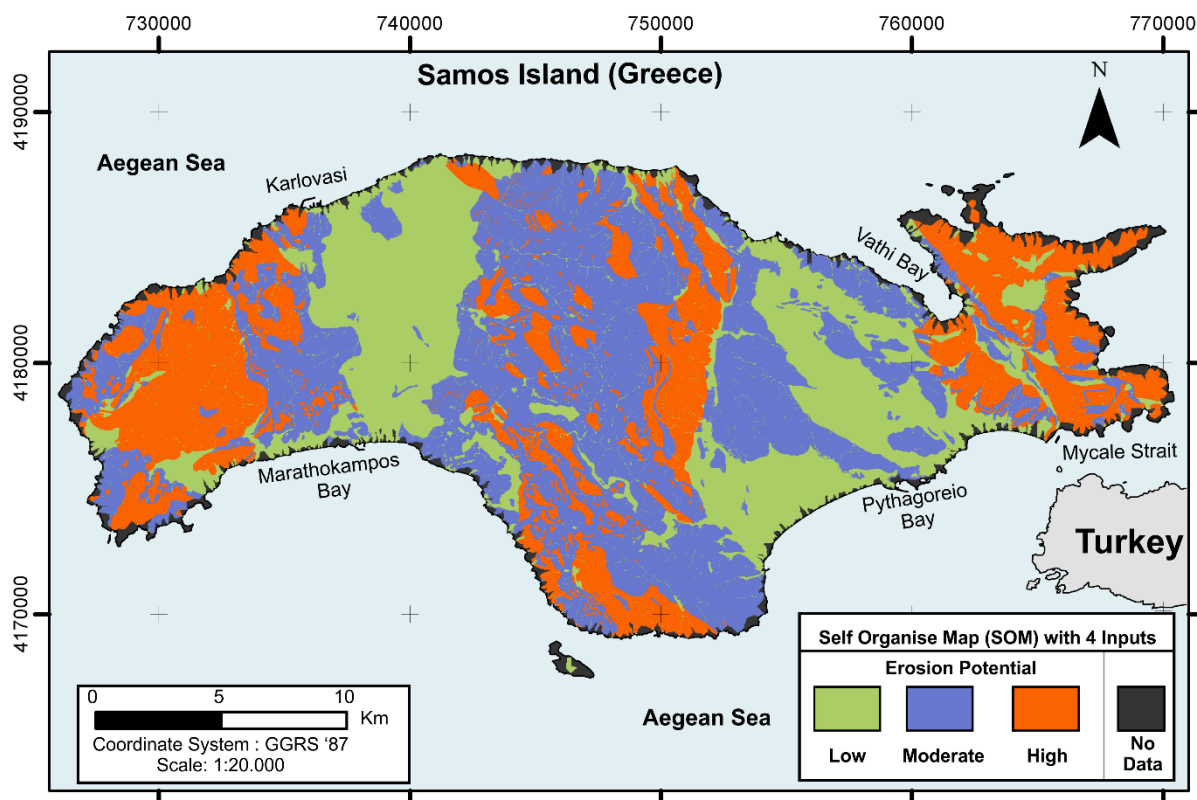
Σχήμα 5-55: Αποστάσεις μεταξύ γειτονικών νευρώνων, αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης τα οποία ανήκουν στο σύμπλεγμα κάθε νευρώνα και κατηγοριοποίηση σε τρεις ομάδες.

Για τον καθορισμό του βέλτιστου αριθμού συστάδων εφαρμόζουμε το δείκτη “Silhouette”, ο οποίος αναλύεται στο κεφάλαιο 4.7.1 και υπολογίζουμε ότι ο βέλτιστος αριθμός συστάδων για το συγκεκριμένο μοντέλο που τρέξαμε είναι 3. Παρατηρούμε ότι ο δείκτης έχει πολύ υψηλή τιμή (κοντά στο 1), ένδειξη της καλύτερης συσταδοποίησης των δεδομένων από το συγκεκριμένο μοντέλο σε σχέση με το προηγούμενο. Το Σχήμα 5-56 δείχνει ότι έως και τη 45^η επανάληψη η μέση απόσταση μεταξύ των νευρώνων του ενδιάμεσου επιπέδου μειώνεται ταχύτατα, δείχνοντας μια βελτίωση της ακρίβειας του χάρτη, ενώ από εκεί και πέρα η απόσταση σταθεροποιείται. Μέσω αυτού του μεγέθους επιλέγουμε και τον αριθμό των επαναλήψεων (50 στη συγκεκριμένη περίπτωση).



Σχήμα 5-56: Μέση απόσταση των αντικειμένων προς ταξινόμηση από τον πλησιέστερο νευρώνα εξόδου και βέλτιστος αριθμός συστάδων όπως προσδιορίστηκε από την εφαρμογή του δείκτη “Silhouette”

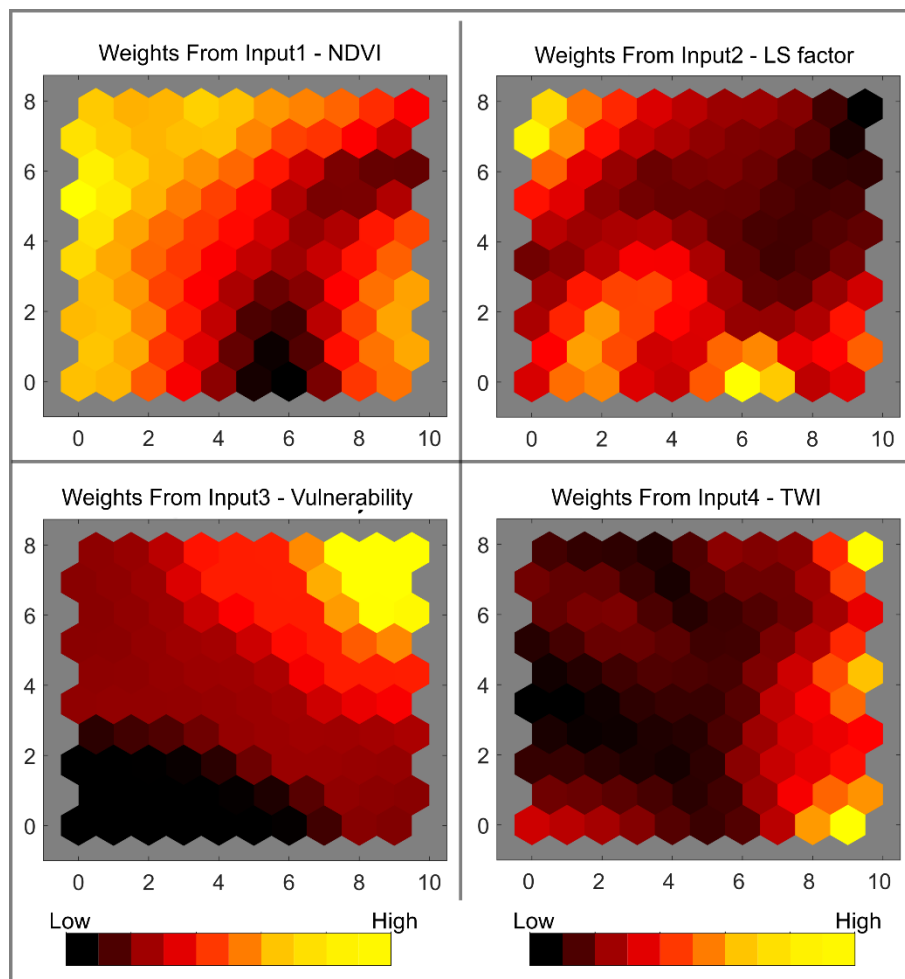
Πλέον έχουμε τον αριθμό των βέλτιστων συστάδων αλλά και την ομαδοποίηση που προέκυψε από το χάρτη SOM. Ομαδοποιούμε τους νευρώνες σε 3 ομάδες εφαρμόζοντας μια ιεραρχική ταξινόμηση σε περιβάλλον R και εξάγουμε το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο φορτώνεται σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., μέσω του οποίου οπτικοποιείτε (Σχήμα 5-57). Παρατηρούμε ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει αναγνωρίσει ότι οι ορεινές περιοχές και ειδικά στον ορεινό όγκο και της Ζωοδόχου πηγής αναμένετε να έχουν υψηλό δυναμικό διάβρωσης, ενώ οι νεογενείς λεκάνες έχουν χαμηλό δυναμικό διάβρωσης το οποίο μπορεί να μεταφραστεί και ως δυναμικό απόθεσης. Το όρος Άμπελος εμφανίζει ενδιάμεσες τιμές, όπως και κάποιες περιοχές στις παρυφές του Κερκετέα. Τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι συμβατά με τα αποτελέσματα του RUSLE και των ασαφών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, ενώ καθώς η έξοδος του νευρωνικού δικτύου έχει διακριτές τιμές (L,M,H) δε μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στατιστικές συγκρίσεις με τις μέσες τιμές σε υδρολογικές λεκάνες ή σε τύπους χρήσεων γης όπως έγινε στις υλοποιήσεις μέσω ασαφών συστημάτων. Η χωρική κατανομή των τιμών φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου N1, με μόνη διαφορά ότι κάποιες ημιορεινές περιοχές κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, φαίνεται να ταξινομούνται ως χαμηλότερου δυναμικού διάβρωσης σε σχέση με το μοντέλο N1.



Σχήμα 5-57: Επικινδυνότητα διάβρωσης για την περιοχή μελέτης μετά από την εφαρμογή ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου SOM 4 εισόδων – μοντέλο N2.

5.12.3 MONTEΛΟ N3 : Χάρτης SOM τεσσάρων μεταβλητών με επιπλέον είσοδο τον TWI.

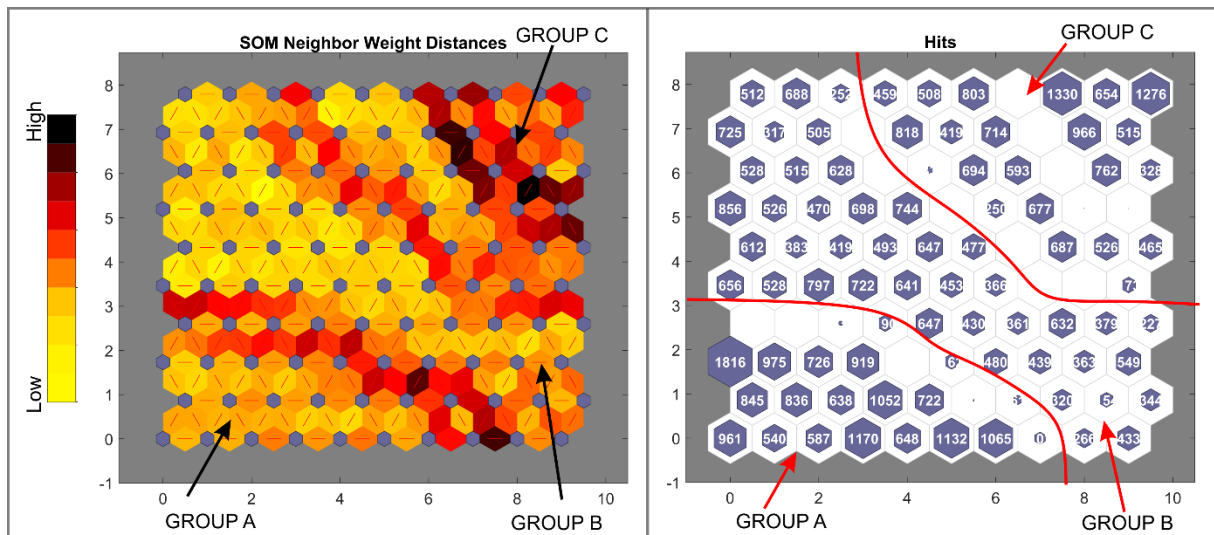
Εφαρμόζουμε τα βήματα που αναλύθηκαν και προηγουμένως αλλά αυτή τη φορά με 4 μεταβλητές εισόδου τους δείκτες LS, NDVI, TWI και το δείκτη τρωτότητας της λιθολογίας. Οπτικοποιούμε (Σχήμα 5-58 τα βάρη των νευρώνων του πρώτου επιπέδου σε σχέση με το πώς αυτά συνδέονται με το δευτερο επίπεδο. Όπως και στα μοντέλα N1, N2 καμία από τις εισόδους δεν έχει παρόμοιο μοτίβο με κάποια άλλη κάτι που υποδηλώνει ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Σχήμα 5-58: Βάρη νευρώνων πρώτου επιπέδου (Input Layer).

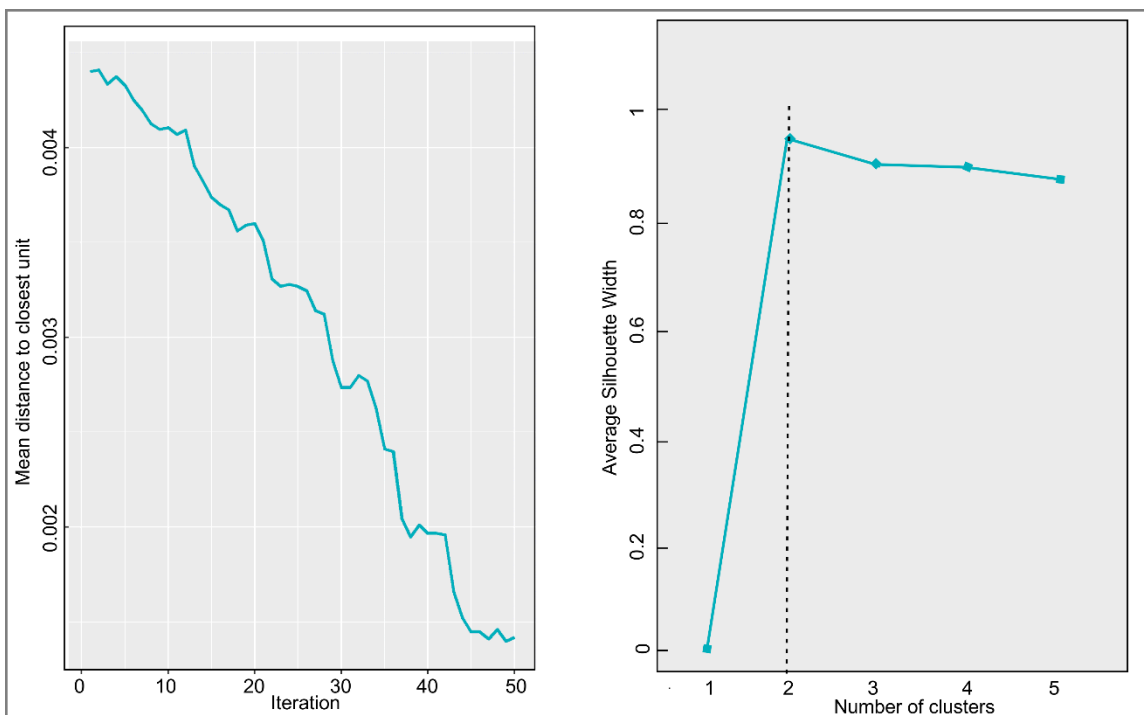
Απεικονίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ γειτονικών βαρών (Σχήμα 5-59) αναγνωρίζουμε ομάδες νευρώνων οποίοι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Από το σχήμα διακρίνουμε ότι

τα δεδομένα μας μπορούν να χωριστούν σε τρεις ή και 4 ομάδες., όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα βλέπουμε ότι τα δεδομένα εκπαίδευσης έχουν καταταξιωθεί σχετικά ομαλά σε διαφορετικούς νευρώνες.



Σχήμα 5-59: Αποστάσεις μεταξύ γειτονικών νευρώνων, αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης τα οποία ανήκουν στο σύμπλεγμα κάθε νευρώνα και κατηγοριοποίηση σε τρεις ομάδες.

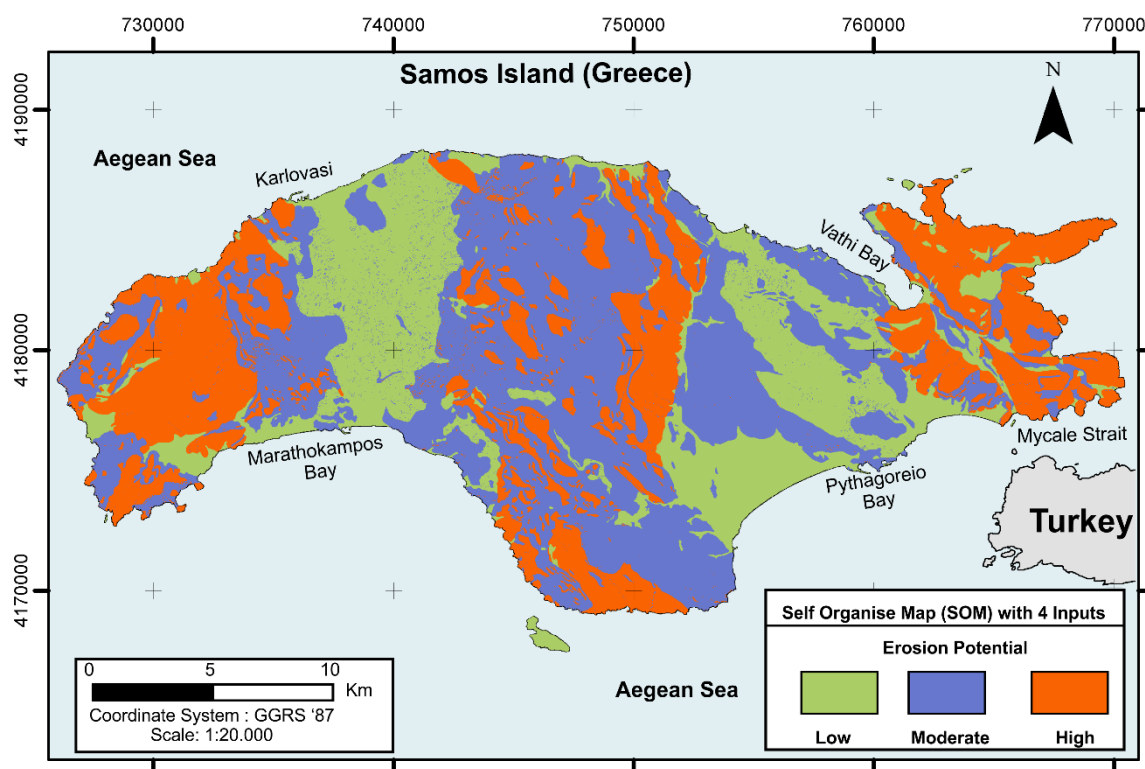
Για τον καθορισμό του βέλτιστου αριθμού συστάδων εφαρμόζουμε το δείκτη “Silhouette”, και υπολογίζουμε ότι ο βέλτιστος αριθμός συστάδων για το συγκεκριμένο μοντέλο που τρέξαμε είναι 2. Καθώς όμως η τιμή του δείκτη Silhouette είναι αρκετά υψηλή και για 3 συστάδες, και για να υπάρχει ομοιομορφία σε σχέση με τα άλλα μοντέλα αποφασίστηκε η ομαδοποίηση τους σε 3 συστάδες. Το σχήμα 5-54 δείχνει ότι έως και τη 45^η επανάληψη η απόσταση μειώνεται ταχύτατα, δείχνοντας μια βελτίωση της ακρίβειας του χάρτη, ενώ από εκεί και πέρα η απόσταση σταθεροποιείται. Μέσω αυτού του μεγέθους επιλέγουμε και τον αριθμό των επαναλήψεων (50 στη συγκεκριμένη περίπτωση).



Σχήμα 5-60: Μέση απόσταση των αντικειμένων προς ταξινόμηση από τον πλησιέστερο νευρώνα εξόδου και βέλτιστος αριθμός συστάδων όπως προσδιορίστηκε από την εφαρμογή του δείκτη “Silhouette”

Πλέον έχουμε τον αριθμό των συστάδων αλλά και την ομαδοποίηση που προέκυψε από το χάρτη SOM. Ομαδοποιούμε τους νευρώνες σε 3 ομάδες εφαρμόζοντας μια ιεραρχική ταξινόμηση σε περιβάλλον R και εξάγουμε το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο φορτώνεται σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., μέσω του οποίου οπτικοποιείτε (Σχήμα 5-61). Παρατηρούμε ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει αναγνωρίσει ότι οι ορεινές περιοχές και ειδικά στον ορεινό όγκο και της Ζωοδόχου πηγής αναμένετε να έχουν υψηλό δυναμικό διάβρωσης, ενώ οι νεογενείς λεκάνες έχουν χαμηλό δυναμικό διάβρωσης το οποίο μπορεί να μεταφραστεί και ως δυναμικό απόθεσης. Το όρος Άμπελος εμφανίζει ενδιάμεσες τιμές, όπως και κάποιες περιοχές στις παρυφές του Κερκετέα. Τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι συμβατά με τα αποτελέσματα του RUSLE και των ασαφών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, ενώ καθώς η έξοδος του νευρωνικού δικτύου έχει διακριτές τιμές (L,M,H) δε μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στατιστικές συγκρίσεις με τις μέσες τιμές σε υδρολογικές λεκάνες ή σε τύπους χρήσεων γης όπως έγινε στις υλοποιήσεις μέσω ασαφών συστημάτων. Η χωρική κατανομή των τιμών φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου N1, με μόνη διαφορά ότι κάποιες ημιορεινές περιοχές κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, φαίνεται να ταξινομούνται ως χαμηλότερου δυναμικού διάβρωσης σε σχέση με το μοντέλο N1. Παρόλαυτα το μοντέλο N2 φαίνεται να

διακρίνει καλύτερα το υδρογραφικό δίκτυο και το χαμηλότερο δυναμικό διάβρωσης που το διακρίνει εξαιτίας των χαμηλότερων κλίσεων.



Σχήμα 5-61: Επικινδυνότητα διάβρωσης για την περιοχή μελέτης μετά από την εφαρμογή ανταγωνιστικού νευρωνικού δικτύου SOM 4 εισόδων (*LS factor*, *NDVI*, *Vulnerability*, *TWI*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της διάβρωσης και του πλημμυρικού κινδύνου είναι δύο σύνθετα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία επηρεάζουν μεγάλο μέρος του πλανήτη, αλλά ταυτόχρονα είναι ιδιαίτερα δύσκολα στον ακριβή τους προσδιορισμό. Έτσι οι προσεγγίσεις μέσω τεχνητής νοημοσύνης συνιστούν ένα ευέλικτο τρόπο για την καλύτερη αντιμετώπιση τους ακόμα και όταν τα δεδομένα είναι περιορισμένα ή/και δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια.

Συνδυάζοντας σύγχρονα εργαλεία όπως τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και οι δορυφορικές εικόνες με -state of the art- τεχνικές ανάλυσης δεδομένων μέσω τεχνητής νοημοσύνης προσεγγίζουμε τα περιβαλλοντικά αυτά προβλήματα με όσο το δυνατό αποδοτικότερο τρόπο. Για την εφαρμογή τους επιλέγεται ένα από τα μεγαλύτερα νησιά της Ελλάδας η Σάμος, η οποία έχει πληγεί πολλές φορές στο παρελθόν από έντονες πλημμύρες και από γεγονότα διάβρωσης, τα οποία ενισχύονται εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα και δη των δασικών πυρκαγιών και της αστικοποίησης.

Στα πλαίσια της διατριβής αυτής αρχικά έγινε συλλογή των διαθέσιμων πρωτογενών δεδομένων τα οποία σχετίζονται με τις διεργασίες της επιφανειακής απορροής η οποία προκαλεί την διάβρωση και τα πλημμυρικά φαινόμενα. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι : (α) τοπογραφικά, (β) γεωλογικά, (γ) χρήσεις γης, (δ) δορυφορικές εικόνες, (ε) κλιματολογικά δεδομένα και τέλος (ζ) δεδομένα τα οποία προέκυψαν από εργασία υπαίθρου. Όλα αυτά τα δεδομένα οργανώθηκαν σε γεωβάση σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και αναλύθηκαν για την παραγωγή σημαντικών δευτερογενών παραμέτρων είτε σε μορφή ψηφιδωτών δεδομένων (raster) είτε διανυσματικών δεδομένων (vector). Τα περισσότερα από τα δευτερογενή δεδομένα υπολογίστηκαν μέσω Γ.Σ.Π, ενώ παρήχθησαν, με τη χρήση της Python, κάποιοι δείκτες νέας γενιάς όπως ο HAND και ο DUNE.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες : τις κλασσικές και αυτές της τεχνητής νοημοσύνης όπως η ασαφής λογική και τα νευρωνικά δίκτυα. Αρχικά έγινε η εφαρμογή των κλασσικών μεθόδων ανάλυσης η οποία περιλαμβάνει: (α) ανάλυση κλιματολογικών δεδομένων, (β) εφαρμογή μοντέλου διάβρωσης RUSLE για ολόκληρη τη Σάμο, (γ) υπολογισμός υδρογραφήματος και μέγιστης παροχής μέσω της μεθόδου SCS-CN για τέσσερις επιλεγμένες υδρολογικές λεκάνες. Στη συνέχεια με βάση τα δευτερογενή δεδομένα έγινε εκτίμηση του πάχους του εδάφους, της επικινδυνότητας διάβρωσης του εδάφους αλλά και της αντίστοιχης πλημμυρικής μέσω μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Δεδομένου ότι υπάρχει

μια σχετική αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της ακριβούς τιμής των διαφόρων παραγόντων οι οποίοι συνδυάζονται για την υλοποίηση των μοντέλων, οι μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης μας διευκολύνουν στην ανάλυση τους, ενώ ειδικότερα τα ασαφή συστήματα παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τον χειρισμό αυτών των αβεβαιοτήτων.

Αναλυτικότερα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής υλοποιήθηκαν οι παρακάτω κύριες κατηγορίες μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης:

1. **Αυτοματοποιημένο μοντέλο υπολογισμού πάχους του εδάφους** μέσω ασαφών συστημάτων.
2. **Μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας διάβρωσης** για ολόκληρο το νησί μέσω ασαφών συστημάτων
3. **Μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας διάβρωσης** για ολόκληρο το νησί μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων
4. **Μοντέλο εκτίμησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας** τεσσάρων επιλεγμένων υδρολογικών λεκανών της Σάμου.

Από την ανάλυση των **κλιματικών δεδομένων** προκύπτουν τα εξής:

- Η **θερμοκρασία** εμφανίζει αυξητικές τάσεις (από 1.24°C έως 2.2 °C ιδιαίτερα κατά το καλοκαίρι και την άνοιξη κάτι το οποίο είναι συμβατό με τις εκτιμήσεις άλλων ερευνητών (π.χ. Skliris et al., 2012; Pisano et al., 2020).

- Η **μέση βροχόπτωση** εμφανίζει πτωτική τάση κατά τη διάρκεια του έτους (~20% για όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι βροχοπτώσεις είναι σχεδόν μηδενικές σε όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Τα αποτελέσματα είναι συμβατά με το μοντέλο των Brogli et al., 2019 και των Kapsomenakis et al., 2011, αν και δε παρατηρείται μικρή αύξηση κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου όπως προβλέπεται από την μελέτη των τελευταίων, κάτι που ενδεχομένως να οφείλεται στη παρατεταμένη ξηρή περίοδο από το 2010 και μετά.

- Κατά την **υγρή περίοδο** (Νοέμβριος έως Απρίλιος) εμφανίζεται σχεδόν το σύνολο της βροχόπτωσης και σε αυτή εμφανίζεται μια πτωτική τάση που πλησιάζει το 23%.

- Σημαντικά **γεγονότα βροχοπτώσεων** (>10 mm) εμφανίζονται κυρίως από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο, ενώ από το Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο παρατηρούνται ακραία γεγονότα βροχόπτωσης (>30mm) τα οποία προκαλούν πολλαπλές φυσικές καταστροφές.

- Συνολικά εμφανίζεται μια πτωτική τάση του **αριθμού των ημερών** με υψηλή βροχόπτωση, σε αντίθεση με τους υπολογισμούς για ολόκληρη τη Μεσόγειο που δείχνουν μια αύξηση (Nastos & Zerefos, 2009), κάτι που οφείλεται στη παρατεταμένη ξηρασία στην περιοχή μελέτης που εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια.

- Από την **ανάλυση της χρονικής εξέλιξης** των βροχοπτώσεων διαπιστώνουμε ότι κατά την υγρή περίοδο υπάρχουν γεγονότα βροχόπτωσης που διαρκούν 2 έως 3 ημέρες και άλλα σπανιότερα που διαρκούν περισσότερο. Και στις δυο περιπτώσεις είναι δυνατή η εμφάνιση εκτεταμένων πλημμυρικών φαινομένων και διάβρωσης.

Η μελέτη της διάβρωσης του εδάφους έγινε αρχικά με την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE. Προκύπτει ότι κατά μέσο όρο για όλη την περιοχή μελέτης έχουμε μια εκτιμώμενη απώλεια $29 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Το 20% της περιοχής μελέτης παρουσιάζει χαμηλές τιμές ($<2 \text{ t/ha per year}$), ενώ το 42% παρουσιάζει τιμές κάτω από 10 t/ha per year . Περίπου το 5% παρουσιάζει ακραίες τιμές ($>100 \text{ t/ha per year}$) ενώ το υπόλοιπο ποσοστό βρίσκεται μεταξύ 10 και $100 \text{ t/ha per year}$. Οι υψηλές τιμές ($>50 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) παρατηρούνται στις νότιες πλαγιές του Κερκετέα, τις δυτικές πλαγιές της Αμπέλου αλλά και στη περιοχή ανάμεσα στο Πυθαγόρειο και το Βαθύ. Χαμηλές τιμές παρουσιάζονται στα επίπεδα τμήματα των νεογενών λεκάνων, στις ανατολικές πλαγιές της Αμπέλου και στο βόρειο τμήμα του Κερκετέα. Οι νεογενείς λεκάνες ανά τμήματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές διάβρωσης ειδικά στη νεογενή λεκάνη του Καρλοβασίου όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές διάβρωσης ακόμα και σε χαμηλά υψόμετρα. Το όρος Άμπελος και οι βόρειες παρυφές του Κερκετέα εμφανίζουν χαμηλές έως μεσαίες τιμές διάβρωσης (0 έως 5 t/ha per year).

Για τη μελέτη των πλημμυρών στο νησί της Σάμου αναγνωρίστηκαν τέσσερις σημαντικές λεκάνες του νησιού με πλούσιο ιστορικό πλημμυρών. Οι δυο από αυτές βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του νησιού και εκβάλλουν κοντά στο Καρλόβασι (Φουρνιώτικος ποταμός και Μεγάλο Ρέμα) ενώ οι άλλες δυο εκβάλλουν στο νότιο τμήμα (Ιμβρασος ποταμός και Ρέμα Μελέτη). Για αυτές τις λεκάνες εφαρμόστηκε η μέθοδος SCS – CN για τον υπολογισμό της υδρολογικής απόκρισης τους. Πιο συγκεκριμένα για τις λεκάνες των ποταμών υπολογίστηκε ότι:

- **Ο Φουρνιώτικος Ποταμός.** Είναι η μεγαλύτερη λεκάνη του νησιού και εμφανίζει τη μεγαλύτερη παροχή ($69 \text{ m}^3/\text{s}$ για ύψος ενεργής βροχόπτωσης 1 cm), αλλά και τους μεγαλύτερους χρόνους υστέρησης, συρροής και χρονικής διάρκειας της βροχόπτωσης του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Ταυτόχρονα όμως παρουσιάζει σημαντικά μικρότερο

ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης εξαιτίας της εμφάνισης δασικών περιοχών σε μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής.

- **Ο Ίμβρασος ποταμός**, αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη λεκάνη του νησιού και εμφανίζει σχεδόν την ίδια τιμή μέγιστης παροχής ($66 \text{ m}^3/\text{s}$ για ύψος ενεργής βροχόπτωσης 1 cm) όπως ο Φουρνιώτικος, ενώ οι χρόνοι του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι μικρότεροι. Η ενεργή βροχόπτωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τον Φουρνιώτικο, άρα η αναμενόμενη συνολική παροχή αναμένεται να είναι αρκετά μεγαλύτερη.
- **Η λεκάνη του Μεγάλου Ρέματος** καταλαμβάνει περίπου τη μισή έκταση σε σχέση με τους προηγούμενους ποταμούς αλλά παρουσιάζει σημαντική μέγιστη απορροή ($\sim 44 \text{ m}^3/\text{s}$) για την έκταση της λεκάνης του, ενώ ο χρόνος συρροής και οι υπόλοιποι χρόνοι που παρουσιάζονται στο υδρογράφημα είναι μικρότεροι, απαιτώντας έτσι μικρότερο χρόνο για τη δημιουργία πλημμυρικής παροχής. Η ενεργή βροχόπτωση είναι στα επίπεδα του Ίμβρασου ποταμού, και για αυτό το λόγο η συνολική παροχή του Μεγάλου Ρέματος αναμένεται να πλησιάζει τη συνολική παροχή του Φουρνιώτικου παρόλο το σημαντικά μικρότερο μέγεθος της λεκάνης απορροής του.
- **Το Ρέμα Μελέτη**, είναι μια μικρής έκτασης λεκάνη, η οποία αποστραγγίζεται από έναν τρίτης τάξης υδρογραφικό κλάδο με εφήμερη ροή αλλά παρουσιάζει σχετικά υψηλή μέγιστη παροχή για το μέγεθος της, και πολύ μικρούς χρόνους συρροής, υστέρησης και ανόδου ($< 1 \text{ hour}$). Έτσι κατά τη διάρκεια γεγονότων πολύ μικρής διάρκειας το νερό συγκεντρώνεται ταχύτατα στην εκβολή του ποταμού η οποία βρίσκεται εντός κατοικημένης περιοχής και τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι συχνά.

Μετά από την ανάλυση της περιοχής μελέτης μέσω κλασικών μεθοδολογιών, εφαρμόζουμε μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Αρχικά μελετάμε το πάχος του εδάφους, το οποίο είναι σημαντικότερος παράγοντας και επηρεάζει άμεσα τις υδρολογικές διεργασίες σε μια περιοχή. Εφαρμόζουμε δυο παραλλαγές ενός αυτοματοποιημένου συστήματος υπολογισμού του πάχους του εδάφους (Μοντέλα Π-1 και Π-2). Το μοντέλο Π-2 πλεονεκτεί καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε παγκόσμιο επίπεδο, με μικρές τροποποιήσεις στους ασαφείς λογικούς κανόνες, ενώ το μοντέλο Π-1 απαιτεί μεγαλύτερες αλλαγές, και παρεμβάσεις από το χρήστη στη φάση της κρυφής βαθμονόμησης του μοντέλου, για να λειτουργήσει σε άλλες περιοχές μελέτης. Η απόδοση και των δυο μοντέλων είναι καλή καθώς υπολογίζεται ότι κατά μέσο όρο εκτιμάται σωστά το 76% των σημείων στη περίπτωση του μοντέλου Π-1 και 68% στη περίπτωση του Π-

2. Το μοντέλο Π-1 φαίνεται να πλεονεκτεί στον υπολογισμό των μεσαίων τιμών πάχους εδάφους ενώ το Π-2 στον υπολογισμό των σχετικά υψηλών και χαμηλών τιμών πάχους εδάφους. Το ποσοστό σφάλματος κυμαίνεται από 0 έως και 43%, ανάλογα με τη κλάση του εδάφους (L,M,H) και το μοντέλο. Συγκρίνοντας το εκτιμώμενο πάχος του εδάφους των δυο μοντέλων (Π-1 και Π-2) παρατηρούμε ότι η γενικότερη εικόνα της περιοχής παραμένει παρόμοια. Το όρος Κερκετέας έχει μηδενικά πάχη εδάφους, στη νότια πλευρά του, οι πεδινές περιοχές χαρακτηρίζονται από καλά σχηματισμένο έδαφος μεγάλου πάχους, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές έχουν ενδιάμεσες τιμές. Περίπου το 20-22% της επιφάνειας της Σάμου εμφανίζει μηδενικά πάχη εδάφους, το 38.5% έχει χαμηλό πάχος, το 27-30% μεσαίο και το 11-12% σχετικά υψηλό πάχος. Σχεδόν όλες οι επίπεδες επιφάνειες εκτιμάται ότι θα έχουν σχετικά υψηλό πάχος εδάφους (σε ποσοστό 92.1%), οι επιφάνειες με χαμηλές κλίσεις (<10%) αναμένεται να έχουν μεσαίο ή σχετικά υψηλό πάχος εδάφους, οι επιφάνειες με μεσαίες κλίσεις (10%-20%) αναμένεται να έχουν κυρίως μεσαία πάχη εδάφους και σταδιακά στις μεγαλύτερες κλίσεις βλέπουμε ότι το έδαφος αρχίζει να έχει μικρότερη παρουσία.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ορεινό ανάγλυφο ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει σημαντική βλάστηση και μεγάλη ποικιλομορφία στους γεωλογικούς σχηματισμούς που την αποτελούν, κάτι που προκαλεί μεγάλες διαφοροποιήσεις στο δυναμικό διάβρωσης και τις υδρολογικές συνθήκες. Οι ορεινές περιοχές με πολύ μεγάλες κλίσεις, χαμηλή βλάστηση και ευδιάβρωτους λιθολογικούς σχηματισμούς όπως οι μάργες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα διάβρωσης. Αντίθετα οι πεδινές περιοχές εμφανίζουν μικρότερη επικινδυνότητα διάβρωσης εξαιτίας των μειωμένων κλίσεων. Τέλος οι ορεινές περιοχές με μεγάλες δασικές εκτάσεις εμφανίζουν μικρές έως μεσαίες τιμές εδαφικής διάβρωσης. Αυτή η τάση παρατηρείται στα περισσότερα μοντέλα τα οποία εφαρμόστηκαν για την περιοχή μελέτης (RUSLE, ασαφή συστήματα με περισσότερες από 3 εισόδους και μοντέλο νευρωνικών δικτύων SOM). Συγκεκριμένα:

- Τα **μοντέλα νευρωνικών δικτύων (SOM)** φαίνεται να δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα είτε χρησιμοποιούμε 3 είτε 4 εισόδους και είναι κατάλληλα για τη γρήγορη ταξινόμηση του δυναμικού της διάβρωσης ειδικά σε εκτεταμένες περιοχές, και την αναγνώριση των περιοχών τα οποία χρειάζονται μεγαλύτερη προσοχή κατά τη σύνταξη διαχειριστικών σχεδίων.
- Τα **συστήματα ασαφούς λογικής** μπορούν να μας δώσουν μια καλύτερη εικόνα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Ιδιαίτερα για τα ασαφή συστήματα βλέπουμε ότι επιτυγχάνουμε ακρίβεια πρόβλεψης η οποία πλησιάζει το 70% σε σχέση με ένα κλασικό μοντέλο (RUSLE) παρέχοντας έτσι ένα ιδιαίτερα δυναμικό εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της διάβρωσης μιας περιοχής.

- Με την άυξηση των **παραμέτρων** φαίνεται να επιτυγχάνουμε μια βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης της διάβρωσης, ενώ ο τοπογραφικός δείκτης νέας γενιάς rDUNE φαίνεται να πλεονεκτεί σημαντικά σε σχέση με τον TWI για την αναγνώριση περιοχών με έντονη διάβρωση (βελτιώνει την ακρίβεια του μοντέλου κατά 4%). Η χρήση της γης φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά το δυναμικό διάβρωσης ενώ η λιθολογία είναι ένας παράγοντας που φαίνεται να το επηρεάζει λιγότερο. Σε συνδυασμό με το ότι ο παράγοντας των χρήσεων γης (NDVI) είναι ευρέως διαθέσιμος και εύκολα υπολογίσιμος για ολόκληρο τον κόσμο τον καθιστά, μαζί με τη τοπογραφία τους δύο σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να περιλαμβάνονται σε ένα μοντέλο εκτίμησης της διάβρωσης.

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, καθώς ολόκληρη η λεκάνη συνεισφέρει στην παροχή η οποία παρατηρείτε στην εκβολή ενός ποταμού. Έτσι υπολογίζεται για κάθε λεκάνη με βάση κάποια βασικά χαρακτηριστικά της (τοπογραφικοί δείκτες, βλάστηση). Παρατηρούμε ότι οι ορεινές περιοχές με καλά σχηματισμένο δίκτυο φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλημμυρικό κίνδυνο, συνεισφέροντας μεγαλύτερη παροχή νερού προς τα κατάντι σε μικρό χρονικό διάστημα. Συνήθως αυτές οι υπο-λεκάνες έχουν ‘κυκλικό σχήμα’ το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι ο χρόνος συρροής και τα άλλα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος τους αναμένεται να είναι μικρά. Για καθεμία από τις εξεταζόμενες λεκάνες παρατηρούμε ότι:

- **Φουρνιώτικος ποταμός.** Συνολικά μόνο το 17.5% της επιφάνειας της λεκάνης φαίνεται να έχει υψηλή συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο ολόκληρης της λεκάνης ενώ το 65% χαρακτηρίζεται από χαμηλή συνεισφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τρεις μεγάλες υπολεκάνες του Φουρνιώτικου εμφανίζουν μικρή κλίση και μεγάλο χρόνο συγκεντρώσεως. Συνολικά η λεκάνη του Φουρνιώτικου αναμένεται να είναι χαμηλή έως μεσαία, αποτέλεσμα συμβατό και με τα αποτελέσματα της μεθόδου SCS.
- **Μεγάλο Ρέμα.** Συνολικά μόνο το 16% της επιφάνειας της λεκάνης φαίνεται να έχει υψηλή συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο ενώ το 61% χαρακτηρίζεται από χαμηλή συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο. Οι ορεινές λεκάνες μεσαίου μεγέθους οι οποίες πηγάζουν από τον Κερκετέα εμφανίζουν το μεγαλύτερο δυναμικό εξαιτίας των υψηλών κλίσεων και της μέτριας βλάστησης. Συνολικά το μεγάλο ρέμα φαίνεται να έχει μεγαλύτερη πλημμυρική επικινδυνότητα σε σχέση με το Φουρνιώτικο εξαιτίας και του μικρότερου χρόνου συγκεντρώσεως που το χαρακτηρίζει.

- **Ίμβρασος.** Μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του Ίμβρασου (47%) έχει υψηλή συνεισφορά στον πλημμυρικό κίνδυνο ενώ το 34% χαρακτηρίζεται από χαμηλή συνεισφορά. Οι υπό-λεκάνες οι οποίες εμφανίζουν υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο πηγάζουν από το όρος Μπουρνιάς και την Άμπελο και αναμένεται να εμφανίζουν υψηλές παροχές καθώς η βλάστηση σε αυτά τα τμήματα δεν είναι ιδιαίτερα πυκνή εξαιτίας των παλιότερων εκτεταμένων πυρκαγιών. Συνολικά η πλημμυρική επικινδυνότητα του Ίμβρασου χαρακτηρίζεται ως υψηλή.
- **Ρέμα Μελέτη.** Το Ρέμα Μελέτη απαρτίζεται μόνο από μια υδρογραφική λεκάνη τρίτης τάξης κατά Strahler, και χαρακτηρίζεται ως μεσαίας επικινδυνότητας όταν συγκριθεί με τις αντίστοιχες τρίτης τάξεις υπολεκάνες των άλλων λεκανών.

Συνοψίζοντας οι μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο στην εκτίμηση του κινδύνου από φυσικές καταστροφές καθώς συνδυάζουν τις διάφορες παραμέτρους πιο αποδοτικά για την ιεράρχηση του κινδύνου σε μια περιοχή, είτε αυτός αφορά τις πλημμύρες είτε τη διάβρωση. Μέσω αυτών μπορούν να σχεδιαστούν καλύτερα τα έργα υποδομής, και οι πρακτικές διαχείρισης των περιοχών υπό μελέτη. Σε περιπτώσεις μάλιστα όπου έχουμε κάποια απότομη περιβαλλοντική μεταβολή (για παράδειγμα μια μεγάλη δασική πυρκαγιά) οι μεθολογίες τεχνητής νοημοσύνης μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στα νέα δεδομένα.

Η παρούσα διατριβή συνεισφέρει στο να διευρύνει τους ορίζοντες για περαιτέρω έρευνα των φαινομένων της διάβρωσης και των πλημμυρών μέσω σύγχρονων μεθοδολογιών. Με τη κατάλληλη χρηματοδότηση μπορούν να τοποθετηθούν όργανα μέτρησης της παροχής και της στερεοπαροχής στο υδρογραφικό δίκτυο για μεγάλο χρονικό διάστημα κάτι το οποίο θα μας επιτρέψει να εφαρμόσουμε πιο ακριβή μοντέλα για τα περιβαλλοντικά προβλήματα της περιοχής και θα μας δώσει τη δυνατότητα καλύτερης επαλήθευσης των προταθέντων μοντέλων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Afanasiev, J. N. (1927). *The Classification Problem in Russian Soil Science, Russian Pedological Investigation no. 5.*
- Agassi, M. (Ed.). (1995). *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation* (First). CRC Press.
- Aggarwal, C. C. (2018). Neural Networks and Deep Learning - A Textbook. In *Machine Learning*.
- Agriculture), N. (United S. D. of. (1986). *Urban hydrology for small watersheds Technical Release 55 (TR-55).*
- Aguado, D., Montoya, T., Borrás, L., Seco, A., & Ferrer, J. (2008). Using SOM and PCA for analysing and interpreting data from a P-removal SBR. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.08.001>
- Aksoy, H., & Kavvas, M. L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>
- Alahakoon, D., Halgamuge, S. K., & Srinivasan, B. (2000). Dynamic self-organizing maps with controlled growth for knowledge discovery. *IEEE Transactions on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/72.846732>
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. In *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Alewell, C., Egli, M., & Meusburger, K. (2015). An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0920-6>
- Alexandridis, T. K., Sotiropoulou, A. M., Bilas, G., Karapetsas, N., & Silleos, N. G. (2015). The Effects of Seasonality in Estimating the C-Factor of Soil Erosion Studies. *Land Degradation and Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.2223>
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>
- Angima, S. D., Stott, D. E., O'Neill, M. K., Ong, C. K., & Weesies, G. A. (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00011-2)

- Arbelaitz, O., Gurrutxaga, I., Muguerza, J., Pérez, J. M., & Perona, I. (2013). An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern Recognition*.
<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.07.021>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Ayalew, D. A., Deumlich, D., Šarapatka, B., & Doktor, D. (2020). Quantifying the Sensitivity of NDVI-Based C Factor Estimation and Potential Soil Erosion Prediction using Spaceborne Earth Observation Data. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs12071136>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Baoyuan, L., Keli, Z., & Yun, X. (2002). An Empirical Soil Loss Equation. *XII ISCO Conference*.
- Bargiel, D., Herrmann, S., & Jadczyzyn, J. (2013). Using high-resolution radar images to determine vegetation cover for soil erosion assessments. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.049>
- Barling, R. D., Moore, I. D., & Grayson, R. B. (1994). A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/93WR03346>
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards*.
<https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>
- Barton, A. P., Fullen, M. A., Mitchell, D. J., Hocking, T. J., Liu, L., Wu Bo, Z., Zheng, Y., & Xia, Z. Y. (2004). Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.034>
- Bazzoffi, P., & Gardin, L. (2011). Effectiveness of the GAEC standard of cross compliance retain terraces on soil erosion control. *Italian Journal of Agronomy*.
<https://doi.org/10.4081/ija.2011.6.s1.e6>
- Beck, M. B. (1987). Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/WR023i008p01393>

- Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.b141>
- Bellman, R., Kalaba, R., & Zadeh, L. (1966). Abstraction and pattern classification. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(66\)90071-0](https://doi.org/10.1016/0022-247X(66)90071-0)
- Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A., & Wirtz, A. (2001). World map of natural hazards - a global view of the distribution and intensity of significant exposures. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1023/A:1011193724026>
- Bethoux, J. P., Gentili, B., Raunet, J., & Tailliez, D. (1990). Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature*, 347, 660. <https://doi.org/10.1038/347660a0>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bhunya, P. K., Singh, P. K., & Mishra, S. K. (2009). Fréchet and chi-square parametric expressions combined with Horton ratios to derive a synthetic unit hydrograph. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.2.274>
- Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
- Boardman, J., & Poesen, J. (2006). Soil Erosion in Europe. In *Soil Erosion in Europe*. <https://doi.org/10.1002/0470859202>
- Böhner, J., & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA - Analysis and Modelling Applications*. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-4-5>
- Bolón-Canedo, V., Sánchez-Marroño, N., & Alonso-Betanzos, A. (2011). Feature selection and classification in multiple class datasets: An application to KDD Cup 99 dataset. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.028>
- Bouchon-Meunier, B., Dotoli, M., & Maione, B. (1996). On the choice of membership functions in a mamdani-type fuzzy controller. *Proceedings of the First Online Workshop on Soft Computing*.
- Boughton, W. C. (1989). A review of the USDA SCS curve number method. *Australian Journal of Soil Research*. <https://doi.org/10.1071/SR9890511>

- Brazier, R. E., Parsons, A. J., Wainwright, J., Powell, D. M., & Schlesinger, W. H. (2007). Upscaling understanding of nitrogen dynamics associated with overland flow in a semi-arid environment. *Biogeochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9070-x>
- Brogli, R., Sørland, S. L., Kröner, N., & Schär, C. (2019). Causes of future Mediterranean precipitation decline depend on the season. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4438>
- BURROUGH, P. A., MACMILLAN, R. A., & van DEURSEN, W. (1992). Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00129.x>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). Data models and axioms: formal abstractions of reality. *Principles of Geographical Information Systems*. <https://doi.org/10.2307/144481>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). Data models and axioms: formal abstractions of reality. *Principles of Geographical Information Systems*. <https://doi.org/10.2307/144481>
- Burt, T., & Butcher, D. (1986). Stimulation from simulation? a teaching model of hillslope hydrology for use on microcomputers. *Journal of Geography in Higher Education*. <https://doi.org/10.1080/03098268608708953>
- Buttafuoco, G., Conforti, M., Aucelli, P. P. C., Robustelli, G., & Scarciglia, F. (2012). Assessing spatial uncertainty in mapping soil erodibility factor using geostatistical stochastic simulation. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1317-0>
- Casey, K. S., Brandon, T. B., Cornillon, P., & Evans, R. (2010). The past, present, and future of the AVHRR pathfinder SST program. In *Oceanography from Space: Revisited* (pp. 273–287). Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8681-5_16
- Catani, F., Segoni, S., & Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>
- Chandrashekar, G., & Sahin, F. (2014). A survey on feature selection methods. *Computers and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.11.024>
- Chang, K. (2006). *Introduction to Geographic Information Systems* (3rd editio). McGraw Hill.
- Chen, J., Li, Q., Wang, H., & Deng, M. (2020). A machine learning ensemble approach based on random forest and radial basis function neural network for risk evaluation of regional flood disaster: A case study of the yangtze river delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010049>

- Chen, T., Niu, R. qing, Li, P. xiang, Zhang, L. pei, & Du, B. (2011). Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: A case study in Miyun Watershed, North China. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0715-z>
- Cheng, Q., Ko, C., Yuan, Y., Ge, Y., & Zhang, S. (2006). GIS modeling for predicting river runoff volume in ungauged drainages in the Greater Toronto Area, Canada. *Computers and Geosciences*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.005>
- Cholet, F. (2018). *Deep Learning with Python*. Manning Publication.
- Chouvatut, V., & Wattanapairotrat, S. (2019). Feature reduction from correlation matrix for classification of two basil species in common genus. *JCSSE 2019 - 16th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering: Knowledge Evolution Towards Singularity of Man-Machine Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/JCSSE.2019.8864221>
- Churchill, R. R. (1981). Aspect-related differences in badlands slope morphology. *Annals of the Association of American Geographers*. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1981.tb01363.x>
- Ciolkosz, E. J., Waltman, W. J., Simpson, T. W., & Dobos, R. R. (1989). Distribution and genesis of soils of the northeastern United States. *Geomorphology*. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(89\)90016-0](https://doi.org/10.1016/0169-555X(89)90016-0)
- Clarkson, T. G. (1996). Introduction to neural networks. *Neural Network World*. <https://doi.org/10.1201/9781482277180-13>
- Collins, D. B. G. (2004). Modeling the effects of vegetation-erosion coupling on landscape evolution. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2003jf000028>
- Coşkun, M., & Turan, A. N. U. (2016). The Comparison of the Forms of Land Capability Classification of Atalay and USA in Eskişehir Province (Turkey). *Journal of Geoscience and Environment Protection*. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.413005>
- Costa, J. E. (1987). A comparison of the largest rainfall-runoff floods in the United States with those of the People's Republic of China and the world. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90146-6)
- Cronshey, R. G., & Theurer, F. G. (1998). AnnAGNPS non-point pollutant loading model. *Proceedings First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*.
- Cuadros-Vargas, E., & Francelin Romero, R. A. (2002). A SAM-SOM family: Incorporating spatial access methods into constructive self-organizing maps. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/ijcnn.2002.1007660>

- da Silva, I. N., Spatti, D. H., Flauzino, R. A., Liboni, L. H. B., & dos Reis Alves, S. F. (2017). Artificial neural networks: A practical course. In *Artificial Neural Networks: A Practical Course*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>
- Daniels, R. B., & Hammer, R. D. (1992). *Soil Geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Das, G., Chattopadhyay, M., & Gupta, S. (2016). A comparison of self-organising maps and principal components analysis. *International Journal of Market Research*. <https://doi.org/10.2501/IJMR-2016-039>
- D'Asaro, F., & Grillone, G. (2012). Empirical investigation of curve number method parameters in the Mediterranean area. *Journal of Hydrologic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000570](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000570)
- Davie, T. (2008). *Routledge Fundamentals of Physical Geography* (J. Gerrard (Ed.); 2nd ed.). Routledge.
- de Asis, A. M., & Omasa, K. (2007). Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.05.013>
- De Jong, S. M. (1994). Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment. *Nederlandse Geografische Studies*. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(95\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0169-555x(95)90022-1)
- De La Rosa, D., Mayol, F., Moreno, J. A., Bonsón, T., & Lozano, S. (1999). An expert system/neural network model (ImpelERO) for evaluating agricultural soil erosion in Andalusia region, southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00050-X)
- De Risi, R., Jalayer, F., & De Paola, F. (2015). Meso-scale hazard zoning of potentially flood prone areas. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.070>
- de Vente, J., & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
- der Knijff, J. M. F., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (1999). *Soil erosion risk assessment in Italy*. Citeseer.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1995). GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information. *Catena*, 25, 389–401. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00019-O](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00019-O)

- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. -L., & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090311>
- Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, *114*, 813–822. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- Dixon, B., & Uddameri, V. (2016). GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering. In *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9781118826171>
- Doherty, J., & Welter, D. (2010). A short exploration of structural noise. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2009WR008377>
- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P., & Ludwig, F. (2017). Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1971-7>
- Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A., & Kirsch, T. D. (2013). The Human Impact of Earthquakes: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review. *PLoS Currents*. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.67bd14fe457f1db0b5433a8ee20fb833>
- Dregne, H. E. (1992). Erosion and soil productivity in Asia. *Journal of Soil & Water Conservation*.
- Dubois, C., Somot, S., Calmanti, S., Carillo, A., Déqué, M., Dell’Aquila, A., Elizalde, A., Gualdi, S., Jacob, D., L’Hévéder, B., Li, L., Oddo, P., Sannino, G., Scoccimarro, E., & Sevault, F. (2012). Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean Sea in an ensemble of coupled atmosphere-ocean regional climate models. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1261-4>
- Dubois, D., & Parde, H. (2000). Fundamentals of Fuzzy Sets. In *Fundamentals of Fuzzy Sets, The Handbooks of Fuzzy Sets Series*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4429-6>

- Dubois, D., & Prade, H. (1997). The three semantics of fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00080-8)
- Dudoit, S., & Fridlyand, J. (2002). A prediction-based resampling method for estimating the number of clusters in a dataset. *Genome Biology*. <https://doi.org/10.1186/gb-2002-3-7-research0036>
- Dunn, M., & Hickey, R. (1998). The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography*, 27(1), 9–15. <https://doi.org/10.1080/00690805.1998.9714086>
- Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>
- EC. (2007). DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., & Karavitis, C. (2017). Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1404068>
- Eliasson, Å. (2007). Review of Land Evaluation Methods for Quantifying Natural Constraints to Agriculture. In *The Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, Ispra, (Italy)*.
- El-Shahat, A. (2018). Introductory Chapter: Artificial Neural Networks. In *Advanced Applications for Artificial Neural Networks*. IntechOpen.
- Emery, K. A. (1986). *Rural land capability mapping*. <https://www.environment.nsw.gov.au/-/media/OEH/Corporate-Site/Documents/Land-and-soil/rural-land-capability-mapping.pdf>
- ESDAC. (n.d.). *European Soil Data Centre (ESDAC)*, esdac.jrc.ec.europa.eu, *European Commission, Joint Research Centre*.
- Evelpidou, N., Kampolis, I., & Karkani, A. (2018). Geomorphic Features Associated with Erosion. In *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1201/9781315166841-10>
- Evelpidou, N., Vassilopoulos, A., Leonidopoulou, D., & Poulos, S. (2008). AN INVESTIGATION OF THE COASTAL EROSION CAUSES IN SAMOS ISLAND , EASTERN AEGEAN SEA. *Tájökológiai Lapok*.
- Fairfield, J., & Leymarie, P. (1991). Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27(5), 709–717. <https://doi.org/10.1029/90WR02658>

- Fang, H. ., Cai, Q. G., & Li, Q. Y. (2011). Influence of slope exposure to runoff yield and sediment production in loess hilly region. *Soil Water Conservation China*, 21(5), 39–42.
- Fang, H. yan, & Guo, M. (2015). Aspect-induced differences in soil erosion intensity in a gullied hilly region on the Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4648-4>
- FAO. (2015). Impact of natural hazards and disasters on agriculture and food security and nutrition. In *FAO report*.
- Feng, Q., Zhao, W., Ding, J., Fang, X., & Zhang, X. (2018). Estimation of the cover and management factor based on stratified coverage and remote sensing indices: a case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Soils and Sediments*.
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1783-4>
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2617>
- Flexer, A. (1999). On the use of self-organizing maps for clustering and visualization. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. <https://doi.org/10.3233/ida-2001-5502>
- Foody, G. M., & Arora, M. K. (1997). An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.1080/014311697218764>
- Fritzke, B. (1994). Growing cell structures-A self-organizing network for unsupervised and supervised learning. *Neural Networks*. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0893-6080(94)90091-4)
- Garcia Rodriguez, J. L., & Gimenez Suarez, M. C. (2012). Methodology for estimating the topographic factor LS of RUSLE3D and USPED using GIS. *Geomorphology*.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.001>
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Gayen, A., & Saha, S. (2017). Application of weights-of-evidence (WoE) and evidential belief function (EBF) models for the delineation of soil erosion vulnerable zones: a study on Pathro river basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*.
<https://doi.org/10.1007/s40808-017-0362-4>

- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., & Savenije, H. H. G. (2011). Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., & Savenije, H. H. G. (2011). Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
- Gholami, V., Booij, M. J., Nikzad Tehrani, E., & Hadian, M. A. (2018). Spatial soil erosion estimation using an artificial neural network (ANN) and field plot data. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.027>
- Giles, R. (1976). Łukasiewicz logic and fuzzy set theory. *International Journal of Man-Machine Studies*. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(76\)80003-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(76)80003-X)
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Goguen, J. A. (1967). L-fuzzy sets. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(67\)90189-8](https://doi.org/10.1016/0022-247X(67)90189-8)
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Gorricha, J., & Lobo, V. (2012). Improvements on the visualization of clusters in geo-referenced data using Self-Organizing Maps. *Computers and Geosciences*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.008>
- GOURNELOS, T., EVELPIDOU, N., KARKANI, A., & KARDARA, E. (2018). Recognition of erosion risk areas using Neural Network Technology: an application to the Island of Corfu. *Revista de Geomorfologie*. <https://doi.org/10.21094/rg.2018.020>
- Gray, D. M. (1961). Synthetic unit hydrographs for small drainage areas. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 87(4), 33–54.
- Greve, P., Orłowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., & Seneviratne, S. I. (2014). Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/NGEO2247>

- Güntner, A., Seibert, J., & Uhlenbrook, S. (2004). Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/2003WR002864>
- Gupta, V. K., Waymire, E., & Wang, C. T. (1980). A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/WR016i005p00855>
- Haan, C. T., Barfield, B. J., & Hayes, J. C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*.
[https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(96\)90037-2](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(96)90037-2)
- Harman, C., & Sivapalan, M. (2009). A similarity framework to assess controls on shallow subsurface flow dynamics in hillslopes. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/2008WR007067>
- Harris, T. M., & Boardman, J. (1998). Alternative Approaches to Soil Erosion Prediction and Conservation Using Expert Systems and Neural Networks. In J. Boardman & D. Favis-Mortlock (Eds.), *Modelling Soil Erosion by Water* (pp. 461–477). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Heimsath, A. M., Dietrichs, W. E., Nishiizuml, K., & Finkel, R. C. (1997). The soil production function and landscape equilibrium. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/41056>
- Heimsath, A. M., Dietrichs, W. E., Nishiizuml, K., & Finkel, R. C. (1997). The soil production function and landscape equilibrium. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/41056>
- Hengl, T., & Evans, I. S. (2009). Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In Tomislav Hengl & H. I. B. T.-D. in S. S. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (Vol. 33, pp. 31–63). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00002-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00002-0)
- Hergarten, S., Winkler, G., & Birk, S. (2014). Transferring the concept of minimum energy dissipation from river networks to subsurface flow patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4277-2014>
- Hickey, R. (2000). Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography*, 29(1), 1–8.
<https://doi.org/10.1080/00690805.2000.9714334>
- Hickey, R., Smith, A., & Jankowski, P. (1994). Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO grid. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18(5), 365–380.
[https://doi.org/10.1016/0198-9715\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0198-9715(94)90017-5)
- Hjerdt, K. N., McDonnell, J. J., Seibert, J., & Rodhe, A. (2004). A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/2004WR003130>

- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., & Pegion, P. (2012). On the increased frequency of mediterranean drought. *Journal of Climate*.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1>
- Hoffmann, A., da Silva, M. A., Naves Silva, M. L., Curi, N., Klinke, G., & de Freitas, D. A. F. (2013). Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models. In *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*.
<https://doi.org/10.5772/54439>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Howard, A. D. (1990). Theoretical model of optimal drainage networks. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/WR026i009p02107>
- Hurrell, J. W., & Deser, C. (2010). North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems*, 79, 231–244.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.026>
- Hyndman, D., & Hyndman, D. (2016). *Natural Hazards and Disasters* (5th ed.). Cengage Learning.
- Inglezakis, V. J., Pouloupoulos, S. G., Arkhangelsky, E., Zorpas, A. A., & Menegaki, A. N. (2016). Aquatic Environment. In S. Pouloupoulos & V. Inglezakis (Eds.), *Environment and Development: Basic Principles, Human Activities, and Environmental Implications* (1st ed., pp. 137–212). Elsevier.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In R. Pachauri, L. Meyer, & The Core Writing Team (Eds.), *Ipcc*.
- IPCC, C. C. (2007). *The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ismail, S., Shabri, A., & Samsudin, R. (2011). A hybrid model of self-organizing maps (SOM) and least square support vector machine (LSSVM) for time-series forecasting. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.107>
- Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C., Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Damm, A., Sakalli, A., & van Vliet, M. T. H. (2018). Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming. *Earth's Future*.
<https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P.

- (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jain, M. K., & Das, D. (2010). Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and remote sensing. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9540-0>
- Jalayer, F., De Risi, R., De Paola, F., Giugni, M., Manfredi, G., Gasparini, P., Topa, M. E., Yonas, N., Yeshitela, K., Nebebe, A., Cavan, G., Lindley, S., Printz, A., & Renner, F. (2014). Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1119-2>
- Jenny, H. (1941). Factors of Soil Formation. *Soil Science*. <https://doi.org/10.1097/00010694-194111000-00009>
- Jetten, V., De Roo, A., & Favis-Mortlock, D. (1999). Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena*. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00037-5)
- Jetten, V., Govers, G., & Hessel, R. (2003). Erosion models: Quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>
- Johnson, D. L., & Hole, F. D. (1994). Soil formation theory: a summary of its principal impacts on geography, geomorphology, soil-geomorphology, Quaternary geology and paleopedology. *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.*, 33, 111–126. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub33.c7>
- Jonkman, S. N. (2005). Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-8891-3>
- Jonkman, S. N., Van Gelder, P. H. A. J. M., & Vrijling, J. K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. In *Journal of Hazardous Materials*. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00283-2)
- Kapsomenakis, J., Nastos, P. T., Douvis, C., Eleftheratos, K., & Zerefos, C. . (2011). Estimation of precipitation change over Greece during the 21st century, using RCM simulations. In N. Lambrakis, G. Stournaras, & K. Katsanou (Eds.), *Advances in the Research of Aquatic Environment Vol.1* (pp. 57–66). Springer-Verlag.
- Karydas, C. G., Panagos, P., & Gitas, I. Z. (2014). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*. <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
- Karymbalis, E., Ferentinou, M., & Giles, P. T. (2018). Use of morphometric variables and self-organizing maps to identify clusters of alluvial fans and catchments in the north

Peloponnese, Greece. In *Geological Society Special Publication*.
<https://doi.org/10.1144/SP440.7>

- Kirkby, M. J. (1976). Tests of the random network model, and its application to basin hydrology. *Earth Surface Processes*. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010302>
- Kirkby, M. J., Jones, R., Irvine, B., Gobin, a., Govers, G., Cerdan, O., Rompaey, A. J. J. Van, Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., ... Huting, J. (2004). Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.P.I.04.73). *European Soil Bureau Research Report. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg*.
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, A. J., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblaser, F., Fiore, A. M., Kimoto, M., Meehl, G., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G., & Wang, H. J. (2013). Near-term climate change: Projections and predictability. In *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.023>
- Kleidon, A., Zehe, E., Ehret, U., & Scherer, U. (2013). Thermodynamics, maximum power, and the dynamics of preferential river flow structures at the continental scale. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-17-225-2013>
- Klement, E. P., Mesiar, R., & Pap, E. (2005). Triangular norms. basic notions and properties. In *Logical, Algebraic, Analytic and Probabilistic Aspects of Triangular Norms*. <https://doi.org/10.1016/B978-044451814-9/50002-1>
- Klingebiel, A. A., & Montgomery, P. H. (1961). *Land-capability classification (Handbook No. 210)* (Issue 210). Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
- Knight, D. W. (2006). Introduction to flooding and river basin modelling. In D. W. Knight & A. Y. Shamseldin (Eds.), *RIVER BASIN MODELLING FOR FLOOD RISK MITIGATION* (p. 592). Taylor & Francis Group plc.
- Koikkalainen, P., & Oja, E. (1990). Self-organizing hierarchical feature maps. *IJCNN. International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/ijcnn.1990.137727>
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L. H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J. M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., ... Vacca, A. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00062-8)

- Kourgialas, N. N., Koubouris, G. C., Karatzas, G. P., & Metzidakis, I. (2016). Assessing water erosion in Mediterranean tree crops using GIS techniques and field measurements: the effect of climate change. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2354-5>
- Kron, W. (2012). Changing flood risk – a re-insurer’s viewpoint. In Z. W. Kundzew (Ed.), *Changes in Flood Risk in Europe* (Special Pu, pp. 459–490). IAHS Press.
- Kron, W. (2015). Flood disasters - A global perspective. *Water Policy*. <https://doi.org/10.2166/wp.2015.001>
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., Huang, S., Milly, P. C. D., Stoffel, M., Driessen, P. P. J., Matczak, P., Quevauviller, P., & Schellnhuber, H. J. (2017). Differences in flood hazard projections in Europe—their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Kundzewicz, Z. W., Pin’skwar, I., & Brakenridge, G. R. (2018). Changes in river flood hazard in Europe: A review. *Hydrology Research*. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.016>
- Kuznetsov, M. S., Gendugov, V. M., Khalilov, M. S., & Ivanuta, A. A. (1998). An equation of soil detachment by flow. *Soil and Tillage Research*, 46(1), 97–102. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)80111-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)80111-6)
- Lagacherie, P., Álvaro-Fuentes, J., Annabi, M., Bernoux, M., Bouarfa, S., Douaoui, A., Grünberger, O., Hammani, A., Montanarella, L., Mrabet, R., Sabir, M., & Raclot, D. (2018). Managing Mediterranean soil resources under global change: expected trends and mitigation strategies. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1239-9>
- Lal, R. (2017). Soil erosion research methods. In *Soil Erosion Research Methods*. <https://doi.org/10.1201/9780203739358>
- Langley, P. (Institute for the S. of L. and E. (1994). Selection of Relevant Features in Machine Learning. In *Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Relevance*. <https://doi.org/10.1.1.43.4648>
- Larned, S. T., Datry, T., Arscott, D. B., & Tockner, K. (2010). Emerging concepts in temporary-river ecology. *Freshwater Biology*, 55, 717–738. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02322.x>
- Li, X., & Juhola, M. (2014). Country crime analysis using the self-organizing map, with special regard to demographic factors. *AI and Society*. <https://doi.org/10.1007/s00146-013-0441-7>
- Licznar, P., & Nearing, M. A. (2003). Artificial neural networks of soil erosion and runoff prediction at the plot scale. *Catena*. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00147-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00147-9)

- Licznar, P., & Nearing, M. A. (2003). Artificial neural networks of soil erosion and runoff prediction at the plot scale. *Catena*. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00147-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00147-9)
- Ligonja, P. J., & Shrestha, R. P. (2015). Soil erosion assessment in kondoia eroded area in Tanzania using universal soil loss equation, geographic information systems and socioeconomic approach. *Land Degradation and Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.2215>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). Remote sensing and image interpretation. In *New York Chichester Brisbane Toronto 6IS s*.
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U., & Xoplaki, E. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. In *Developments in Earth and Environmental Sciences*. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- Liu, Y., Fu, B. J., Lü, Y. H., Gao, G. Y., Wang, S., & Zhou, J. (2013). Linking vegetation cover patterns to hydrological responses using two process-based pattern indices at the plot scale. *Science China Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4626-1>
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., & López, L. (2009). A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2049-2009>
- Longley, P. A., & Frank Goodchild, M. (2020). Geographic Information Science and Systems. In *International Encyclopedia of Human Geography*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102295-5.10557-8>
- Loritz, R., Kleidon, A., Jackisch, C., Westhoff, M., Ehret, U., Gupta, H., & Zehe, E. (2019). A topographic index explaining hydrological similarity by accounting for the joint controls of runoff formation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-68>
- M, H., & M.N, S. (2015). A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>
- Mahmoud, E. A., Sayed, A. S. A., & Aldabaa, A. A. A. (2019). Land Capability Classification of Wadi Jerafi Basin, North Sinai Egypt. *Alexandria Science Exchange Journal*. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2019.27324>
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)

- Manfreda, S., Di Leo, M., & Sole, A. (2011). Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367)
- Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., & Alessandri, A. (2015). Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dynamics*.
<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2487-3>
- Mariotti, A., Zeng, N., Yoon, J. H., Artale, V., Navarra, A., Alpert, P., & Li, L. Z. X. (2008). Mediterranean water cycle changes: Transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations. *Environmental Research Letters*.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/4/044001>
- Marqués, M. A., & Mora, E. (1992). The influence of aspect on runoff and soil loss in a Mediterranean burnt forest (Spain). *Catena*. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(92\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(92)90007-X)
- Marshall, S. J. B. T.-R. M. in E. S. and E. S. (2013). *Hydrology*. Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05356-2>
- Martínez-Murillo, J. F., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Cerdà, A., & Poesen, J. (2013). Soil erosion and hydrology of the western Mediterranean badlands throughout rainfall simulation experiments: A review. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.001>
- Martini, F., & Loat, R. (2007). Handbook on good practices for flood mapping in Europe. In *European exchange circle on flood mapping*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.027>
- Martinis, S., Kuenzer, C., Wendleder, A., Huth, J., Twele, A., Roth, A., & Dech, S. (2015). Comparing four operational SAR-based water and flood detection approaches. *International Journal of Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1060647>
- Mas, J. F., Puig, H., Palacio, J. L., & Sosa-López, A. (2004). Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling and Software*.
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00161-0)
- McBratney, A. B., & Odeh, I. O. A. (1997). Application of fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00017-7)
- McBratney, A. B., & Odeh, I. O. A. (1997). Application of fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00017-7)

- McGuire, K. J., McDonnell, J. J., Weiler, M., Kendall, C., McGlynn, B. L., Welker, J. M., & Seibert, J. (2005). The role of topography on catchment-scale water residence time. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2004WR003657>
- Mendel, J. M. (2017). Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems. In *Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51370-6>
- Menger, K. (1942). Statistical Metrics. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 535–537.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Mhired, D. A., Dagneu, D. C., Assefa, T. T., Tilahun, S. A., Zaitchik, B. F., & Steenhuis, T. S. (2019). Erosion hotspot identification in the sub-humid Ethiopian highlands. *Ecohydrology and Hydrobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.08.004>
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (1999). Another look at SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:3\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:3(257))
- Mitra, B., Scott, H. D., Dixon, J. C., & McKimmey, J. M. (1998). Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed. *Geoderma*. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00050-0)
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Moore, I. D., & Wilson, J. P. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil & Water Conservation*.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1294–1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Morgan, R. P. C., & Nearing, M. A. (2011). Handbook of Erosion Modelling. In *Handbook of Erosion Modelling*. <https://doi.org/10.1002/9781444328455>
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., & Styczen, M. E. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and

- small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil erosion & Conservation. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Morrow, B. H. (1999). Identifying and mapping community vulnerability. *Disasters*.
<https://doi.org/10.1111/1467-7717.00102>
- Motevalli, A., & Vafakhah, M. (2016). Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1305-8>
- Munro, R. N., Deckers, J., Haile, M., Grove, A. T., Poesen, J., & Nyssen, J. (2008). Soil landscapes, land cover change and erosion features of the Central Plateau region of Tigray, Ethiopia: Photo-monitoring with an interval of 30 years. *Catena*.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.04.009>
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). Interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
<https://doi.org/10.1109/36.377948>
- Nandalal, H. K., & Ratnayake, U. R. (2011). Flood risk analysis using fuzzy models. *Journal of Flood Risk Management*. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01097.x>
- Nastos, P. T., & Zerefos, C. S. (2009). Spatial and temporal variability of consecutive dry and wet days in Greece. *Atmospheric Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.009>
- Nearing, M. A., Wei, H., Stone, J. J., Pierson, F. B., Spaeth, K. E., Weltz, M. A., Flanagan, D. C., & Hernandez, M. (2011). A rangeland hydrology and erosion model. *Transactions of the ASABE*.
- Nikiforoff, C. C. (1949). Weathering and soil evolution. *Soil Science*, 67(3), 219–230.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., & Nobre, C. A. (2016). HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>
- Noël, H., Garbolino, E., Brauer, A., Lallier-Vergès, E., De Beaulieu, J. L., & Disnar, J. R. (2001). Human impact and soil erosion during the last 5000 yrs as recorded in lacustrine

sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps. *Journal of Paleolimnology*. <https://doi.org/10.1023/A:1008134517923>

Nykjaer, L. (2009). Mediterranean Sea surface warming 1985-2006. *Climate Research*, 39, 11–17. <https://doi.org/10.3354/cr00794>

OEH. (2012). The land and soil capability assessment scheme, second approximation: a general rural land evaluation system for New SouthWales. In *Office of Environment and Heritage*. Office of Environment and Heritage.

Orlowsky, B., & Seneviratne, S. I. (2012). Global changes in extreme events: Regional and seasonal dimension. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>

Owusu, S., Mul, M. L., Ghansah, B., Osei-Owusu, P. K., Awotwe-Pratt, V., & Kadyampakeni, D. (2017). Assessing land suitability for aquifer storage and recharge in northern Ghana using remote sensing and GIS multi-criteria decision analysis technique. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0360-6>

Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015). A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>

Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015). A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science and Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>

- Pandey, A., Himanshu, S. K., Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. In *Catena*.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
- Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A., & Trigo, R. M. (2017). Drought trends in the Iberian Peninsula over the last 112 years. *Advances in Meteorology*.
<https://doi.org/10.1155/2017/4653126>
- Pastor, F., Valiente, J. A., & Palau, J. L. (2019). Sea Surface Temperature in the Mediterranean: Trends and Spatial Patterns (1982–2016). *Pure and Applied Geophysics*, 176, 297–309. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1739-z>
- Paton, T. R., Humphreys, G. S., & Mitchell, P. B. (1995). *Soils: A new global view*. Yale University Press.
- Patton, N. R., Lohse, K. A., Godsey, S. E., Crosby, B. T., & Seyfried, M. S. (2018). Predicting soil thickness on soil mantled hillslopes. *Nature Communications*.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05743-y>
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space . *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*.
<https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Pelletier, J. D., & Rasmussen, C. (2009). Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/2008WR007319>
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00393-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0)
- Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F. E., Santoleri, R., & Buongiorno Nardelli, B. (2020). New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing*, 12(132).
<https://doi.org/10.3390/rs12010132>
- Policelli, F., Slayback, D., Brakenridge, B., Nigro, J., Hubbard, A., Zaitchik, B., Carroll, M., & Jung, H. (2017). *The NASA Global Flood Mapping System*.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-43744-6_3
- Polykretis, C., & Chalkias, C. (2018). Comparison and evaluation of landslide susceptibility maps obtained from weight of evidence, logistic regression, and artificial neural network models. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3299-7>
- Poole, D. L., Mackworth, A., & Goebel, R. G. (1998). Computational Intelligence and Knowledge. *Computational Intelligence: A Logical Approach*.

- Poulos, S. E. (2020). The Mediterranean and Black Sea Marine System: An overview of its physico-geographic and oceanographic characteristics. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103004>
- Previati, M., Bevilacqua, I., Canone, D., Ferraris, S., & Haverkamp, R. (2010). Evaluation of soil water storage efficiency for rainfall harvesting on hillslope micro-basins built using time domain reflectometry measurements. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.11.004>
- Priddy, K., & Keller, P. (2005). *Artificial Neural Networks: An Introduction*. SPIE PRESS.
- Quinn, P. F., Beven, K. J., & Lamb, R. (1995). The $\ln(a/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090204>
- Quinn, P. F., Beven, K. J., & Lamb, R. (1995). The $\ln(a/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090204>
- Quinton, J. (2013). Erosion and sediment transport. In J. Wainwright & M. M. (Eds.), *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (pp. 187–196). John Wiley & Sons, Ltd.
- R.V, C., & J.C, D. (1990). *Geomorphology in Environmental Management: a new introduction*. Oxford University Press.
- R.V., C., & Doornkamp, J. C. (1990). *Geomorphology in Environmental Management: A New Introduction* (Second). Oxford University Press.
- Raats, P. A. C. (1973). Dynamics of Fluids in Porous Media. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040004x>
- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A. D., & Melesse, A. M. (2018). Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.004>
- Raj, A. R., George, J., Raghavendra, S., Kumar, S., & Agrawal, S. (2018). Effect of DEM resolution on LS factor computation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-315-2018>
- Ramakrishnan, D., Bandyopadhyay, A., & Kusuma, K. N. (2009). SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*. <https://doi.org/10.1007/s12040-009-0034-5>

- Ramos, M. C., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2006). Erosion rates and nutrient losses affected by composted cattle manure application in vineyard soils of NE Spain. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.004>
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In *Agricultural Handbook No. 703*. <https://doi.org/DC0-16-048938-5> 65–100.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Reusch, D. B., Alley, R. B., & Hewitson, B. C. (2007). North Atlantic climate variability from a self-organizing map perspective. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2006JD007460>
- Robinson, J. S., Sivapalan, M., & Snell, J. D. (1995). On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/95WR01948>
- Rodríguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., Rigon, R., Bras, R. L., Marani, A., & Ijász-Vásquez, E. (1992). Energy dissipation, runoff production, and the three-dimensional structure of river basins. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/91WR03034>
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., & Dosio, A. (2012). Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2012JD017461>
- Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., & Bavera, D. (2011). Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2599-2011>
- Rokach, L., & Maimon, O. (2005). Clustering Methods Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09823-4>
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., & Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>
- Roudier, P., Andersson, J. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., & Ludwig, F. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Progress Report RSC 1978-1*.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Final Report, RSC 1978-4, Texas A & M University, College Station, Texas*.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*.
[https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- Rozos, D., Skilodimou, H. D., Loupasakis, C., & Bathrellos, G. D. (2013). Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. An example from N. Euboea (Evia) Island, Greece. *Environmental Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2390-3>
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & McClelland, J. L. (1986). A General framework for Parallel Distributed Processing. In *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*.
- Rumynin, V. (2015). *Overland Flow Dynamics and Solute Transport*. Springer.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2003). Artificial Intelligence A Modern Approach; Pearson Education. In *Pearson*. <https://doi.org/10.1017/S0269888900007724>
- Saadat, H., Adamowski, J., Tayefi, V., Namdar, M., Sharifi, F., & Ale-Ebrahim, S. (2014). A new approach for regional scale interrill and rill erosion intensity mapping using brightness index assessments from medium resolution satellite images. *Catena*.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.012>
- Sadeghi, S. H. R., Gholami, L., Sharifi, E., Khaledi Darvishan, A., & Homaei, M. (2015). Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. *Solid Earth*. <https://doi.org/10.5194/se-6-1-2015>
- Samuels, P. G. (2006). The European perspective and research on flooding. In D. Knight & A. Y. Shamseldin (Eds.), *RIVER BASIN MODELLING FOR FLOOD RISK MITIGATION: SELECTED PAPERS* (pp. 21–58). Taylor & Francis.
- Sanchez-Gomez, E., Somot, S., & Mariotti, A. (2009). Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2009GL040120>
- Santana, A., Morais, A., & Quiles, M. G. (2017). An alternative approach for binary and categorical self-organizing maps. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2017.7966174>

- Sarkar, T., & Mishra, M. (2018). Soil Erosion Susceptibility Mapping with the Application of Logistic Regression and Artificial Neural Network. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*. <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0015-9>
- Saxena, A., Prasad, M., Gupta, A., Bharill, N., Patel, O. P., Tiwari, A., Er, M. J., Ding, W., & Lin, C. T. (2017). A review of clustering techniques and developments. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.06.053>
- Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schweizer, B., & Sklar, A. (1961). Associative functions and statistical triangle inequalities. *Publ.Math. Debrecen*, 8, 69–81.
- Seager, R., Liu, H., Henderson, N., Simpson, I., Kelley, C., Shaw, T., Kushnir, Y., & Ting, M. (2014). Causes of increasing aridification of the mediterranean region in response to rising greenhouse gases. *Journal of Climate*, 27, 4655–4676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00446.1>
- SEIBERT, J., BISHOP, K. H., & NYBERG, L. (1997). A test of TOPMODEL's ability to predict spatially distributed groundwater levels. *Hydrological Processes*. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199707\)11:9<1131::aid-hyp549>3.3.co;2-r](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199707)11:9<1131::aid-hyp549>3.3.co;2-r)
- Selby, M. J. (1983). Hillslope materials and processes. *Hillslope Materials and Processes*.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
- Sene, K. (2013). Flash Floods. In *Flash Floods*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5164-4>
- Shaltout, M., & Omstedt, A. (2014). Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia*, 56, 411–443. <https://doi.org/10.5697/oc.56-3.411>
- Sharma, A. (2010). Integrating terrain and vegetation indices for identifying potential soil erosion risk area. *Geo-Spatial Information Science*. <https://doi.org/10.1007/s11806-010-0342-6>
- Sharma, V. K., Rao, G. S., Bhatt, C. M., Shukla, A. K., Mishra, A. K., & Bhanumurthy, V. (2017). Automatic procedures analyzing remote sensing data to minimize flood response time: a step towards National flood mapping service. *Spatial Information Research*. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0132-4>
- Shary, P. A., Sharaya, L. S., & Mitusov, A. V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)

- Sheffield, J., Wood, E. F., & Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature11575>
- Shepherd, T. G. (2014). Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. In *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/NGEO2253>
- Sherman, L. R. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00332>
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*, 2473–2493. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>
- Singh, P. K., Mishra, S. K., & Jain, M. K. (2014). A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.870664>
- Sivapalan, M. (2003). Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection? *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.5109>
- Skirris, N., Sofianos, S., Gkanasos, A., Mantziafou, A., Vervatis, V., Axaopoulos, P., & Lascaratos, A. (2012). Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, *62*, 13–30. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0493-5>
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- Tan, H. Sen, & George, S. E. (2004). Investigating learning parameters in a standard 2-D SOM model to select good maps and avoid poor ones. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30549-1_38

- Tan, P.-N., Steinbach, M., Karpante, A., & Kumar, V. (2019). *Introduction to data mining* (2nd ed.). Pearson.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., & Iaquinta, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.009>
- Tosic, R., Dragicevic, S., Kostadinov, S., & Dragovic, N. (2011). Assessment of soil erosion potential by the USLE method: Case study, Republic of Srpska - BiH. *Fresenius Environmental Bulletin*.
- Trenbeth, K. E., Caron, J. M., Stepaniak, D. P., & Worley, S. (2002). Evolution of El Niño-Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 107(D8), AAC 5-1-AAC 5-17.
<https://doi.org/10.1029/2000jd000298>
- Troeh, F. R., Hobbs, J. A., & Donahue, R. L. (1991). No Title. In *Conservation, Soil and Water* (Second, p. 530). Prentice-Hall.
- Truman, C. C., Wauchope, R. D., Sumner, H. R., Davis, J. G., Gascho, G. J., Hook, J. E., Chandler, L. D., & Johnson, A. W. (2001). Slope length effects on runoff and sediment delivery. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. In *Trends in Ecology and Evolution*. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- U.S. Department of Agriculture, S. C. S. (1972). Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook*. U.S. Gov. Print Office.
- Valentin, C., Agus, F., Alamban, R., Boosaner, A., Bricquet, J. P., Chaplot, V., de Guzman, T., de Rouw, A., Janeau, J. L., Orange, D., Phachomphonh, K., Do Duy Phai, Podwojewski, P., Ribolzi, O., Silvera, N., Subagyono, K., Thiébaux, J. P., Tran Duc Toan, & Vadari, T. (2008). Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.004>

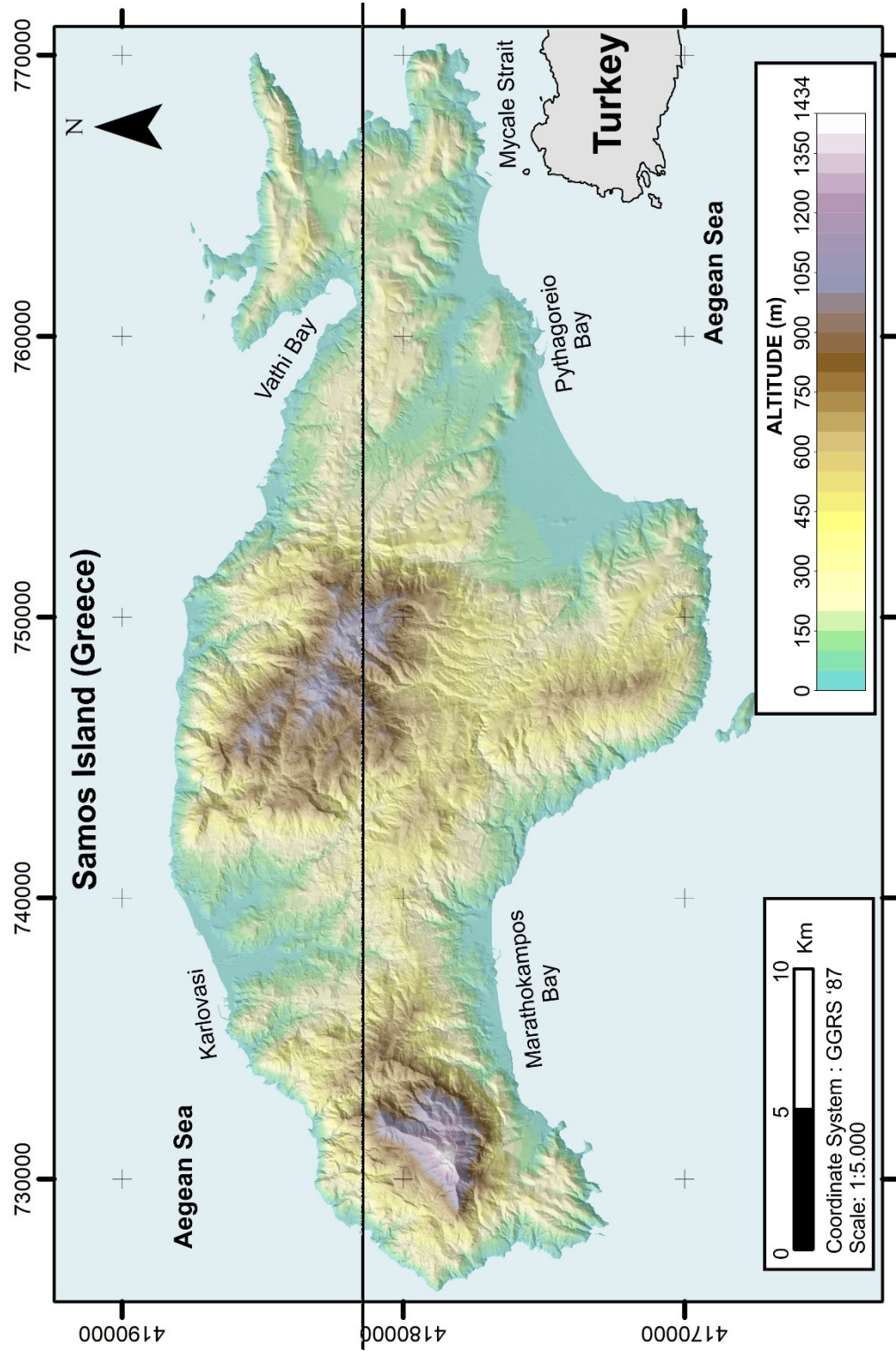
- Van Remortel, R. D., Maichle, R. W., & Hickey, R. J. (2004). Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. *Computers and Geosciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.08.001>
- Van Rompaey, A. J. J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., & Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.275>
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., & Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
- Viney, N. R., & Sivapalan, M. (1999). A conceptual model of sediment transport: Application to the Avon River Basin in Western Australia. *Hydrological Processes*.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<727::AID-HYP776>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<727::AID-HYP776>3.0.CO;2-D)
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*.
<https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wheater, H. S., Jakeman, A. J., & Beven, K. J. (1993). Progress and directions in rainfall-runoff modelling. In *Modelling Change in Environmental Systems*.
- White, J. T., Doherty, J. E., & Hughes, J. D. (2014). Quantifying the predictive consequences of model error with linear subspace analysis. *Water Resources Research*.
<https://doi.org/10.1002/2013WR014767>
- White, R. E. (2006). Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource. In *Blackwell Publishing*. <https://doi.org/10.1002/msj.20251>
- Wilde, S. A. (1946). *Forest soils and forest growth*. Chronica Botanica Co.
- Wilkinson, M. T., & Humphreys, G. S. (2006). Slope aspect, slope length and slope inclination controls of shallow soils vegetated by sclerophyllous heath-links to long-term landscape evolution. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.011>
- Winchell, M. F., Jackson, S. H., Wadley, A. M., & Srinivasan, R. (2008). Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*.
<https://doi.org/10.2489/jswc.63.3.105>

- WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D. (1960). A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Transactions 7th Int. Congr. Soil Sci.*
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. In *U.S. Department of Agriculture Handbook No. 537*. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Torres, R., Azócar, G., Rojas, J., Montecinos, A., Paredes, P., Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2004). At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters - Piers Blaikie, Terry Cannon, Ian Davis, Ben Wisner - Google Books. *Geoforum*. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2014.12.013>
- Wolka, K., Tadesse, H., Garedew, E., & Yimer, F. (2015). Soil erosion risk assessment in the Chaleleka wetland watershed, Central Rift Valley of Ethiopia. *Environmental Systems Research*. <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0030-5>
- Yair, A., Lavee, H., Bryan, R. B., & Adar, E. (1980). Runoff and erosion processes and rates in the Zin valley badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes*. <https://doi.org/10.1002/esp.3760050301>
- Yang, C., Zhen, B., Li, L., Hu, J., & Peng, J. (2011). Application of fractal dimensions and GIS technology in the soil erosion field. *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.271-273.1146>
- Yang, Q., Xie, Y., Li, W., Jiang, Z., Li, H., & Qin, X. (2014). Assessing soil erosion risk in karst area using fuzzy modeling and method of the analytical hierarchy process. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2432-x>
- Young, A. F., & Nobre, C. A. (2012). *Mapping Risk and Vulnerability in São Paulo Metropolitan Region*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4223-9_6
- Yusof, M. F., Azamathulla, H. M., & Abdullah, R. (2014). Prediction of soil erodibility factor for Peninsular Malaysia soil series using ANN. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1236-3>
- Zachar, D. (1982). Soil erosion. *Soil Erosion*. <https://doi.org/10.1079/9780851995939.0325>
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5)
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

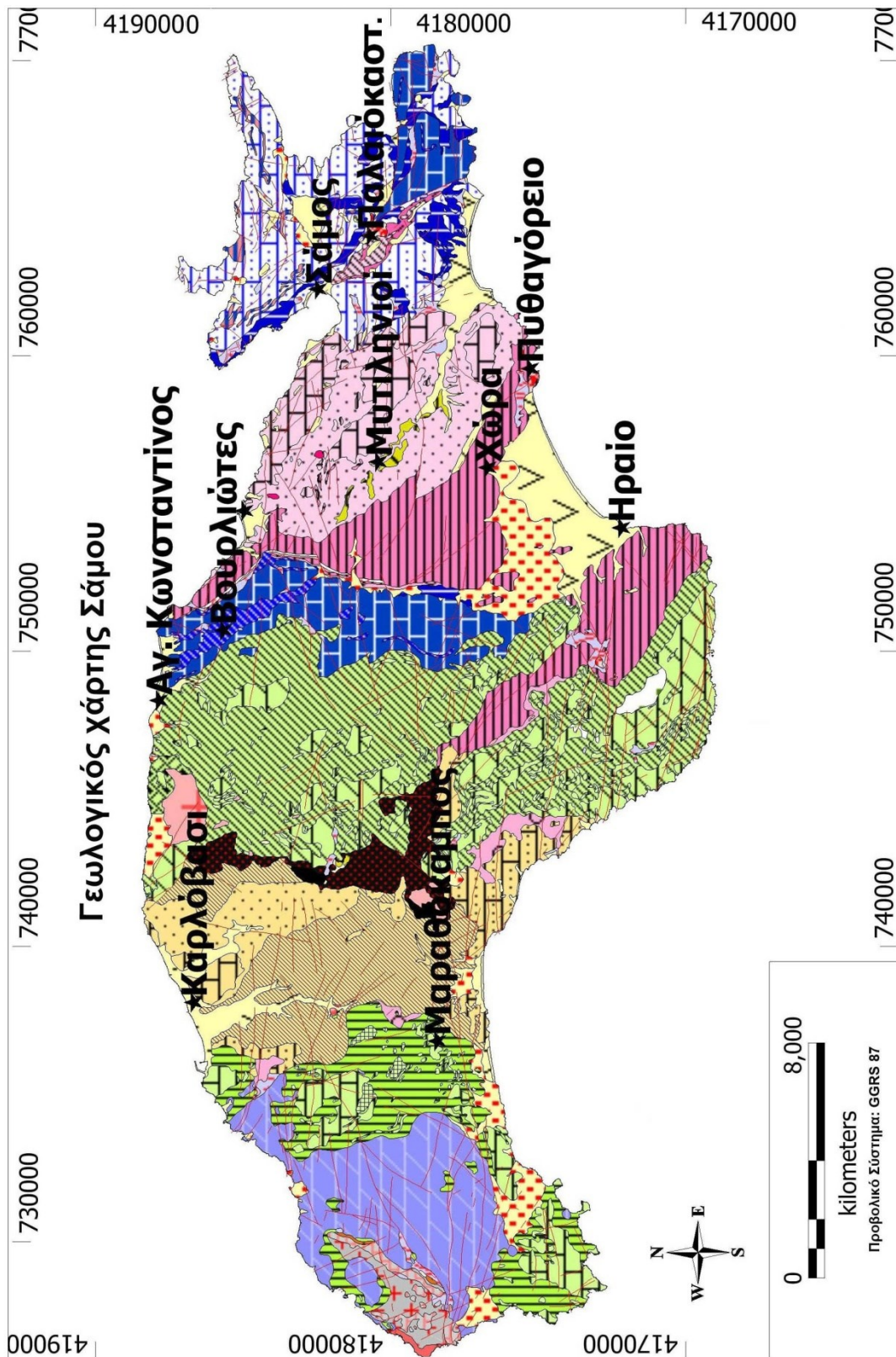
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1700-3>
- Zeng, C., Yang, L., Zhu, A. X., Rossiter, D. G., Liu, J., Liu, J., Qin, C., & Wang, D. (2016). Mapping soil organic matter concentration at different scales using a mixed geographically weighted regression method. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.033>
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>
- Zhang, B., Zhang, Y., Chen, D., White, R. E., & Li, Y. (2004). A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.015>
- Zhang, H., Wei, J., Yang, Q., Baartman, J. E. M., Gai, L., Yang, X., Li, S. Q., Yu, J., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.006>
- Zhang, L., O'Neill, A. L., & Lacey, S. (1996). Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. *Environmental Software*. [https://doi.org/10.1016/S0266-9838\(96\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00023-8)
- ZHENG, F.-L. (2006). Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(06\)60071-4](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(06)60071-4)
- Zhou, W. (1999). Verification of the nonparametric characteristics of backpropagation neural networks for image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/36.752193>
- Zhu, A. X., Yang, L., Li, B., Qin, C., Pei, T., & Liu, B. (2010). Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.024>
- Zinko, U., Seibert, J., Dynesius, M., & Nilsson, C. (2005). Plant species numbers predicted by a topography-based groundwater flow index. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0125-0>
- K., Φ. (2008). *Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης R στον νόμο RUSLE*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Α. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΦΟΥΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΜΟΥ



Β. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΜΟΥ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Γεωλογικοί σχηματισμοί

- | | |
|--|---|
| | 1. Παράκτιες αποθέσεις |
| | 2. Αλλουβιακές αποθέσεις |
| | 3. Αλλουβιακές αποθέσεις μικρών εσωτερικών λεκανών |
| | 4. Σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων |
| | 5. Παλιά πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων |
| | 6. Αποσθρώματα των γύρω πετρωμάτων |
| | 7. Χειμάρρως αναβαθμίδα |
| | 8. Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι ανώτερης σειράς Μυτιληνίων |
| | 9. Κλαστική σειρά λεκάνης Μυτιληνίων |
| | 10. Ενστροφείς τραβερτινοειδών ασβεστολίθων |
| | 11. Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι, μάργες και τόφφοι της κατώτερης σειράς Μυτιλη |
| | 12. Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι ανώτερης σειράς Καρλοβασιού |
| | 13. Κλαστική σειρά λεκάνης Καρλοβασιού |
| | 14. Μάργες σκληρές Καρλοβασιού |
| | 15. Τραβερτινοειδείς παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με τοφφικά υλικά κατώτερης σε |
| | 16. Σχηματισμός Καρλοβασιού με πυροκλαστικά υλικά, πυριτωμένα ιζήματα, ηφαιστί |
| | 17. Πυριτωμένα ιζήματα κατώτερης σειράς Καρλοβασιού |
| | 18. Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι Παλαιαϊκά |
| | 19. Μάργες μικρής συνεκτικότητας Παλαιαϊκάστρου |
| | 20. Βασικό κροκαλοπαγές λεκάνης Παλαιαϊκάστρου |
| | 21. Ηφαιστειακά πετρώματα |
| | 22. Ηφαιστειακοί τόφφοι |
| | 23. Ανωτρίακοι - Ιουρατικοί ασβεστόλιθοι |
| | 24. Βασικά εκρηξιγενή πετρώματα |
| | 25. Περιδοτική μάζα |
| | 26. Κλαστικά πετρώματα |

- | | |
|--|--|
| | 27. Μάρμαρα Ζωοδόχου Πηγής |
| | 28. Ενστροφείς σχιστολίθων Ζωοδόχου Πηγής |
| | 29. Σχιστόλιθοι Κοτσικιά - Ψιλής Άμμου |
| | 30. Ενστροφείς μαρμάρων Κοτσικιά - Ψιλής Άμμου |
| | 31. Μάρμαρα Βουρλιωτών - Σύρραχου |
| | 32. Ενστροφείς σχιστολίθων Βουρλιωτών - Σύρραχου |
| | 33. Μάρμαρα Αμπέλου |
| | 34. Σχιστόλιθοι Αμπέλου |
| | 35. Σχιστόλιθοι Αμπέλου με πολλά μικρά σώματα ηφαισπιτών |
| | 36. Περιδοίτες - σερπεντίνες κεντρικού τμήματος του νησιού |
| | 37. Οφιολιθικά πετρώματα |
| | 38. Μάρμαρα παρυφών Κερκετέα |
| | 39. Σιπολίτες - σιπολινομάρμαρα - αγκερίτες παρυφών Κερκετέα |
| | 40. Σχιστόλιθοι Μαραθόκαμπτου - Κοσμοδαίων |
| | 41. Μάρμαρα Κερκετέα |
| | 42. Φλεβικά εκρηξιγενή πετρώματα Καλλιθέας |

Ρήγματα

- | | |
|--|--------|
| | Βέβαιο |
| | Πιθανό |

Γ. DEMO ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ HAND& DUNE

```
import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Vasileios Kotinas - NKUA - GREECE - vkotinas@geol.uoa.gr -06-2020
# THIS SHORT SCRIPT CALCULATES THE HAND INDEX AND THE DUNE INDEX WHICH ARE
USEFULL MORPHOMETRIC INDICES

#Set input-output-workspace names and initialize some of them
demRaster = arcpy.GetParameterAsText(0)
#Feature Class name
workspace = arcpy.GetParameterAsText(1)
#Output Location
threshold = arcpy.GetParameterAsText(2)
#Set threshold
env.workspace = workspace
#Set input workspace
mxd = arcpy.mapping.MapDocument("CURRENT")
dataFrame = arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd, "*")[0]
filled = "filled"
flow_dir = "flow_dir"
flow_acc = "flow_acc"
flow_len = "flow_length"
baselevel = "baselevel"
baselevel2 = "baselevel2"
riverNet = "riverNet"
river_points = "river_pts.shp"
#MAIN CODE
# Fill DEM and save it
outFill = Fill(demRaster)
outFill.save(filled)

#Create Flowdir raster
FlowDirection = FlowDirection(filled, "")
FlowDirection.save(flow_dir)

#Create FlowAcc raster
arcpy.AddMessage("Creating Flow Accumulation raster")
FlowAccumulation = FlowAccumulation(flow_dir, "", "FLOAT")
FlowAccumulation.save(flow_acc)

#Create River network based on calculated threshold
temp = Con(flow_acc, "1", "", ("value > " + threshold))
temp.save(riverNet)

#Calculate HAND index
arcpy.RasterToPoint_conversion(riverNet, river_points, "VALUE")
#Convert river network to points
temp_base = ExtractValuesToPoints(river_points, demRaster,
elev_of_river_pnt) #Calculate elevation of river points - Keep
default values for no interpolation and no other attributes
arcpy.env.extent = "MAXOF"
# Set the extent environment using max extent of all inputs..
temp_base = Watershed(flow_dir, elev_of_river_pnt, "RASTERVALU")
#Calculate base level (height of pour point for each pixel in the raster)
temp_base.save(baselevel)
```

```

HeightDiff = Minus(demRaster, baselevel)
# Calculate Hand for each point
HAND = Con(HightDiff, 0, HeightDiff, "value <= 0")
#Fix negative values
HAND.save(result)
arcpy.mapping.AddLayer(dataFrame, arcpy.mapping.Layer(result))
#Calculate DUNE index

FlowLength = FlowLength(flow_dir,"DOWNSTREAM", "")
FlowLength.save(flow_len)
temp_base2 = ExtractValuesToPoints(river_points, flow_len,
length_of_river_pnt) #Calculate elevation of river points -
Keep default values for no interpolation and no other attributes
temp_base2 = Watershed(flow_dir, length_of_river_pnt, "RASTERVALU")
#Calculate base level (height of pour point for each pixel in the raster)
LengthDiff = Con(HAND,LengthDiff, 0, "value > 0")
# Fix NA values in river network
LengthDiff = Con(LengthDiff,LengthDiff, 0, "value > 0")
#Fix Artifacts if there
LengthDiff.save(lendif)
DUNE=Divide(HAND,LengthDiff)
DUNE = Con(LengthDiff,DUNE, 0.0000000001, "value >0")
#Fix Division with zero in rivers
DUNE.save(result2)
arcpy.mapping.AddLayer(dataFrame, arcpy.mapping.Layer(result2))
#Calculate Ln indexes..
HANDln=Ln(HAND)
HANDln = Con(HAND,HANDln, -0.7, "value >0.3")
# Fix very low values of HAND & zero values (HAND<0.5m).
HANDln.save(result3)
DUNEln=Ln(DUNE)*(-1)
DUNEln = Con(DUNEln,DUNEln, 9, "value <9")
# Fix -lnDUNE values that are too high. For a ratio of HAND/length<1/1000
apply fix (very flat)
DUNEln = Con(DUNEln,DUNEln, -1.1, "value >-1.1")
# Fix -lnDUNE values that are too low. For a ratio of HAND/DUNE >3/1 apply
fix (very steep)
DUNEln.save(result4)
arcpy.mapping.AddLayer(dataFrame, arcpy.mapping.Layer(result3))
arcpy.mapping.AddLayer(dataFrame, arcpy.mapping.Layer(result4))

```

Δ. DEMO ΚΩΔΙΚΑΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

```
# Vasileios Kotinas - NKUA - GREECE - vkotinas@geol.uoa.gr
# THIS SCRIPT REQUIRES AN ANACONDA ENVIRONMENT CONNECTED WITH ARCGIS AND
# THIS SCRIPT CALCULATES THE SOIL DEPTH BASED ON FUZZY SETS

import arcpy, os, traceback, sys, numpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
import matplotlib.pyplot as plt
arcpy.env.overwriteOutput = True
aprx = arcpy.mp.ArcGISProject('CURRENT')
activeMap = aprx.activeMap
Input1 = arcpy.GetParameterAsText(0)
#Feature Class name
Input2 = arcpy.GetParameterAsText(1)
#Feature Class name
arcpy.CreateFolder_management("C:/", "FuzzyOutSoil2")
data_pts = "C:/FuzzyOutSoil2/data_pts.shp"
fuzSoilDepth="C:/FuzzyOutSoil2/fuzSoilDepth"
temp1=[]
temp2=[]
out_activation=[]
out_activation_low=[]
out_activation_med=[]
arcpy.env.cellSize = "MINOF"
temp= arcpy.GetRasterProperties_management(Input1, "MAXIMUM")
Input1_MAX=float(temp.getOutput(0))
temp= arcpy.GetRasterProperties_management(Input2, "MAXIMUM")
Input2_MAX=float(temp.getOutput(0))
temp= arcpy.GetRasterProperties_management(Input1, "CELLSIZEX")
CellSizeX=float(temp.getOutput(0))
#####
# Generate universe variables - RANGE OF VARIABLES
inp1_range = np.arange(0, Input1_MAX+0.01, 0.1)
inp2_range = np.arange(0, Input2_MAX+0.01, 0.1)
out_range = np.arange(0.,1., 0.01)
# Generate fuzzy membership functions
inp1_lo = fuzz.trimf(inp1_range, [0, 0, 12])
inp1_md = fuzz.trimf(inp1_range, [3, 15, 27])
inp1_hi = fuzz.trimf(inp1_range, [17, 30, 43])
inp1_vhi = fuzz.trimf(inp1_range, [33, Input1_MAX, Input1_MAX])
inp2_lo = fuzz.trimf(inp2_range, [0, 0, 0.3])
inp2_md = fuzz.trimf(inp2_range, [0.15, 0.5, 0.8])
inp2_hi = fuzz.trimf(inp2_range, [0.5, Input2_MAX, Input2_MAX])
out_lo = fuzz.trimf(out_range, [0, 0, 0.25 ])
out_md = fuzz.trimf(out_range, [0.1, 0.4,0.7 ])
out_hi = fuzz.trimf(out_range, [0.45, 0.7,0.95])
out_vhi = fuzz.trimf(out_range, [0.8, 1, 1])

#####
###
#Aggregate and defuzzify
def defuzzification(activ1,activ2,activ3,activ4):
    aggregate= np.fmax(activ4,np.fmax(activ1,np.fmax(activ2,activ3)))
```

```

    result = fuzz.defuzz(out_range, aggregate, 'centroid') #Calculate
deffuzified value
    return(result)

def apply_rules(var1, var2):
#RULES
    #RULE0
    out_activation_low.append(np.fmin(temp1[0], out_hi)) #If slope Low
then soil depth is high
    #RULE1
    rule1 = np.fmin(temp1[0], temp2[2]) # slope low landuse AND high
vegetation
    out_activation_vhi=np.fmin(rule1, out_vhi) # Then very high soil depth
    #RULE2
    rule2 = np.fmin(temp1[1], temp2[2]) # one or another high
    out_activation_hi=np.fmin(rule2, out_hi)
    #RULE3
    rule3 = np.fmin(temp1[1], temp2[1]) # medium slope and medium
vegetation
    out_activation_med.append(np.fmin(rule3, out_md)) # Then very high
soil depth
    #RULE4
    rule4 = np.fmin(temp1[1], temp2[0]) # medium slope low vegetation
    out_activation_low.append(np.fmin(rule4, out_lo))
    #RULE5
    rule5 = np.fmin(temp1[2], temp2[2]) # both are high
    out_activation_med.append(np.fmin(rule5, out_md))
    #RULE6
    out_activation_low.append(np.fmin(temp1[2], out_lo))
    #RULE7
    out_activation_low.append(np.fmin(temp1[3], out_lo))
    #Find Highest Of all activations for those that have multiple rules
resulting to the same output..
    out_activation_lo=numpy.amax(out_activation_low) #Find max in array.
    out_activation_me=numpy.amax(out_activation_med)

result=deffuzification(out_activation_lo,out_activation_me,out_activation_h
i,out_activation_vhi) # De ta sinenosa giati einai pinakas timon...
    out_activation_low.clear()
    out_activation_med.clear()
    return(result)

#Fuzzification
def calc_membership(var1, var2):
#Calculate Membership 2 Inputs (x1-e.g. DEM, x2 e.g. SLOPE) 6 outputs in 2
vectors..
    temp1.append(fuzz.interp_membership(inp1_range, inp1_lo, var1)) #
Membership value for each input value to belong to each class
    temp1.append(fuzz.interp_membership(inp1_range, inp1_md, var1))
    temp1.append(fuzz.interp_membership(inp1_range, inp1_hi, var1))
    temp1.append(fuzz.interp_membership(inp1_range, inp1_vhi, var1))
    temp2.append(fuzz.interp_membership(inp2_range, inp2_lo, var2))
    temp2.append(fuzz.interp_membership(inp2_range, inp2_md, var2))
    temp2.append(fuzz.interp_membership(inp2_range, inp2_hi, var2))
    result=apply_rules(temp1, temp2)
    temp1.clear()
    temp2.clear()
    return(result)

```



```

#MAIN CODE
#GET POINTS IN THE CENTER OF EACH PIXEL to save the information
arcpy.RasterToPoint_conversion(Input1, data_pts)
#Get Points for each cell of the grid
temp = ExtractMultiValuesToPoints(data_pts,
[[Input1,"In1"],[Input2,"In2"]]) #For each point get
value from multiple rasters
data_pts=temp
arcpy.AddField_management(data_pts, field_name="fuzzy_out",
field_type="FLOAT")
#Main Loop
with arcpy.da.UpdateCursor(data_pts, ['In1','In2','fuzzy_out']) as cursor:
    for row in cursor:
        temp_var1=row[0]
        temp_var2=row[1]
        result=calc_membership(temp_var1,temp_var2)
        row[2]=result
        cursor.updateRow(row)

arcpy.PointToRaster_conversion(data_pts, "fuzzy_out",
fuzSoilDepth,cellsize=CellSizeX)

```

E. DEMO ΚΩΔΙΚΑΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ SOM (R PROGR.LANG.)

```
require(tidyverse)
require(magrittr)
setwd('C:\\TempR')

# Colour palette definition
library(RColorBrewer)
library(ggplot2)
library(dplyr)
n <- 60
qual_col_pals = brewer.pal.info[brewer.pal.info$category == 'qual',]
col_vector = unlist(mapply(brewer.pal, qual_col_pals$maxcolors,
rownames(qual_col_pals)))

data <- read.table('C:/TEMP/NNETSOM_input.csv', header = TRUE, sep = ",")

map_dimension = 10
n_iterations = 50
recalculate_map = T
recalculate_no_clusters = T

# prepare data
numerics = summarise_all( data, is.numeric ) %>%
  as.logical()
factors = names(data)%>%
  .[!numerics]
numerics = names(data)%>%
  .[numerics]
data_list = list()
distances = vector()
for (fac in factors){
  data_list[[fac]] = kohonen::classvec2classmat( data[[fac]] )
  distances = c(distances, 'tanimoto')
data_list[['numerics']] = scale(data[,numerics])
distances = c( distances, 'euclidean')
str(data_list)

names(data_list)

#SOM
som_grid = kohonen::somgrid(xdim = map_dimension
, ydim=map_dimension
, topo="hexagonal")
if(recalculate_map == F & file.exists('som.Rdata') == T){
  load('som.Rdata')}
else{
  m = kohonen::supersom( data_list
, grid=som_grid
, rlen= n_iterations
, alpha = 0.05
, whatmap = c(factors, 'numerics')
, dist.fcts = distances
#, user.weights = weight_layers
, maxNA.fraction = .5
)
  save(m, file = 'som.Rdata')}
plot(m, type="changes")
```

```

plot(m, type="counts")
plot(m, type="dist.neighbours")
plot(m, type="codes")
plot(m, type="quality")

#Hierarchical Clustering

# fuse all layers into one dataframe
codes = tibble( layers = names(m$codes)
                , codes = m$codes ) %>%
  mutate( codes = purrr::map(codes, as_tibble) ) %>%
  spread( key = layers, value = codes) %>%
  apply(1, bind_cols) %>%
  .[[1]] %>%
  as_tibble()

# generate distance matrix for codes
dist_m = dist(codes) %>%
  as.matrix()

# generate separate distance matrix for map location
dist_on_map = kohonen::unit.distances(som_grid)
#exponentiate euclidean distance by distance on map
dist_adj = dist_m ^ dist_on_map

# Optimal number of clusters
factoextra::fviz_nbclust(dist_adj, factoextra::hcut, method = "silhouette",
hc_method = "ward.D2", k.max = 5)

#gap statistic
set.seed(123)
gap_stat = cluster::clusGap(dist_adj
                            , FUN = factoextra::hcut
                            , K.max = 5
                            , B = 50
                            , hc_method = "ward.D2")
factoextra::fviz_gap_stat(gap_stat)

# Hierarchical Clustering
dist_adj = dist_m ^ dist_on_map
clust_adj = hclust(as.dist(dist_adj), 'ward.D2')
som_cluster_adj = cutree(clust_adj, 3)
plot(m, type="codes", main = "Clusters", bgcol =
col_vector[som_cluster_adj], pchs = NA)

```