



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

Διαδικτυακή Εφαρμογή για την Πολυμεταβλητή Απεικόνιση του Δείκτη  
Παράκτιας Τρωτότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλέλης Δημήτριος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Κόκλα Μαργαρίτα

Αθήνα

Ιούλιος 2025



## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Χαρτογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κα Μαργαρίτα Κόκλα, για την ανάθεση του θέματος, την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και τη διαρκή στήριξή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή της υπήρξε καθοριστική στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Λουκά Κατίκα για τη πολύτιμη βοήθειά του και την προθυμία του να με υποστηρίξει σε τεχνικά ζητήματα και απορίες που προέκυψαν κατά την πορεία της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη, κατανόηση και ενθάρρυνσή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	11
Κεφάλαιο 2. Πολυμεταβλητή Χαρτογράφηση.....	13
2.1 Μέθοδοι και τεχνικές πολυμεταβλητής απεικόνισης .....	13
2.2 Σύγκριση δύο ή περισσότερων μεταβλητών σε διαφορετικούς χάρτες .....	14
2.3 Συνδυασμός δύο ή περισσότερων μεταβλητών στον ίδιο χάρτη .....	16
2.3.1 Υπέρθεση.....	16
2.3.2 Διμεταβλητός χωροπληθής χάρτης .....	17
2.3.3 Τριμεταβλητός χωροπληθής χάρτης.....	18
2.3.4 Διηρημένα σύμβολα .....	19
2.3.5 Σύνθετοι δείκτες .....	20
Κεφάλαιο 3 Θεματική Χαρτογραφία στο Διαδίκτυο .....	23
3.1 Κατηγοριοποίηση των Διαδικτυακών Θεματικών Χαρτών .....	23
3.2 Δημιουργία, Τεχνολογίες και Προσεγγίσεις Υλοποίησης .....	26
3.2.1 Αρχιτεκτονική και μοντέλο λειτουργίας.....	26
3.2.2 Εξέλιξη τεχνολογιών και σύγχρονες εφαρμογές.....	27
3.2.3 Χαρτογραφικές Πινακίδες (Map Tiles) .....	28
3.2.4 Web Mercator .....	29
3.3 Στάδια Δημιουργίας Διαδικτυακών Χαρτών .....	29
3.4 Προσεγγίσεις ανάπτυξης διαδικτυακών θεματικών χαρτών.....	30
3.5 Διαδραστικοί χάρτες .....	31
Κεφάλαιο 4 Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (CVI).....	34
4.1 Παράκτια Ζώνη.....	34
4.2 Κίνδυνοι και Κλιματική Αλλαγή.....	35
4.3 Παράκτια τρωτότητα και εργαλεία διαχείρισής της .....	36
4.4 Ο δείκτης παράκτιας τρωτότητας CVI .....	37
4.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την παράκτια τρωτότητα.....	38
4.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του CVI .....	39
4.5 Παραδείγματα εφαρμογών παράκτιας τρωτότητας - Μέθοδοι οπτικοποίησης.....	40
4.5.1 Η προσέγγιση των Theocharidis et al. (2024) για τη Λεμεσό .....	40
4.5.2 Η προσέγγιση CResl των Roukounis et al. (2023) στην Αττική .....	40
4.5.3 Η προσέγγιση της USGS για την Εκτίμηση Πιθανότητας Αλλαγών στην Παράκτια Ζώνη.....	41
Κεφάλαιο 5. Υπολογισμός του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας.....	43
5.1 Περιοχή μελέτης .....	43

5.2 Μεθοδολογία .....	44
5.3 Αρχικά Δεδομένα .....	48
5.3.1 Παράκτιο υψόμετρο.....	49
5.3.2 Παράκτια κλίση.....	50
5.3.3 Παράκτια Γεωμορφολογία .....	50
5.3.4 Διάβρωση ακτής.....	50
5.3.5 Σχετική Άνοδος της Στάθμης της Θάλασσας (RSLR).....	50
5.3.6 Σημαντικό ύψος κύματος.....	51
5.3.7 Παλιρροιακό εύρος.....	51
5.3.8 Κάλυψη Γης .....	52
5.4 Τρωτότητα κάθε παραμέτρου .....	54
5.4.1 Μέσο Παράκτιο Υψόμετρο.....	54
5.4.2 Μέση παράκτια κλίση .....	55
5.4.3 Παράκτια Γεωμορφολογία .....	56
5.4.4 Διάβρωση ακτής.....	58
5.4.5 Σχετική Άνοδος της Στάθμης της Θάλασσας (RSLR).....	59
5.4.6 Σημαντικό ύψος κύματος.....	61
5.4.7 Παλιρροιακό εύρος.....	62
5.4.8 Κάλυψη Γης .....	63
5.5 Υπολογισμός Δείκτη .....	64
Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός και Υλοποίηση Εφαρμογής.....	69
6.1 Σκοπός .....	69
6.2 Εργαλεία Υλοποίησης.....	69
6.2.1 HTML, CSS, JavaScript .....	70
6.2.2 Marbox .....	71
6.2.3 Visual Studio Code.....	73
6.2.4 Tippecanoe .....	73
6.3 Υλοποίηση.....	74
6.3.1 Μεταφόρτωση δεδομένων.....	74
6.3.2 Σύνταξη κώδικα.....	75
6.3.2.1 Χαρτογραφικά υπόβαθρα .....	75
6.3.2.2 Εισαγωγή Θεματικών επιπέδων .....	77
6.3.3 Διαδραστικές λειτουργίες.....	79
6.3.3.1 Εναλλαγή θεματικών επιπέδων .....	79
6.3.3.2 Εναλλαγή πεδίου απεικόνισης .....	81

6.3.3.3 Αναδυόμενα παράθυρα (popup).....	81
6.3.3.4 Πρόσθετα επίπεδα με υπέρθεση.....	82
6.3.3.5 Φίλτρα .....	83
6.3.3.6 Αναζήτηση περιοχής.....	85
6.3.3.7 Επιπρόσθετες Λειτουργίες/Χαρακτηριστικά της εφαρμογής .....	85
6.4 Παρουσίαση τελικής εφαρμογής .....	87
Κεφάλαιο 7. Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	90
7.1 Αξιολόγηση διαδικασίας - αποτελεσμάτων του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI)..	90
7.2 Αξιολόγηση Διαδικτυακής Εφαρμογής .....	91
7.3 Προτάσεις βελτίωσης.....	91
7.3.1 Προτάσεις βελτίωσης της μεθοδολογίας υπολογισμού της Παράκτιας Τρωτότητας .....	91
7.3.2 Προτάσεις βελτίωσης της Διαδικτυακής Εφαρμογής.....	92
8. Βιβλιογραφία.....	93

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Τρόποι αναπαράστασης δύο ή περισσότερων μεταβλητών Πηγή: Κόκλα & Νάκος, 2024.....	14
Σχήμα 2. Σύγκριση δύο χωροπληθών χαρτών, όπου αριστερά απεικονίζεται το πλήθος θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα ανά 100.000 κατοίκους και δεξιά το ποσοστό των ενήλικων καπνιστών στις ΗΠΑ. Πηγή: Kratzer et al., 2024. Δεδομένα: Mortality, National Center for Health Statistics, 2022· Smoking Prevalence, Centers for Disease Control and Prevention, 2023.....	15
Σχήμα 3. Σύγκριση πολλαπλών χαρτών που απεικονίζουν την απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τους 9.1 °C στη Γερμανία. Πηγή: [Zeit Online, 2019], Δεδομένα: Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία (DWD). ....	16
Σχήμα 4. Η πυκνότητα πληθυσμού σε υπέρθεση με την κατανάλωση κρασιού ανά άτομο στην Ευρώπη. Πηγή: Alex Nitzman, 15/04/2024. Δεδομένα: UWF, EUROPE NUTS 2014, Wine Institute 2012. ....	17
Σχήμα 5. Διμεταβλητός χωροπληθής χάρτης όπου απεικονίζεται η ανεργία και η πυκνότητα πληθυσμού της Ευρώπης. Πηγή: data.europa.eu .....	18
Σχήμα 6. Αναλογικά διαγράμματα πίτας για την απεικόνιση της μορφής ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε χώρα του Ηνωμένου Βασιλείου. Πηγή: Office for National Statistics (ONS). ....	19
Σχήμα 7. Απεικόνιση κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών των γειτονιών του Λος Άντζελες με τη χρήση προσώπων Chernoff. Πηγή: Turner, E. (1977). Life in Los Angeles. ....	20
Σχήμα 8. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) για κάθε χώρα του πλανήτη το έτος 2021. Πηγή: Πρόγραμμα Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (2022), Έκθεση για την Ανθρώπινη Ανάπτυξη 2021-22, ΟΗΕ.....	22
Σχήμα 9. Αφηρημένο πλαίσιο αλληλεπίδρασης μεταξύ διαδικτυακών παρόχων, χαρτογραφικών υπηρεσιών και τελικών χρηστών (πηγή: Stefanakis, 2017, με τροποποίηση). ....	27
Σχήμα 10. Τρόπος λειτουργίας Vector Tile. Πηγή: Gaffuri (2012). ....	28
Σχήμα 11. Μετασχηματισμός γεωγραφικών συντεταγμένων WGS84 στο σύστημα Web Mercator. Πηγή: Stefanakis (2017). ....	29
Σχήμα 12. Στάδια δημιουργίας χαρτών στο διαδίκτυο. (Πηγή: Smith, 2016, με τροποποίηση). ....	30
Σχήμα 13. Infographic με τον αριθμό των ατόμων που πάσχουν από ζαχαρώδη διαβήτη το 2017 και η πρόβλεψη για το 2045. Πηγή: Sharma et al. (2021). ....	31
Σχήμα 14. Η αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη και χάρτη μέσω υπολογιστή. (Πηγή: Roth, 2013). ....	32
Σχήμα 15. Ο αριθμός εμφάνισης κάθε μεταβλητής σε 60 μελέτες και η ταξινόμηση τους με βάση την θεματική κατηγορία αλλά και την κατηγορία σημαντικότητας. Πηγή: (Cruz-Ramírez et al., 2024) με τροποποίηση. ....	39
Σχήμα 16. Χάρτης του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) για την περιοχή δυτικά της Λεμεσού. Πηγή: Theocharidis et al. (2024). ....	40
Σχήμα 17. Χάρτης εκτίμησης της ανθεκτικότητας της παράκτιας ζώνης της Αττικής, όπως υπολογίστηκε με τον δείκτη CResl. Πηγή: Roukounis et al. (2023). ....	41
Σχήμα 18. Χάρτης πιθανότητας παράκτιας αλλαγής, όπως υπολογίστηκε με εποπτευόμενο μοντέλο μηχανικής μάθησης για τη βορειοανατολική ακτή των ΗΠΑ. Πηγή: USGS, 2022 (Harke et al.). ....	42

Σχήμα 19. Παράδειγμα των τριών μεθοδολογιών υπολογισμού του Δείκτη Τρωτότητας Ακτών (CVI) σε τμήμα της περιοχής μελέτης: (α) διατομές (transects) κάθετα στην ακτογραμμή, (β) πλέγμα fishnet 200μ x 200μ, (γ) πλέγμα fishnet 1.000μ x 1.000μ.....	46
Σχήμα 20. Διάγραμμα ροής που παρουσιάζει τη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI). .....	48
Σχήμα 21. Οι χάρτες με τις πρωτογενείς τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας. ....	53
Σχήμα 22. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το παράκτιο υψόμετρο. ....	54
Σχήμα 23. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή του μέσου παράκτιου υψομέτρου για κάθε μία μεθοδολογία.....	55
Σχήμα 24. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την παράκτια κλίση. ....	56
Σχήμα 25. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της μέσης παράκτιας κλίσης για κάθε μία μεθοδολογία.....	56
Σχήμα 26. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς τη γεωμορφολογία της ακτής. ....	58
Σχήμα 27. Τα διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της παράκτιας γεωμορφολογίας για κάθε μία μεθοδολογία.....	58
Σχήμα 28. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς τη διάβρωση της ακτής.....	59
Σχήμα 29. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της παράκτιας διάβρωση για κάθε μία μεθοδολογία.....	59
Σχήμα 30. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας.....	60
Σχήμα 31. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας για κάθε μία μεθοδολογία. ....	61
Σχήμα 32. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το σημαντικό ύψος κύματος. ....	62
Σχήμα 33. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας εξαιτίας των σημαντικών κυμάτων για κάθε μία μεθοδολογία. ....	62
Σχήμα 34. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το εύρος της παλίρροιας. ...	63
Σχήμα 35. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την κάλυψη γης. ....	64
Σχήμα 36. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας εξαιτίας της κάλυψης γης για κάθε μία μεθοδολογία.....	64
Σχήμα 37. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο των Transects. ....	66
Σχήμα 38. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο του πλέγματος (Fishnets) 200μ.x200 μ.....	67
Σχήμα 39. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο του πλέγματος (Fishnets) 1000μ.x1000 μ.....	67
Σχήμα 40. Διαγράμματα με τη χωρική του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI) για κάθε μία μεθοδολογία.....	68
Σχήμα 41. Απόσπασμα από το περιβάλλον cloud service του Mapbox Studio Tilesets.....	75
Σχήμα 42. Απόσπασμα από την ιστοσελίδα ColorBrewer 2.0 με την επιλεγμένη χρωματική παλέτα. ....	79
Σχήμα 43. Το κουμπί triple toggle με το οποίο εναλλάσσονται τα θεματικά επίπεδα του δείκτη CVI.....	81
Σχήμα 44. Τα διαθέσιμα πεδία με τις παραμέτρους και τον τελικό δείκτη CVI που μπορεί να εναλλάσσει ο χρήστης.....	82
Σχήμα 45. Παράθυρο με τα πρόσθετα επίπεδα υπέρθεσης.....	83

Σχήμα 46. Το παράθυρο με τα φίλτρα του χάρτη. ....	85
Σχήμα 47. Η κεντρική οθόνη της διαδικτυακής εφαρμογής που δημιουργήθηκε. ....	87
Σχήμα 48. Η κεντρική οθόνη της διαδικτυακής εφαρμογής που δημιουργήθηκε. ....	88
Σχήμα 49. Απόσπασμα της εφαρμογής, όπου απεικονίζεται ο δείκτης CVI με υπέρθεση των περιοχών Natura 2000. ....	88
Σχήμα 50. Απόσπασμα από την εφαρμογή όπου έχουν εφαρμοστεί τα φίλτρα για τις περιοχές με πυκνότητα πληθυσμού μεγαλύτερη από 100 κατ./km <sup>2</sup> και ταυτόχρονα βρίσκονται εντός του δικτύου Natura 2000. ....	88

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Οι παράμετροι και η κατάταξη τους για τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας. ....	45
Πίνακας 2. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες πηγές τους. ....	49
Πίνακας 3. Τα εύρη τιμών, ο μέσος όρος και η διάμεσος του δείκτη CVI για κάθε μία από τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν. ....	65
Πίνακας 4. Η τελική ταξινόμηση του δείκτη CVI με τη μέθοδο Quantiles. ....	65

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τον υπολογισμό και τη χαρτογράφηση του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (Coastal Vulnerability Index - CVI) στη νήσο Λέσβο, με σκοπό την εκτίμηση του βαθμού τρωτότητας κατά μήκος της ακτογραμμής του νησιού. Για την ανάλυση εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές χωρικές μεθοδολογίες (πλέγματα 200μ. x 200μ., πλέγματα 1.000μ. x 1.000μ. και διατομές/transects), λαμβάνοντας υπόψη οκτώ κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την παράκτια τρωτότητα. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν περιοχές με υψηλή και χαμηλή τρωτότητα, ενώ η σύγκριση μεταξύ των μεθοδολογιών ανέδειξε διαφορές ως προς την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια της χωρικής πληροφορίας. Επιπλέον, υλοποιήθηκε μία διαδραστική διαδικτυακή χαρτογραφική εφαρμογή με τη χρήση της πλατφόρμας Mapbox, μέσω της οποίας παρουσιάζονται τόσο ο συνολικός δείκτης CVI όσο και οι επιμέρους παράμετροι, με δυνατότητες φιλτραρίσματος, θεματικής ανάλυσης και σύγκρισης με άλλα δεδομένα. Η εφαρμογή αυτή διευκολύνει την πρόσβαση στην πληροφορία και συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη ενημέρωση και υποστήριξη της λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των παράκτιων ζωνών της Λέσβου.

**Λέξεις κλειδιά:** Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (CVI), χωρική ανάλυση, διαδραστική χαρτογράφηση, διαδικτυακή εφαρμογή, νήσος Λέσβος.

## **Abstract**

This study focuses on calculating and mapping the Coastal Vulnerability Index (CVI) for the island of Lesbos, aiming to evaluate the vulnerability of its coastline. Three different spatial analysis methods were applied: a fine-resolution fishnet grid (200m x 200m), a coarser fishnet grid (1,000m x 1,000m), and a transect-based approach. The analysis incorporated eight critical variables that significantly influence coastal vulnerability. Results highlighted specific coastal segments with high and low vulnerability as well, and comparisons between the methods revealed important differences in spatial accuracy and detail. Additionally, an interactive web mapping application was then developed using the Mapbox platform, incorporating the three methods. This application visualizes the CVI and its underlying parameters, offering tools for filtering data, conducting thematic analysis, and comparing various spatial datasets. This supports informed and effective decision-making for managing the coastal zones of Lesbos.

**Keywords:** Coastal Vulnerability Index (CVI), spatial analysis, interactive mapping, web application, Lesbos Island.

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η παράκτια ζώνη αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικούς και πολύπλοκους γεωγραφικούς χώρους, συγκεντρώνοντας έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, πλούσια οικοσυστήματα και σημαντικές υποδομές. Η σημασία της για την οικονομική ανάπτυξη, την κοινωνική ευημερία και το φυσικό περιβάλλον καθιστά αναγκαία τη διατήρηση και την προστασία της μέσα από τη συνεχή αξιολόγηση κάθε πιθανού κινδύνου που μπορεί να την απειλήσει. Τα τελευταία χρόνια, όμως, λόγω της κλιματικής αλλαγής, της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και της αυξανόμενης πίεσης από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, το ζήτημα της παράκτιας τρωτότητας έχει έρθει στο προσκήνιο, οδηγώντας σε πληθώρα επιστημονικών μελετών και εφαρμογών που εστιάζουν στην αποτύπωση, πρόβλεψη και διαχείριση των επιπτώσεων αυτών των φαινομένων.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η εκτίμηση και η χαρτογράφηση της παράκτιας τρωτότητας συνιστούν κρίσιμο ζήτημα, τόσο για την προστασία των ανθρώπινων κοινωνιών και της οικονομίας όσο και για τη διατήρηση της φυσικής κληρονομιάς. Αν και έχουν αναπτυχθεί ποικίλα εργαλεία που βασίζονται σε διαφορετικές μεθοδολογίες και παραμέτρους, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις ως προς την εγκυρότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς πρόκειται για ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο που στην πράξη δύσκολα μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια. Επιπλέον, η περιορισμένη ενημέρωση του κοινού και των αρμόδιων φορέων εντείνει την ανάγκη ανάπτυξης ολοκληρωμένων μεθόδων και εργαλείων που θα επιτρέπουν την πληρέστερη αξιολόγηση του κινδύνου. Ιδιαίτερη σημασία έχει, επίσης, η εύκολη πρόσβαση σε αυτή την πληροφορία σχετικά με την παράκτια τρωτότητα ώστε να ενισχυθεί η κατανόηση του φαινομένου και να ευαισθητοποιηθεί μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού σχετικά με το ζήτημα αυτό.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός και η χωρική ανάλυση του πολυμεταβλητού Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (Coastal Vulnerability Index - CVI) στη Λέσβο, καθώς και η υλοποίηση μιας διαδραστικής διαδικτυακής εφαρμογής χαρτογράφησης που θα επιτρέπει την εύκολη και άμεση πρόσβαση στα αποτελέσματα αυτά. Στόχος είναι η εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων γεωχωρικής ανάλυσης και η αποτελεσματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ώστε να διευκολυνθεί η λήψη αποφάσεων και να ενισχυθεί η ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων.

Για την εκτίμηση του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες ανάλυσης: α) με διατομές (transects) κάθετα στην ακτογραμμή, β) με πλέγματα (fishnet) 200x200 μέτρων και γ) με πλέγματα 1.000x1.000 μέτρων κατά μήκος της ακτής. Με αυτόν τον τρόπο, εξετάστηκε το φαινόμενο με διάφορους βαθμούς λεπτομέρειας. Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη περιλάμβανε την επιλογή, συλλογή, επεξεργασία και ταξινόμηση οκτώ παραμέτρων, εκ των οποίων τέσσερις σχετίζονται με γεωλογικά χαρακτηριστικά (παράκτιο υψόμετρο, παράκτια κλίση, γεωμορφολογία, διάβρωση ακτής), τρεις με υδροφυσικούς παράγοντες (σχετική άνοδος στάθμης θάλασσας, μέσο ύψος κύματος, παλιρροϊκό εύρος) και μία με την κάλυψη γης. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από διάφορες πηγές και μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο λογισμικό QGIS, ενσωματώθηκαν στις χωρικές μονάδες ανάλυσης. Οι τιμές των παραμέτρων ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες τρωτότητας, ενώ για τον υπολογισμό της τελικής τιμής του CVI χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος μαθηματικός τύπος με ισοβαρή συμμετοχή όλων των παραμέτρων.

Η εφαρμογή των παραπάνω μεθοδολογιών επέτρεψε την ανάδειξη περιοχών με αυξημένη ή χαμηλή τρωτότητα στη Λέσβο, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των κινδύνων που αντιμετωπίζει η παράκτια ζώνη του νησιού. Παράλληλα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών μεθοδολογιών επέτρεψε την καταγραφή των διαφοροποιήσεων ως προς την ακρίβεια, τη χωρική ανάλυση και την αποτύπωση τοπικών ιδιαιτεροτήτων.

Εκτός από τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας, δημιουργήθηκε μία διαδικτυακή χαρτογραφική εφαρμογή για τη διαδραστική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε με χρήση της πλατφόρμας Mapbox και της βιβλιοθήκης Mapbox GL JS, με χρήση κώδικα σε HTML, CSS και JavaScript. Έτσι, στην εφαρμογή παρουσιάζονται τόσο ο τελικός δείκτης CVI όσο και οι επιμέρους παράμετροί του, μαζί με πρόσθετα θεματικά επίπεδα, όπως ο πληθυσμός, οι περιοχές Natura 2000 και οι ζώνες κινδύνου πλημμύρας. Η εφαρμογή παρέχει λειτουργικότητες όπως εναλλαγή θεματικών επιπέδων, επιλογή διαφορετικών χαρτογραφικών υποβάθρων, εφαρμογή φίλτρων, εμφάνιση αναλυτικών πληροφοριών μέσω αναδυόμενων παραθύρων popups, καθώς και εργαλεία πλοήγησης και αναζήτησης περιοχών. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε η εφαρμογή να είναι εύκολη στη χρήση και να παρέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες με απλό τρόπο.

Η υλοποίηση της εφαρμογής αυτής συμβάλλει ουσιαστικά στην καλύτερη κατανόηση και διάχυση της πληροφορίας σχετικά με την παράκτια τρωτότητα της Λέσβου, διευκολύνοντας την ενημέρωση, τη λήψη αποφάσεων και τον σχεδιασμό μέτρων για την αντιμετώπιση των απειλών της παράκτιας ζώνης. Η δυνατότητα άμεσης και εύκολα προσβάσιμης βάσης δεδομένων με τα αποτελέσματα του δείκτη CVI, επιτρέπει στους ερευνητές και στο ευρύ κοινό να εξερευνήσουν τα χωρικά δεδομένα και να εξάγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η παράκτια ζώνη.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τους πολυμεταβλητούς χάρτες με έμφαση στους σύνθετους δείκτες (Κεφάλαιο 2), τη θεωρία των διαδραστικών διαδικτυακών χαρτών (Κεφάλαιο 3) και τον δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI) (Κεφάλαιο 4). Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται αναλυτικά η μεθοδολογία επεξεργασίας και ο υπολογισμός του δείκτη παράκτιας τρωτότητας. Το Κεφάλαιο 6 αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της διαδικτυακής εφαρμογής, με έμφαση στις τεχνικές, τη δομή και τις διαδραστικές λειτουργίες της πλατφόρμας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, οι περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική βελτίωση.

## Κεφάλαιο 2. Πολυμεταβλητή Χαρτογράφηση

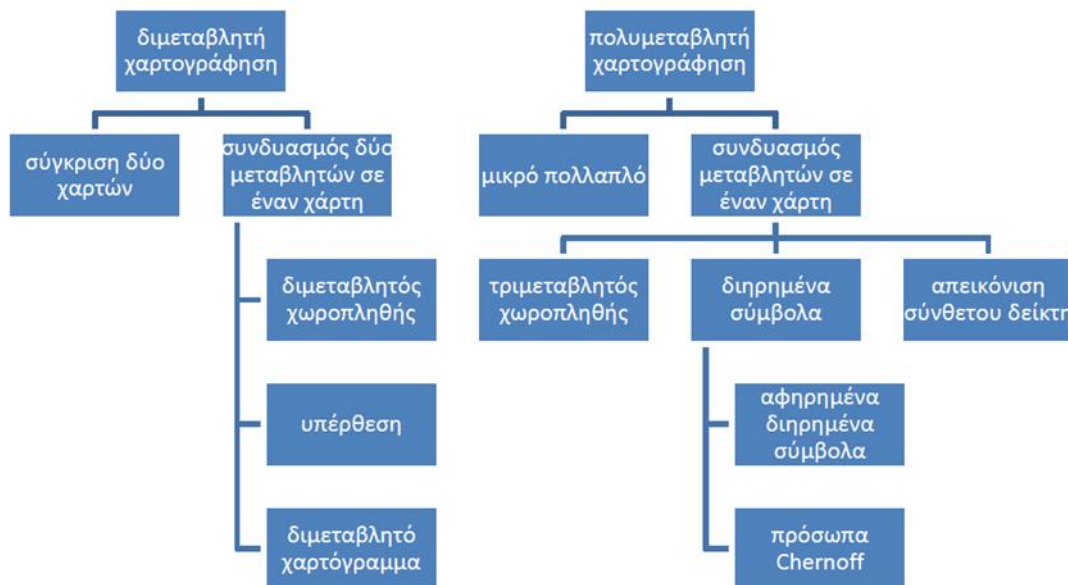
Στους περισσότερους θεματικούς χάρτες απεικονίζεται συνήθως μία μόνο μεταβλητή, η οποία προβάλλεται εντός ενός γεωγραφικού πλαισίου αναφοράς, με σκοπό την αποτύπωση της χωρικής της κατανομής. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη για ταυτόχρονη απεικόνιση περισσότερων μεταβλητών, είτε για την ανάδειξη πολύπλοκων χωρικών προτύπων είτε για τη διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών στον γεωγραφικό χώρο. Η απεικόνιση που περιλαμβάνει δύο μεταβλητές ονομάζεται διμεταβλητή χαρτογράφηση, ενώ η απεικόνιση που περιλαμβάνει περισσότερες των δύο μεταβλητών ονομάζεται πολυμεταβλητή χαρτογράφηση (Κόκλα και Νάκος, 2024). Η απεικόνιση πολλαπλών μεταβλητών μπορεί να γίνει είτε με σύγκριση διαφορετικών απεικονίσεων σε ξεχωριστούς χάρτες, είτε με ταυτόχρονη αναπαράστασή τους σε ένα μόνο χάρτη με συνδυασμό απεικονιστικών μεθόδων.

Η δυνατότητα απεικόνισης πολλαπλών μεταβλητών στον ίδιο χάρτη επιτρέπει την παράλληλη ανάλυση διαφορετικών μεταβλητών, διευκολύνοντας την αναγνώριση χωρικών σχέσεων και συσχετίσεων που δεν είναι άμεσα αντιληπτές μέσω μονομεταβλητών απεικονίσεων (Slocum et al., 2004). Επιπλέον, σε αντίθεση με την παραδοσιακή στατική αναπαράσταση, η πολυμεταβλητή χαρτογράφηση ενθαρρύνει την εξερεύνηση και την αλληλεπίδραση με το περιεχόμενο του χάρτη από τους χρήστες, ειδικά όταν ενσωματώνεται σε διαδικτυακές εφαρμογές.

Ωστόσο, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών που αποδίδονται σε έναν χάρτη, αυξάνεται αντίστοιχα και η οπτική του πολυπλοκότητα, γεγονός που μπορεί να δυσχεράνει σημαντικά την κατανόηση και την ερμηνεία του από τον τελικό χρήστη (Elmer, 2013).

### 2.1 Μέθοδοι και τεχνικές πολυμεταβλητής απεικόνισης

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί και εφαρμοστεί ποικίλες τεχνικές για την απεικόνιση διμεταβλητών και πολυμεταβλητών χαρτών, οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς τη μορφή των συμβολισμών, τον τρόπο αναπαράστασης των μεταβλητών, καθώς και το επίπεδο πολυπλοκότητας που επιφέρουν στον τελικό χάρτη. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται άμεσα από το είδος των δεδομένων, τον αριθμό των μεταβλητών, και τον σκοπό της ανάλυσης. Στο παρακάτω ιεραρχικό διάγραμμα φαίνονται οι διάφορες τεχνικές διμεταβλητής και πολυμεταβλητής χαρτογράφησης, που χρησιμοποιούνται σήμερα.



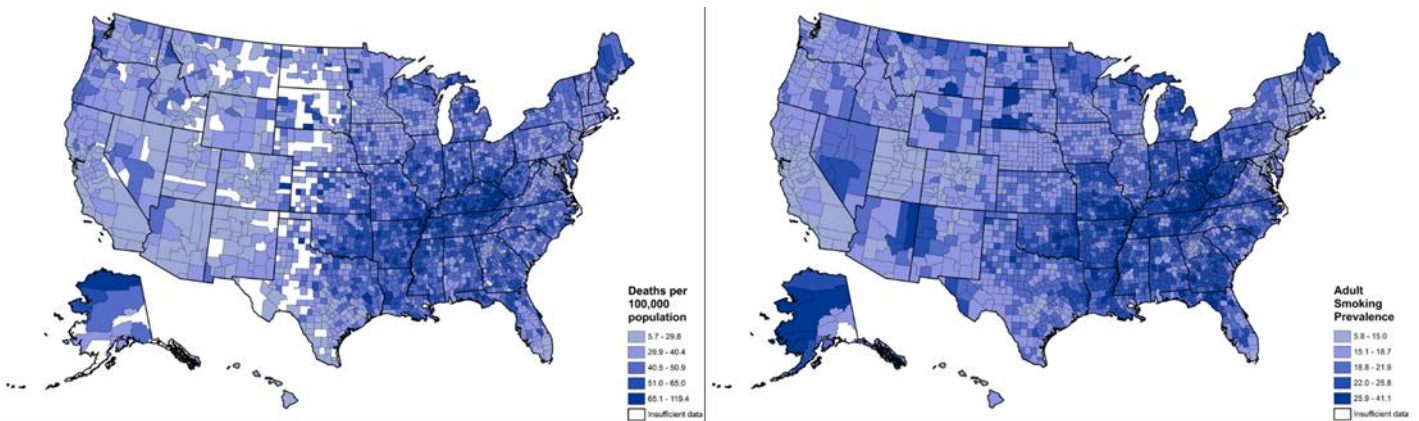
Σχήμα 1. Τρόποι αναπαράστασης δύο ή περισσότερων μεταβλητών Πηγή: Κόκλα & Νάκος, 2024.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, η κατηγοριοποίηση της πολυμεταβλητής χαρτογράφησης σε δύο ομάδες, τη διμεταβλητή και την πολυμεταβλητή χαρτογράφηση. Συχνά όμως στη βιβλιογραφία οι πολυμεταβλητοί χάρτες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση την τεχνική της απεικόνισης. Έτσι, υπάρχουν, η συγκριτική απεικόνιση δύο ή περισσότερων μεταβλητών σε χωριστούς χάρτες, και ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μεταβλητών στον ίδιο χάρτη.

## 2.2 Σύγκριση δύο ή περισσότερων μεταβλητών σε διαφορετικούς χάρτες

Σε αυτήν την τεχνική, κάθε μεταβλητή αναπαρίσταται σε ανεξάρτητους χάρτες με κοινή γεωγραφική βάση, για άμεση οπτική σύγκριση. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική όταν τα δεδομένα διαφέρουν σε κλίμακα ή τύπο δεδομένων (π.χ. διανυσματικών και ψηφιδωτών), καθώς επιτρέπει τη ξεχωριστή χαρτογράφηση κάθε μιας χωρίς να επηρεάζεται από τις άλλες. Παράλληλα, αποτρέπει συμφόρηση πληροφορίας στον χάρτη που ενδέχεται να δημιουργηθεί με τις συνδυασμένες αναπαραστάσεις. Ωστόσο, η διαδικασία σύγκρισης απαιτεί μεγαλύτερη ικανότητα ανάγνωσης από τον χρήστη, αφού οι αλληλεπιδράσεις και οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών μπορεί να μην είναι ευδιάκριτες με την πρώτη ματιά, κάνοντας τον να επεξεργαστεί και να συνδυάσει τα δεδομένα από μόνος του.

Η πιο συχνή απεικονιστική μέθοδος χαρτών που πρόκειται να συγκριθούν μεταξύ τους είναι η χωροπληθής. Στις περιπτώσεις αυτές μία σημαντική παράμετρος είναι η μέθοδος ομαδοποίησης των δεδομένων ώστε να είναι εύκολα συγκρίσιμες, όπως για παράδειγμα όταν απαιτείται η σύγκριση του ποσοστού των καπνιστών και του πλήθους θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα (βλ. σχήμα 2).

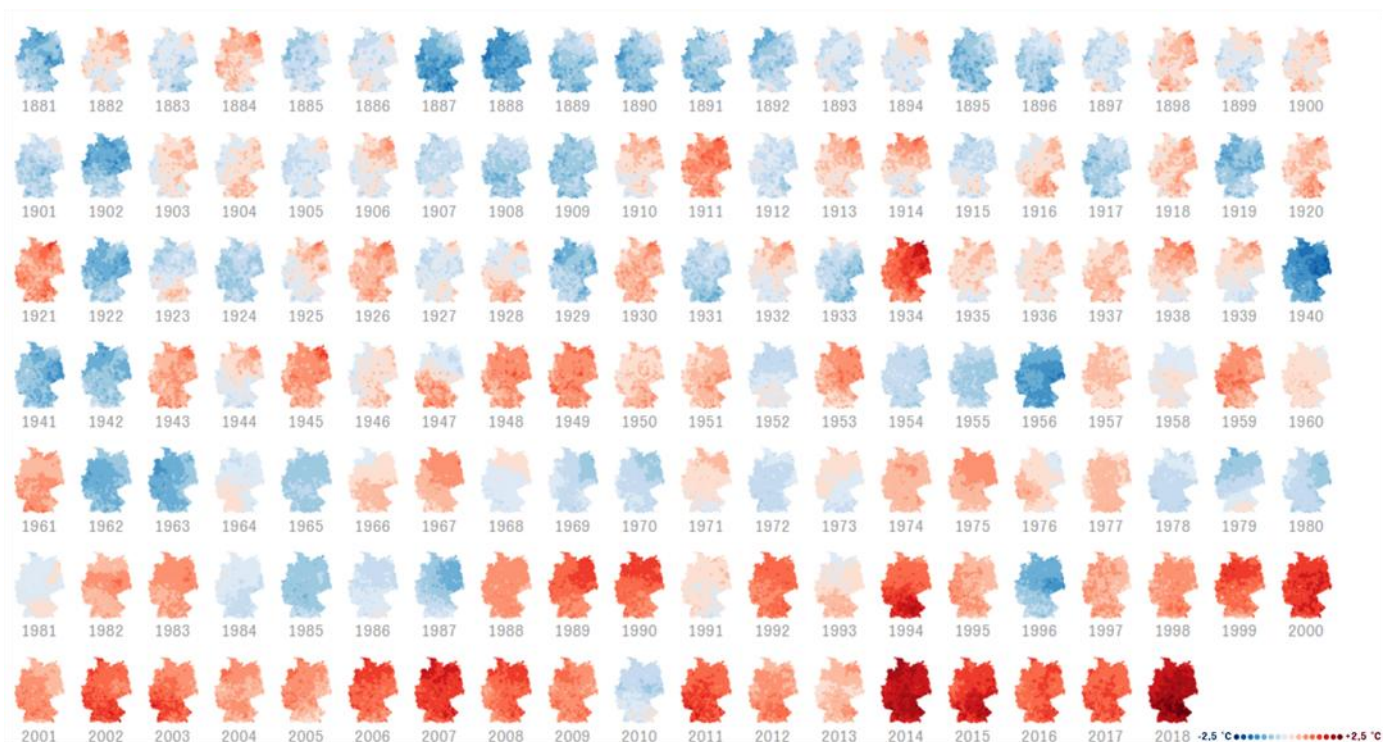


Σχήμα 2. Σύγκριση δύο χωροπληθών χαρτών, όπου αριστερά απεικονίζεται το πλήθος θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα ανά 100.000 κατοίκους και δεξιά το ποσοστό των ενήλικων καπνιστών στις ΗΠΑ. Πηγή: Kratzer et al., 2024. Δεδομένα: Mortality, National Center for Health Statistics, 2022· Smoking Prevalence, Centers for Disease Control and Prevention, 2023.

Σύμφωνα με τους Brewer και Pickle (2002), η μέθοδος των ποσοστιαίων διαστημάτων (quantiles), η οποία χωρίζει τα δεδομένα σε ομάδες με περίπου ίδιο αριθμό τιμών, έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για τη σύγκριση χαρτών που βασίζονται σε διαφορετικές κατανομές δεδομένων.

Μία ακόμη συχνή μέθοδος για τη σύγκριση δύο ή περισσότερων χαρτών είναι η επιλογή διαφορετικών τύπων θεματικών απεικονίσεων. Για παράδειγμα, μπορεί να αντιπαρατεθεί ένας χωροπληθής με έναν χάρτη αναλογικών συμβόλων. Σημειώνεται ότι οι διαφορετικές τεχνικές απεικόνισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά σε έναν μόνο χάρτη, χωρίς να προκαλέσει προκαλείται ιδιαίτερη σύγχυση και σε ένα χάρτη, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Εκτός από τη σύγκριση των τιμών πολλαπλών μεταβλητών στον χώρο, στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και χάρτες που εξετάζουν την εξέλιξη της ίδιας χωρικής μεταβλητής στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος απεικόνισης και η ομαδοποίηση των τιμών θα πρέπει να είναι η ίδια ώστε τα δεδομένα τους να είναι εύκολα συγκρίσιμα. Όταν συγκρίνονται περισσότεροι των δύο χαρτών, η μέθοδος ονομάζεται μικρό πολλαπλό (small multiple) (Slocum et al., 2022). Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα μικρού πολλαπλού όπου απεικονίζεται η απόκλιση της μέση ετήσιας θερμοκρασίας σε σχέση με τη μέση τιμή των 9,1°C τα τελευταία 137 έτη στη Γερμανία.



Σχήμα 3. Σύγκριση πολλαπλών χαρτών που απεικονίζουν την απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τους 9.1 °C στη Γερμανία. Πηγή: [Zeit Online, 2019], Δεδομένα: Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία (DWD).

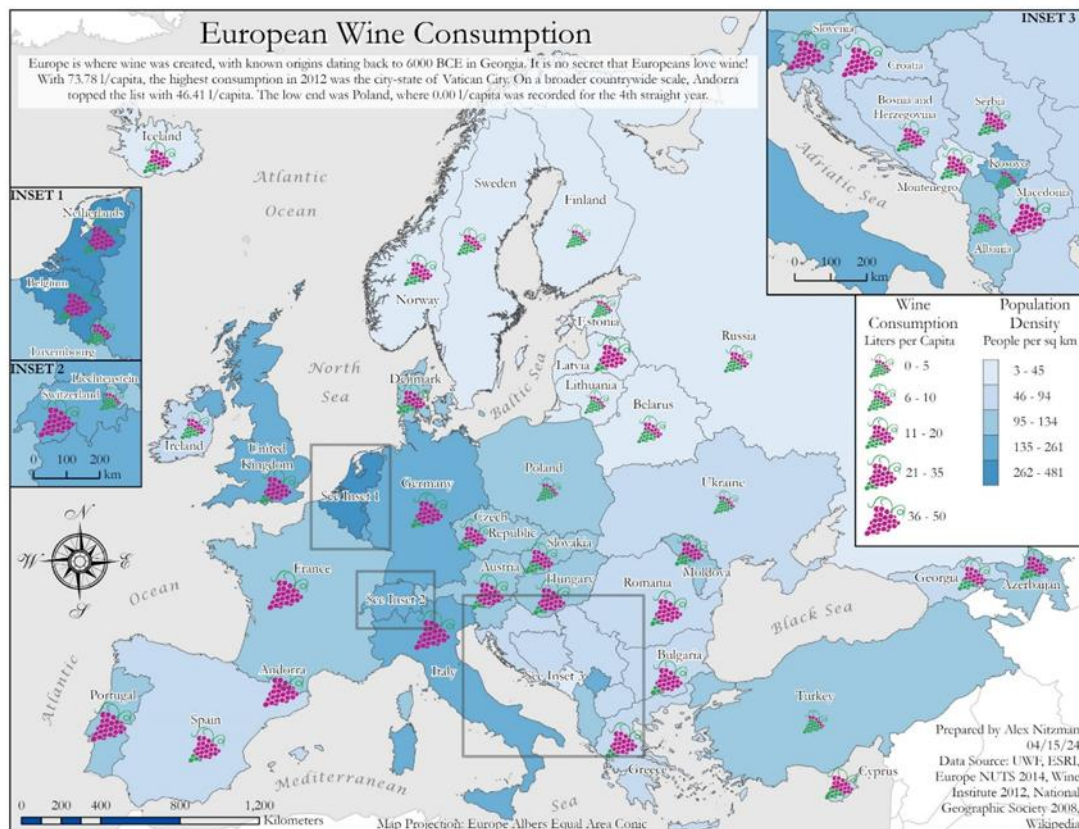
## 2.3 Συνδυασμός δύο ή περισσότερων μεταβλητών στον ίδιο χάρτη

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω χάρτη, η παράθεση πολλών διαφορετικών χαρτών προκαλεί συχνά σύγχυση στους αναγνώστες. Γι' αυτό, προτιμώνται πολλές φορές μέθοδοι απεικόνισης που συνδυάζουν διάφορες οπτικές μεταβλητές στον ίδιο χάρτη. Για την απεικόνιση δύο ή και περισσότερων μεταβλητών σε έναν χάρτη, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές που συνδυάζουν οπτικές μεταβλητές. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν οι χάρτες κουκκίδων, οι χάρτες αναλογικών συμβόλων, τα χαρτογράμματα και οι χάρτες ροής, όπου με την διαφοροποίηση της απόχρωσης ή την εναλλαγή της φωτεινότητας μπορεί να αναπαρασταθεί μία επιπλέον μεταβλητή. Επιπλέον, στους διμεταβλητούς χάρτες εφαρμόζεται η υπέρθεση συμβόλων διαφορετικής διάστασης, ενώ οι διμεταβλητοί χωροπληθείς χάρτες συνδυάζουν δύο μεταβλητές χρησιμοποιώντας τη χωροπληθή απεικόνιση. Όσον αφορά τους χάρτες απεικόνισης περισσότερων μεταβλητών, εξετάζονται, επίσης, οι τριμεταβλητοί χωροπληθείς χάρτες, οι χάρτες διηρημένων συμβόλων και οι χάρτες με σύνθετους δείκτες, στους οποίους μπορεί να περιλαμβάνονται τρεις ή και περισσότερες μεταβλητές (Slocum et al., 2004)

### 2.3.1 Υπέρθεση

Η υπέρθεση είναι μία συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική για την απεικόνιση δύο μεταβλητών στον ίδιο χάρτη, συνδυάζοντας διαφορετικούς τύπους συμβόλων. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η συνύπαρξη χωροπληθείς απεικόνισης (π.χ. με διαβαθμίσεις φωτεινότητας) και αναλογικών συμβόλων (π.χ. μεταβλητού μεγέθους). Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι κρίσιμο να διασφαλίζεται η σαφής διάκριση μεταξύ σημειακών και επιφανειακών συμβόλων, μέσω κατάλληλης αντίθεσης στα χρώματα και τη φωτεινότητα. Επίσης, άλλοι δυνατοί συνδυασμοί,

περιλαμβάνουν τη χρήση χάρτη κουκκίδων με αναλογικά σύμβολα ή ισარიθμικών καμπυλών, ενώ συναντάται και η υπέρθεση διαφορετικών τύπων χαρτών, όπως ενός χαρτογράμματος με χάρτη κουκκίδων. Η τεχνική της υπέρθεσης είναι απλή και αποτελεσματική για δύο μεταβλητές, όμως η ευκρίνεια μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των απεικονιζόμενων μεταβλητών (Κόκλα & Νάκος, 2024). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο χάρτης του σχήματος 4, όπου απεικονίζεται με χρωματική διαβάθμιση (χωροπληθής) η πυκνότητα πληθυσμού και ταυτόχρονα αναπαρίσταται η κατανάλωση κρασιού ανά άτομο στην Ευρώπη, χρησιμοποιώντας αναλογικά σύμβολα μεταβαλλόμενου μεγέθους.



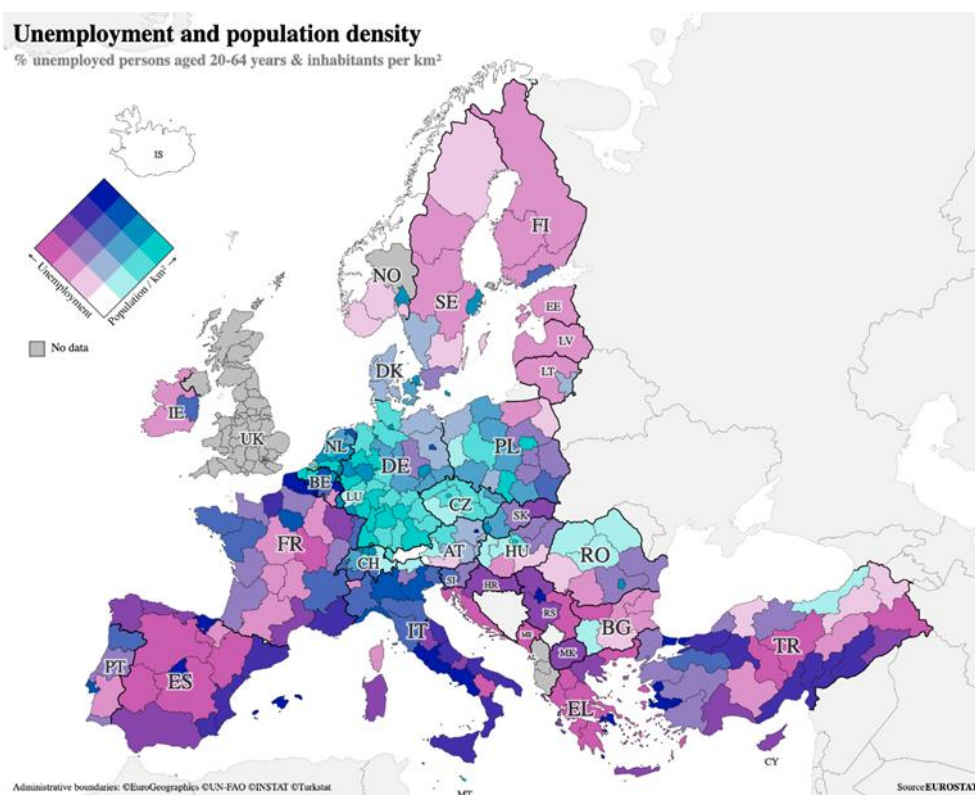
Σχήμα 4. Η πυκνότητα πληθυσμού σε υπέρθεση με την κατανάλωση κρασιού ανά άτομο στην Ευρώπη. Πηγή: Alex Nitzman, 15/04/2024. Δεδομένα: UWF, EUROPE NUTS 2014, Wine Institute 2012.

### 2.3.2 Διμεταβλητός χωροπληθής χάρτης

Ο διμεταβλητός χωροπληθής χάρτης (bivariate choropleth map) αποτελεί τεχνική απεικόνισης δύο μεταβλητών μέσω συνδυασμού χρωμάτων σε έναν κοινό χάρτη. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει δύο χρωματικές παλέτες σε έναν χωροπληθής χάρτη μέσω ενός διμεταβλητού υπομνήματος, όπου κάθε μεταβλητή καταλαμβάνει έναν άξονα με συγκριμένη χρωματική παλέτα (συνήθως μονοχρωματική) και οι συνδυασμοί των κατηγοριών τους αποδίδονται με ξεχωριστά χρώματα, που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δύο παλετών. Ανάλογα με το είδος των δεδομένων (αποκλίνοντα ή συμπληρωματικά), επιλέγονται αντίστοιχα χρώματα διαφορετικών αποχρώσεων ή μεταβαλλόμενης φωτεινότητας. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάγνωση και ανάλυση χωρικών σχέσεων μεταξύ των δύο μεταβλητών, μιας και αναγνωρίζονται εύκολα οι περιοχές που και οι δύο μεταβλητές παρουσιάζουν υψηλές ή χαμηλές τιμές αντίστοιχα (υποδηλώνοντας πιθανή συσχέτιση ή αλληλεξάρτηση).

Εντοπίζονται, επίσης, οι περιοχές όπου παρατηρείται αντίθετη συμπεριφορά, δηλαδή η μία μεταβλητή έχει υψηλή και η άλλη χαμηλή τιμή, χαρακτηριστικό συχνά των αποκλινοσών μεταβλητών. Ωστόσο, η σύνθεση του χάρτη απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα στην επιλογή του αριθμού κατηγοριών (συνήθως τρεις ανά μεταβλητή), ώστε η διαφοροποίηση των χρωμάτων να είναι σαφής, όπως και η οπτική ευκρίνεια του υπομνήματος. Η προσθήκη μεμονωμένων χωροπληθών χαρτών των επιμέρους μεταβλητών, καθώς και διάφορων επεξηγηματικών στοιχείων, μπορεί να ενισχύσει την κατανόηση και να διευκολύνει τη σωστή ερμηνεία των δεδομένων. Παρά την αυξημένη πολυπλοκότητα σε σχέση με τις απλές απεικονίσεις, οι διμεταβλητοί χωροπληθείς χάρτες αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την οπτική διερεύνηση σχέσεων μεταξύ δύο μεταβλητών (Slocum et al., 2004).

Στο παράδειγμα που ακολουθεί φαίνεται ένας διμεταβλητός χωροπληθείς χάρτης της Ευρώπης, στον οποίο απεικονίζονται οι μεταβλητές της ανεργίας και της πυκνότητας πληθυσμού με αποχρώσεις του ροζ και του τρκουάζ αντίστοιχα.



Σχήμα 5. Διμεταβλητός χωροπληθείς χάρτης όπου απεικονίζεται η ανεργία και η πυκνότητα πληθυσμού της Ευρώπης. Πηγή: data.europa.eu

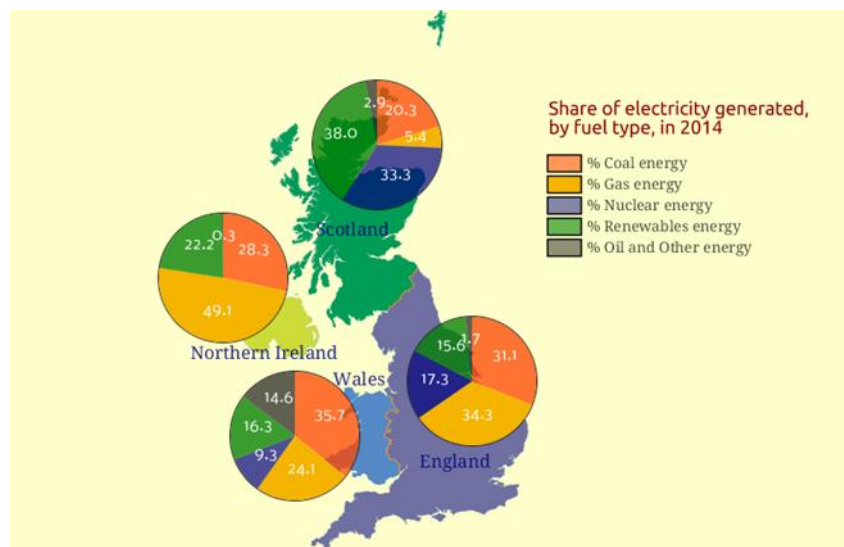
### 2.3.3 Τριμεταβλητός χωροπληθείς χάρτης

Ομοίως με τους διμεταβλητούς χωροπληθείς χάρτες, στους τριμεταβλητούς χωροπληθείς (trivariate choropleth map) απεικονίζονται τρεις μεταβλητές ταυτόχρονα, συνδυάζοντας τρία διαφορετικά χρώματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται τριγωνικό υπόμνημα και χρωματικά σχήματα τριών αποχρώσεων (π.χ. CMY ή RGB), όπου η ανάμειξη των χρωμάτων αποδίδει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Συνήθως χρησιμοποιείται όταν οι μεταβλητές έχουν άθροισμα 100%, όπως στην περίπτωση της σύστασης του εδάφους ή της κατανομής του εργατικού δυναμικού. Όταν οι τρεις μεταβλητές δεν έχουν άθροισμα 100%, το τριγωνικό

υπόμνημα δεν εφαρμόζεται, γι' αυτό έχει προταθεί, η χρήση τρισδιάστατου υπομνήματος σε σχήμα κύβου, αν και η εφαρμογή του είναι περιορισμένη λόγω της οπτικής και ερμηνευτικής πολυπλοκότητας. Παρά τη χρησιμότητά του, ο τριμεταβλητός χάρτης είναι οπτικά πολύπλοκος και απαιτεί εμπειρία και εξοικείωση από τον αναγνώστη, γι' αυτό και προτείνεται η συνοδεία του με επεξηγηματικό υπόμνημα και καθοδηγητικό κείμενο.

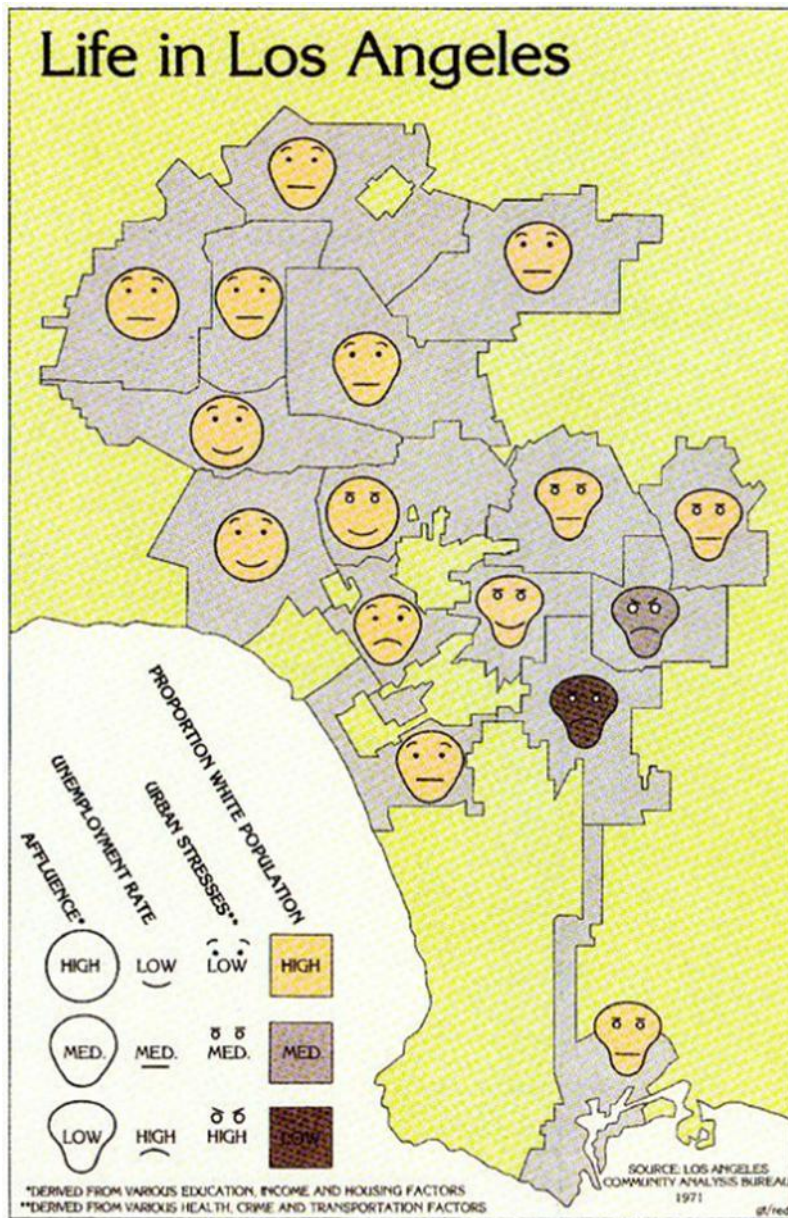
### 2.3.4 Διηρημένα σύμβολα

Τα πολυμεταβλητά σημειακά ή διηρημένα σύμβολα χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση δύο ή περισσότερων μεταβλητών για σημειακά ή επιφανειακά φαινόμενα. Για μεταβλητές που συνδέονται άμεσα, συχνότερα χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα πίτας, όπου κάθε τομέας της αποδίδει το ποσοστό μιας κατηγορίας και το μέγεθος του κύκλου την απόλυτη τιμή (βλ. σχήμα 6). Στην περίπτωση των μη σχετιζόμενων μεταβλητών εφαρμόζονται πιο αφηρημένα σχήματα, όπως τα ακτινωτά (glyphs) ή πολυγωνικά σύμβολα (snowflakes), στα οποία κάθε ακτίνα αναπαριστά μια μεταβλητή, με το μήκος και άλλες οπτικές μεταβλητές (όπως απόχρωση ή υφή) να αποδίδουν τιμές. Οι μέθοδοι αυτοί, ενώ προσφέρουν πλούσια πληροφόρηση, η πολυπλοκότητά τους δυσχεραίνει τη σύγκριση και την κατανόηση, ειδικά σε χάρτες πολλές πληροφορίες.



Σχήμα 6. Αναλογικά διαγράμματα πίτας για την απεικόνιση της μορφής ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε χώρα του Ηνωμένου Βασιλείου. Πηγή: Office for National Statistics (ONS).

Μια πιο εντυπωσιακή, αλλά απαιτητική στη χρήση, προσέγγιση είναι τα πρόσωπα Chernoff, στα οποία κάθε χαρακτηριστικό του προσώπου (μάτια, στόμα, μύτη κ.λπ.) αντιστοιχεί σε διαφορετική μεταβλητή. Παρότι, επιτρέπουν την απεικόνιση έως και 15 μεταβλητών, δημιουργούν ερμηνευτική δυσκολία, κινδύνους παρερμηνείας και ζητήματα οπτικής σύγχυσης, ιδίως όταν οι εκφράσεις που προκύπτουν δεν ευθυγραμμίζονται με τη φύση των δεδομένων ή ενισχύουν κοινωνικά στερεότυπα (Turner, 2010). Για τον λόγο αυτό, συνιστάται η περιορισμένη και προσεκτική χρήση τους. Στον Χάρτη 5 απεικονίζονται τα κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά των γειτονιών του Λος Άντζελες με τη χρήση των προσώπων Chernoff (Turner, 1977), όπου κάθε πρόσωπο αντιπροσωπεύει μία γειτονιά, ενώ τα χαρακτηριστικά του (μάτια, στόμα, χρώμα δέρματος κ.λπ.) κωδικοποιούν διαφορετικές κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές.



Σχήμα 7. Απεικόνιση κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών των γειτονιών του Λος Άντζελες με τη χρήση προσώπων Chernoff. Πηγή: Turner, E. (1977). *Life in Los Angeles*.

### 2.3.5 Σύνθετοι δείκτες

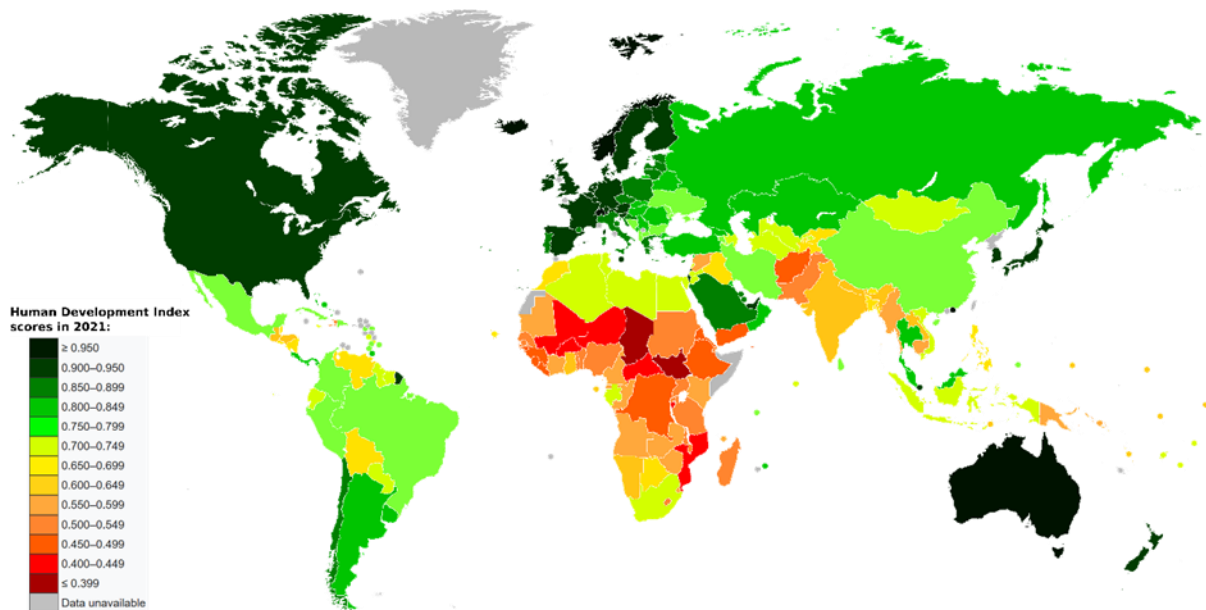
Μία άλλη κατηγορία πολυμεταβλητής χαρτογράφησης σε κοινό χάρτη είναι οι σύνθετοι δείκτες. Οι δείκτες αυτοί αποτελούν εργαλεία που επιτρέπουν τη συνολική αποτύπωση σύνθετων φαινομένων μέσω του συνδυασμού πολλών μεταβλητών σε μία και μόνο τιμή (Κόκλα & Νάκος, 2024). Στο πλαίσιο της χαρτογραφίας, ένας σύνθετος δείκτης απεικονίζεται συνήθως μέσω χωροπληθούς απεικόνισης, διευκολύνοντας την κατανόηση φαινομένων που επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές εφαρμογές, όπου η πολυπλοκότητα της πληροφορίας απαιτεί μια ενιαία, συνθετική προσέγγιση. Για παράδειγμα, η χαρτογράφηση της τρωτότητας σε φυσικούς κινδύνους βασίζεται συχνά σε τέτοιου είδους δείκτες.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των σύνθετων δεικτών είναι η ικανότητά τους να απλουστεύουν πολύπλοκα σύνολα δεδομένων, μετατρέποντας πολλαπλές παραμέτρους σε ένα κατανοητό και συγκρίσιμο οπτικό αποτέλεσμα. Έτσι, διευκολύνεται η ερμηνεία, η σύγκριση και η παρακολούθηση των φαινομένων που μελετώνται. Η ενιαία αριθμητική έκφραση του δείκτη καθιστά πιο εύκολη τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ περιοχών και συμβάλλει τελικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Η κατασκευή ενός σύνθετου δείκτη περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια, ξεκινώντας από την επιλογή κατάλληλων μεταβλητών που σχετίζονται με το φαινόμενο που μελετάται. Η επιλογή αυτή είναι σημαντικό να στηρίζεται σε επιστημονικά δεδομένα και αναγνωρισμένες μεθόδους. Έπειτα, πραγματοποιείται κανονικοποίηση των μεταβλητών, ώστε να αναχθούν οι τιμές τους στην ίδια αριθμητική κλίμακα και η σημασία των τιμών τους να είναι συγκρίσιμη μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών. Σε περιπτώσεις όπου οι μεταβλητές εκφράζουν αντίθετα νοήματα (π.χ. θετικές και αρνητικές επιδράσεις), εφαρμόζεται κατάλληλη τροποποίηση, όπως αντιστροφή τιμών.

Στη συνέχεια, κάθε μεταβλητή μπορεί να σταθμιστεί, δηλαδή να της αποδοθεί ένα βάρος που αντανακλά τη σχετική σημασία της στη σύνθεση του δείκτη. Αν όλες θεωρούνται ισοδύναμες, χρησιμοποιούνται ίσα βάρη, διαφορετικά, τα βάρη καθορίζονται με βάση τη σχετική επίδραση κάθε παράγοντα. Ο τελικός δείκτης προκύπτει μέσω κατάλληλου μαθηματικού συνδυασμού των σταθμισμένων μεταβλητών, συνήθως με προσθετικά μοντέλα, αν και είναι δυνατή η χρήση άλλων πράξεων (π.χ. πολλαπλασιασμός ή διαίρεση), ανάλογα με τη φύση του υπό εξέταση φαινομένου.

Σε διεθνές επίπεδο, ένας από τους πιο γνωστούς σύνθετους δείκτες είναι ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) (βλ. χάρτη 8). Ο συγκεκριμένος δείκτης συνδυάζει μεταβλητές που αφορούν την υγεία, την εκπαίδευση και το εισόδημα, ώστε να μετρήσει το επίπεδο ανάπτυξης μιας χώρας, όχι μόνο με οικονομικά κριτήρια αλλά και με κοινωνικά και ανθρωπιστικά. Στο πεδίο της παράκτιας διαχείρισης, εφαρμόζεται ευρέως ο Δείκτης Τρωτότητας Ακτών (Coastal Vulnerability Index – CVI), ο οποίος ενσωματώνει γεωμορφολογικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές για την αξιολόγηση της τρωτότητας των παράκτιων ζωνών απέναντι σε φαινόμενα όπως η διάβρωση ή η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας.



Σχήμα 8. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) για κάθε χώρα του πλανήτη το έτος 2021. Πηγή: Πρόγραμμα Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (2022), Έκθεση για την Ανθρώπινη Ανάπτυξη 2021-22, ΟΗΕ.

## Κεφάλαιο 3 Θεματική Χαρτογραφία στο Διαδίκτυο

Στη σύγχρονη εποχή, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο διαφόρων επιστημονικών κλάδων, μεταξύ των οποίων και της Χαρτογραφίας. Αρχικά, με την εμφάνιση της τυπογραφίας οι χειρόγραφοι χάρτες αντικαταστάθηκαν από τους έντυπους. Ακόμη πιο καθοριστική ήταν η μετάβαση στη ψηφιακή εποχή, με τους πρώτους εξ' ολοκλήρου ψηφιακούς χάρτες κινούμενης εικόνας να δημιουργούνται κατά τη δεκαετία του 1980 (Κόκλα και Νάκος, 2024), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για αλληλεπίδραση με τη γεωγραφική πληροφορία. Η πραγματική επανάσταση, ωστόσο, ήρθε με την ευρεία διάδοση του διαδικτύου από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία και διανομή διαδραστικών και δυναμικών διαδικτυακών χαρτών (web maps). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της σημερινής δημοτικότητας των διαδικτυακών χαρτών αποτελούν οι χάρτες Google Maps, που καταγράφουν πάνω από ένα δισεκατομμύριο ενεργούς χρήστες μηνιαίως (Google, 2024).

Η διαρκώς αυξανόμενη χρήση του διαδικτύου ανέδειξε μια νέα σχέση ανάμεσα στη Χαρτογραφία και τους χρήστες, με αποτέλεσμα οι χάρτες να γίνουν μέρος της καθημερινότητας των πολιτών. Οι χρήστες πλέον αλληλεπιδρούν ενεργά με διαδικτυακούς χάρτες μέσω προσωπικών υπολογιστών, φορητών συσκευών και έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones), επηρεάζοντας κοινωνικούς, οικονομικούς και πολιτιστικούς τομείς της ζωής τους. Η δυνατότητα διαδραστικότητας και δυναμικότητας που παρέχουν οι διαδικτυακοί χάρτες ενισχύει την κατανόηση χωρικών δεδομένων και πληροφοριών, διευκολύνοντας την επικοινωνία και την ερμηνεία σύνθετων χωρικών φαινομένων. Ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web), παρότι προσφέρει πρωτοφανείς δυνατότητες στη διάχυση χαρτογραφικών δεδομένων, φέρνει επίσης καινούριες προκλήσεις για τους χαρτογράφους (Kraak, 2001, στο: Kraak & Brown, 2001), όπως η ανάγκη συνεχούς ενημέρωσης των χαρτών και η διαχείριση τεράστιου όγκου πληροφοριών.

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί ποικίλες προσεγγίσεις και ορισμοί σχετικά με τη διαδικτυακή χαρτογραφία και τους διαδικτυακούς χάρτες, κάτι που δείχνει ότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές απόψεις και τρόποι προσέγγισης γύρω από το αντικείμενο. Ο Neumann (2012) ορίζει τη δημιουργία διαδικτυακών χαρτών ως τη διαδικασία σχεδιασμού, υλοποίησης, παραγωγής και δημοσιοποίησης χαρτών μέσω του Παγκόσμιου Ιστού. Ένας άλλος ευρύτερα διαδεδομένος ορισμός είναι εκείνος του Sack (2017) όπου αναφέρει ότι οι διαδικτυακοί χάρτες είναι εκείνοι των οποίων η διάθεση και πρόσβαση γίνεται αποκλειστικά μέσω του διαδικτύου. Η διαδικτυακή χαρτογράφηση στηρίζεται κυρίως στη γεωχωρική πληροφορία, την οπτική της αναπαράσταση μέσω χαρτών, τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και τον ίδιο τον Παγκόσμιο Ιστό, καθιστώντας τους χάρτες προσβάσιμους και δυναμικούς (Veenendaal et al., 2017).

### 3.1 Κατηγοριοποίηση των Διαδικτυακών Θεματικών Χαρτών

Μια από τις πρώτες προσπάθειες ταξινόμησης ηλεκτρονικών χαρτών έγινε από τον Ormeling (1995), ο οποίος πρότεινε τρεις βασικές κατηγορίες: χάρτες μόνο για προβολή (view-only atlases), διαδραστικούς χάρτες (interactive atlases) και αναλυτικούς χάρτες (analytical atlases), που περιλαμβάνουν και δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Kraak (2001) ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν ειδικά με την ταξινόμηση των διαδικτυακών χαρτών. Συγκεκριμένα, ξεχώρισε τους διαδικτυακούς χάρτες σε στατικούς

(static), οι οποίοι είναι απλές εικόνες χωρίς αλληλεπίδραση, και δυναμικούς (dynamic), που μπορούν να ενημερώνονται και να προσφέρουν διαδραστικές λειτουργίες στον χρήστη.

Τις αρχικές προσεγγίσεις των Ormeling (1995) και Kraak (2001) διαδέχτηκε ο Neumann (2012), που πρότεινε μια πιο αναλυτική κατηγοριοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες δυνατότητες των διαδικτυακών χαρτών (web maps). Πιο αναλυτικά, παρουσιάζει μια σειρά τύπων διαδικτυακών χαρτών με αντίστοιχη περιγραφή των χαρακτηριστικών και των λειτουργιών τους. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένας χάρτης μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες, καθώς τα όρια μεταξύ τους δεν είναι απόλυτα. Ο Neumann (2012) προτείνει τις εξής έντεκα βασικές μορφές διαδικτυακών χαρτών:

- *Στατικοί διαδικτυακοί χάρτες (Static web maps):*

Είναι χάρτες μόνο για προβολή, χωρίς διαδραστικότητα ή κινούμενη εικόνα, που δημιουργούνται μία φορά και σπάνια ενημερώνονται. Συνήθως αποθηκεύονται σε μορφή εικόνας.

- *Δυναμικά παραγόμενοι διαδικτυακοί χάρτες (Dynamically created web maps):*

Δημιουργούνται κάθε φορά που ο χρήστης φορτώνει τη σελίδα, με βάση δυναμικές πηγές δεδομένων όπως βάσεις δεδομένων. Ο χάρτης παράγεται από τον διακομιστή μέσω Web Map Server ή ειδικού λογισμικού.

- *Διαδικτυακοί χάρτες κατανεμημένων πηγών δεδομένων (Distributed web maps):*

Αφορούν χάρτες που δημιουργούνται από δεδομένα τα οποία προέρχονται από διαφορετικούς διακομιστές. Η ανάκτηση και ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων γίνεται μέσω τεχνολογιών όπως το WMS (Web Map Server) ή mash-ups. Για παράδειγμα, ένας διακομιστής μπορεί να παρέχει το χαρτογραφικό υπόβαθρο, ενώ άλλοι διακομιστές να προσθέτουν διάφορα θεματικά επίπεδα πληροφορίας.

- *Κινούμενοι διαδικτυακοί χάρτες (Animated web maps):*

Απεικονίζουν αλλαγές στον χάρτη μέσα στον χρόνο, μέσω κινούμενης εικόνας (animation) σε γραφικές ή χρονικές μεταβλητές. Χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες, όπως SVG, Canvas, Flash, Java, και μπορεί να περιλαμβάνουν κάποιο βαθμό διαδραστικότητας. Σ'αυτήν την κατηγορία χαρτών ανήκουν, για παράδειγμα, οι χάρτες καιρού και κυκλοφορίας.

- *Διαδικτυακοί χάρτες σε πραγματικό χρόνο (Real-time web maps):*

Αφορούν χάρτες που ανανεώνουν το περιεχόμενό τους σε πραγματικό χρόνο, με ελάχιστη καθυστέρηση λίγων δευτερολέπτων ή λεπτών. Τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρες, αποστέλλονται σε διακομιστή, και ο χάρτης ενημερώνεται αυτόματα ή κατά απαίτηση. Παραδείγματα αποτελούν οι χάρτες καιρού, κυκλοφορίας και παρακολούθησης οχημάτων.

- *Εξατομικευμένοι διαδικτυακοί χάρτες (Personalized web maps):*

Δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη να παρεμβαίνει στον χάρτη, φιλτράροντας τα δεδομένα, επιλέγοντας ποια στοιχεία θα εμφανίζονται και εφαρμόζοντας προσωπικό στυλ

και χαρτογραφικό συμβολισμό. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση προτύπων όπως το SLD, που επιτρέπουν την αποστολή εξατομικευμένων ρυθμίσεων σε WMS διακομιστές.

- *Διαδικτυακοί χάρτες ανοικτής πρόσβασης και επαναχρησιμοποίησης (open, reusable web maps):*

Αφορούν πιο σύνθετα συστήματα χαρτογράφησης που προσφέρουν Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interface - API), επιτρέποντας την ενσωμάτωσή τους σε ιστοσελίδες και εφαρμογές τρίτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Google Maps API.

- *Διαδραστικοί διαδικτυακοί χάρτες (Interactive web maps):*

Πρόκειται για χάρτες που επιτρέπουν στον χρήστη να αλληλεπιδρά άμεσα με το περιεχόμενο, προσφέροντας λειτουργίες όπως η εξερεύνηση του χάρτη, η αλλαγή παραμέτρων, η πλοήγηση, η εμφάνιση πρόσθετων πληροφοριών σχετικά με τα δεδομένα του (μεταδεδομένα), καθώς και η διασύνδεση με άλλες πηγές. Αποτελούν σημαντική εξέλιξη, καθώς αντισταθμίζουν τους περιορισμούς της χαρτογράφησης σε οθόνη, όπως ο περιορισμένος χώρος, η χαμηλότερη ανάλυση και η περιορισμένη χρωματική παλέτα.

- *Αναλυτικοί διαδικτυακοί χάρτες (Analytic web maps):*

Προσφέρουν δυνατότητες χωρικής ανάλυσης δεδομένων μέσω Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), είτε χρησιμοποιώντας δεδομένα που παρέχει ο δημιουργός του χάρτη είτε με δεδομένα που ανεβάζει ο ίδιος ο χρήστης. Τα όρια μεταξύ αυτών των χαρτών και των πλήρων web GIS είναι συχνά δυσδιάκριτα, καθώς η ανάλυση μπορεί να γίνεται είτε στον διακομιστή (π.χ. με χρήση του προτύπου WPS που επιτρέπει την εκτέλεση χωρικών αναλύσεων από έναν απομακρυσμένο server) είτε σταδιακά και από την πλευρά του χρήστη, μέσω σύγχρονων εργαλείων όπως το OpenLayers.

- *Διαδικτυακοί άτλαντες (Online atlases):*

Αποτελούν συλλογές από διαφορετικούς διαδικτυακούς χάρτες, οργανωμένους συχνά ανά θέμα ή τομέα. Παρέχουν διαφορετικά επίπεδα διαδραστικότητας και σε ορισμένες περιπτώσεις περιλαμβάνουν και αναλυτικές λειτουργίες όπως αυτές που περιλαμβάνονται στα GIS. Οι σύγχρονοι διαδικτυακοί άτλαντες μπορούν να χρησιμοποιούν τρισδιάστατες απεικονίσεις ή τη χρήση υδρογείου αντί για δισδιάστατους χάρτες. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η σύγκριση της εξέλιξης φαινομένων στον χώρο και τον χρόνο, καθώς και η μελέτη μιας περιοχής υπό διαφορετικές θεματικές οπτικές. Ορισμένοι άτλαντες επιτρέπουν ακόμη και τη δημιουργία εξατομικευμένων χαρτών από τον ίδιο τον χρήστη.

- *Συνεργατικοί διαδικτυακοί χάρτες (Collaborative web maps):*

Αφορούν χάρτες που δημιουργούνται και βελτιώνονται συλλογικά από πολλούς χρήστες, με παρόμοια λογική με αυτή της Wikipedia. Παρότι η υλοποίησή τους είναι ακόμα σχετικά σύνθετη, έχουν μεγάλη προοπτική. Τεχνικά απαιτούν συστήματα που εξασφαλίζουν ότι γεωμετρικά στοιχεία κλειδώνονται κατά την επεξεργασία, ώστε να μην τροποποιούνται ταυτόχρονα από πολλούς χρήστες, και ότι γίνεται βασικός έλεγχος ποιότητας πριν τα δεδομένα δημοσιοποιηθούν. Παραδείγματα τέτοιων έργων είναι το OpenStreetMap, το WikiMapia και το iNaturalist.

## 3.2 Δημιουργία, Τεχνολογίες και Προσεγγίσεις Υλοποίησης

Η υλοποίηση των συστημάτων διαδικτυακών χαρτών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά προγραμματιστικά περιβάλλοντα, γλώσσες προγραμματισμού και πλαίσια διακομιστή (Neumann 2012).

Έτσι, τα βασικά στοιχεία που χρειάζονται για να υπάρξει ένας χάρτης στο διαδίκτυο είναι:

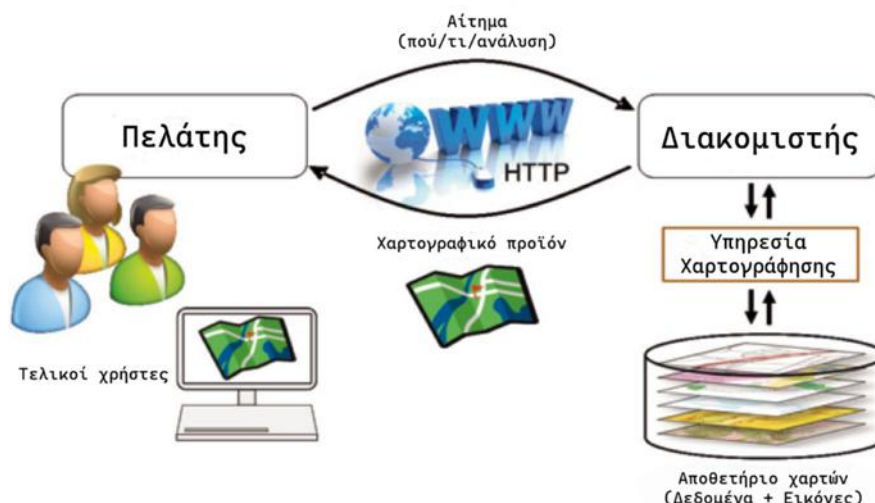
- *μια ψηφιακή σύνδεση στο διαδίκτυο,*
- *μια μονάδα υπολογιστή,*
- *και ένα λογισμικό για τη σύνταξη του κώδικα σε γλώσσα HTML και για τη δημιουργία των υπόλοιπων γραφικών.*

### 3.2.1 Αρχιτεκτονική και μοντέλο λειτουργίας

Για την υλοποίηση ενός διαδικτυακού χάρτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνολογίες, τόσο στην πλευρά του διακομιστή όσο και του τελικού χρήστη. Σύμφωνα με τον Kraak (2001), ένας στατικός χάρτης μπορεί να ενσωματωθεί σε μια ιστοσελίδα μέσω απλών αρχείων HTML και εικόνων, τα οποία προβάλλονται από τον φυλλομετρητή (browser), αξιοποιώντας τα πρωτόκολλα HTTP ή HTTPS. Όταν απαιτείται μεγαλύτερος βαθμός διαδραστικότητας, είναι δυνατή η προσθήκη λειτουργιών με γλώσσες προγραμματισμού όπως η JavaScript, καθώς και τεχνολογιών όπως το Dynamic HTML και το DOM. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετα εργαλεία (plugins), όπως το Flash ή εφαρμογές Java (Tzelepis, 2014).

Στην πλευρά του διακομιστή, οι πιο σύνθετες εφαρμογές βασίζονται σε προγραμματιστικά περιβάλλοντα και συνεργάζονται με συστήματα GIS ή βάσεις δεδομένων, ώστε να επεξεργάζονται τα αιτήματα των χρηστών και να παράγουν δυναμικούς χάρτες, συχνά μέσω του πρωτοκόλλου CGI. Όσο πιο εξελιγμένες είναι οι λειτουργίες ενός διαδικτυακού χάρτη, τόσο αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και εξοπλισμό, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για δημοφιλείς διαδικτυακές υπηρεσίες (Köbben, 2001). Για την αποφυγή υπερφόρτωσης του συστήματος, η επεξεργασία μπορεί να κατανεμηθεί σε περισσότερους διακομιστές ή να αξιοποιηθούν επιπλέον διαδικτυακές υπηρεσίες γεωχωρικών δεδομένων.

Παρακάτω περιγράφεται ένα αφηρημένο μοντέλο διαδικτυακών χαρτογραφικών υπηρεσιών και τελικών χρηστών όπως αναφέρεται στη δημοσίευση του Stefanakis (2017) (βλ. σχήμα 9). Ο διακομιστής ή εξυπηρετητής (server), που βρίσκεται στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος, αντιπροσωπεύει τον πάροχο του χαρτογραφικού περιεχομένου. Ο server διαθέτει πρόσβαση σε μια «αποθήκη» γεωχωρικών δεδομένων και εικόνων, και προσφέρει μια υπηρεσία χαρτογράφησης, η οποία δημιουργεί τους κατάλληλους χάρτες με βάση τις παραμέτρους που ορίζει ο χρήστης στο αίτημά του. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν την περιοχή ενδιαφέροντος, το θεματικό περιεχόμενο και το επίπεδο μεγέθυνσης. Το τελικό χαρτογραφικό προϊόν αποστέλλεται στους τελικούς χρήστες για προβολή και χρήση.



Σχήμα 9. Αφηρημένο πλαίσιο αλληλεπίδρασης μεταξύ διαδικτυακών παρόχων, χαρτογραφικών υπηρεσιών και τελικών χρηστών (πηγή: Stefanakis, 2017, με τροποποίηση).

### 3.2.2 Εξέλιξη τεχνολογιών και σύγχρονες εφαρμογές

Οι τεχνολογίες των διαδικτυακών χαρτών εξελίχθηκαν ραγδαία τα τελευταία χρόνια, ακολουθώντας τη γενικότερη πρόοδο στις τεχνολογίες του διαδικτύου. Η ανάγκη για διαδραστικότητα, γρήγορη απόκριση και περίπλοκα γραφικά δεδομένα οδήγησε στην χρήση νέων εργαλείων και προτύπων τόσο στην πλευρά του διακομιστή (server) όσο και του πελάτη (client).

Η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το HTML5, η JavaScript και το WebGL έχει αλλάξει ριζικά την παραγωγή χαρτών, επιτρέποντας τη δημιουργία δυναμικών, διαδραστικών χαρτογραφικών εφαρμογών που εκτελούνται απευθείας στον φυλλομετρητή χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης λογισμικού. Εργαλεία όπως το SVG και το Canvas, σε συνδυασμό με τις βιβλιοθήκες Leaflet, OpenLayers και Mapbox GL JS, επέτρεψαν την εύκολη οπτικοποίηση γεωχωρικών δεδομένων, είτε σε μορφή raster είτε vector. Παράλληλα, η υιοθέτηση ανοιχτών προτύπων όπως το GeoJSON, το TopoJSON και τα πρωτόκολλα WMTS/OGC, ενίσχυσαν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ υπηρεσιών και εφαρμογών. Συνοπτικά, οι τεχνολογικές εξελίξεις στο διαδίκτυο, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη σύγχρονων βιβλιοθηκών και προτύπων, έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στη ραγδαία πρόοδο των διαδικτυακών χαρτών και στη μετάβασή τους σε πλούσιες, διαδραστικές και αποδοτικές εφαρμογές (Zunino et al., 2020).

Επίσης, η τεχνολογία AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) αποτέλεσε βασικό πυλώνα για την ενίσχυση της διαδραστικότητας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη επικοινωνία του πελάτη-εξυπηρετητή, χωρίς την ανάγκη ανανέωσης ολόκληρης της σελίδας κάθε φορά. Οι Veenendaal et al. (2017) περιγράφουν αυτή τη σύμπραξη τεχνολογιών (JavaScript, XML, AJAX) ως την απαρχή των σύγχρονων δυναμικών χαρτών στον παγκόσμιο ιστό.

Μία σημαντική εξέλιξη στην ταχύτερη απόδοση των διαδικτυακών χαρτών αποτέλεσε και η υιοθέτηση των χαρτογραφικών πινακίδων (tiles), αρχικά με τα raster tiles και στη συνέχεια και με τα vector tiles. Η τεχνολογία αυτή επέτρεψε την ομαλή αλληλεπίδραση και καλύτερη προσαρμογή της χαρτογραφικής απεικόνισης ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μεγάλων χαρτογραφικών συνόλων.

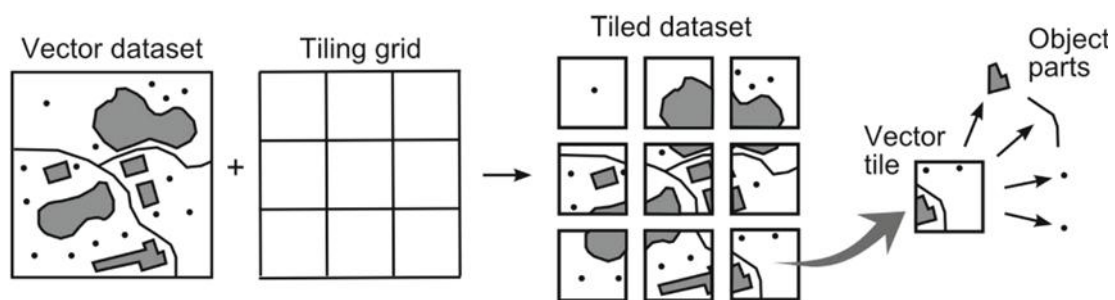
### 3.2.3 Χαρτογραφικές Πινακίδες (Map Tiles)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι πρώτοι ψηφιακοί χάρτες που εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 παρουσιάζονταν ως στατικές εικόνες μέσα από τις ιστοσελίδες. Με την πάροδο του χρόνου, και ιδιαίτερα μετά το 2005, σημειώθηκε σημαντική τεχνολογική πρόοδος με την υιοθέτηση της τεχνικής των χαρτογραφικών πινακίδων (map tiles) και της προβολής Web Mercator από την Google Maps, όπως επισημαίνει ο Stefanakis (2017).

Η χρήση των χαρτογραφικών πινακίδων (tiles) αποτελεί βασική τεχνική στη σύγχρονη διαδικτυακή χαρτογραφία, καθώς επιτρέπει τη σταδιακή φόρτωση μόνο του τμήματος του χάρτη που βλέπει ο χρήστης και όχι ολόκληρου του dataset. Έτσι, εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση και άμεση απόκριση, επιτρέποντας τη δημιουργία διαδραστικών χαρτών με ομαλή πλοήγηση και υψηλή αισθητική, ακόμη και σε πολύ μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Παραδοσιακά, οι διαδικτυακοί χάρτες βασίζονταν σε ψηφιδωτά πλακίδια (raster tiles), δηλαδή προ-αποθηκευμένες εικόνες σταθερού μεγέθους (π.χ. 256×256 pixels), που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες γεωγραφικές ζώνες και επίπεδα μεγέθυνσης (zoom levels). Από τεχνική άποψη, κάθε νέα βαθμίδα ζουμ διπλασιάζει τον αριθμό των πινακίδων και στις δύο διαστάσεις, οδηγώντας σε συνολικό αριθμό tiles ίσο με  $2^n \times 2^n$  για το επίπεδο ζουμ  $n$ . Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη φόρτωση του χάρτη, καθώς οι πινακίδες του (tiles) είναι ήδη αποθηκευμένες και εμφανίζονται χωρίς καθυστέρηση, αλλά περιορίζει τη διαδραστικότητα, αφού το περιεχόμενο του χάρτη είναι σε μορφή εικόνας και δεν μπορεί να τροποποιηθεί από τον χρήστη.

Αντιθέτως, τα διανυσματικά πλακίδια (vector tiles) αποτελούν μια νεότερη προσέγγιση, στην οποία μόνο η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά μεταφέρονται από τον server, ενώ η συμβολογία και η απεικόνιση υλοποιούνται στον client με βάση τα δεδομένα των πλακιδίων (Netek et al., 2020). Αυτό επιτρέπει τη δυναμική εμφάνιση των χαρτών, την αλληλεπίδραση με τα στοιχεία του χάρτη και την αλλαγή των χρωμάτων ή των συμβόλων του χάρτη σε πραγματικό χρόνο. Παρότι συνεπάγεται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ και σχεδιαστική πολυπλοκότητα, η τεχνική των vector tiles συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη προηγμένων και ευέλικτων web mapping εφαρμογών (Gaffuri, 2012). Στο σχήμα (βλ. σχήμα 10) εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας του Vector Tile.

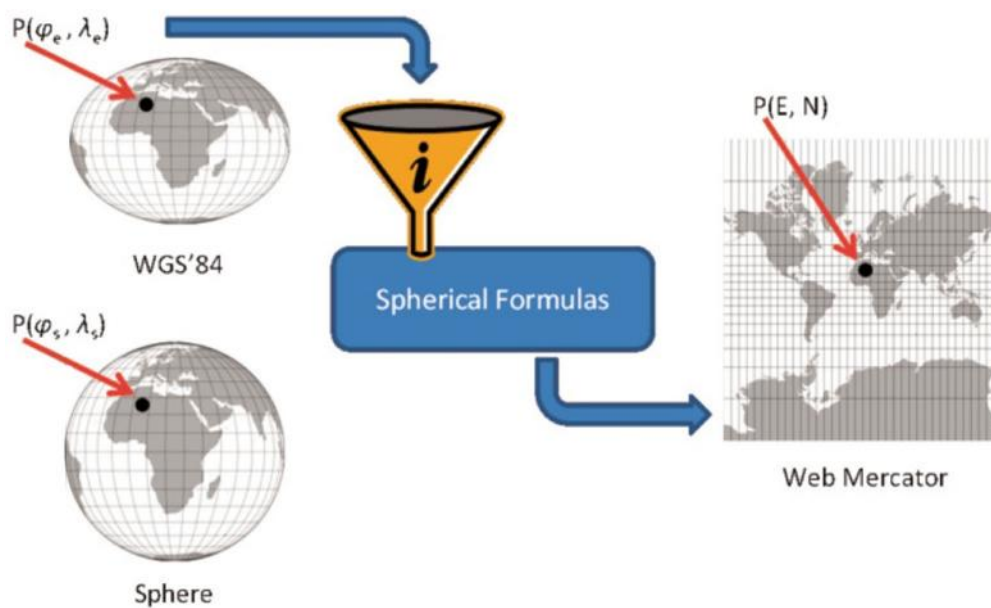


Σχήμα 10. Τρόπος λειτουργίας Vector Tile. Πηγή: Gaffuri (2012).

Συμπερασματικά, οι raster tiles έχουν σημαντικούς περιορισμούς: οποιαδήποτε αλλαγή στη θεματολογία ή στα δεδομένα απαιτεί επαναπαραγωγή όλων των tiles. Επιπλέον, είναι δυσκίνητα στην απεικόνιση μεγάλου όγκου θεματικών δεδομένων. Αντίθετα, οι vector tiles είναι πιο ευέλικτοι καθώς υποστηρίζουν δυναμική αλλαγή του συμβολισμού και προσφέρουν καλύτερη υποστήριξη για πλοήγηση πραγματικό χρόνο (π.χ. αισθητήρες, χρήστης σε κινητό).

### 3.2.4 Web Mercator

Το προβολικό σύστημα Web Mercator αποτελεί σήμερα το βασικό προβολικό σύστημα στους περισσότερους διαδικτυακούς χάρτες, όπως Google Maps, Bing Maps και OpenStreetMap, κυρίως λόγω της τεχνικής του απλότητας και της συμβατότητάς του με την ορθογώνια μορφή των οθονών. Πρόκειται για παραλλαγή της μερκατορικής προβολής, όπου τα γεωγραφικά δεδομένα προσδιορίζονται από συντεταγμένες στο ελλειψοειδές WGS84, αλλά απεικονίζονται χρησιμοποιώντας τους απλούστερους μαθηματικούς τύπους της σφαιρικής μερκατορικής προβολής. Το αποτέλεσμα είναι ένα ορθογώνιο γεωγραφικό πλέγμα με σταθερό προσανατολισμό (ο βορράς με κατεύθυνση προς τα πάνω), όπου οι παράλληλοι και οι μεσημβρινοί εμφανίζονται ως ευθείες κάθετες και οριζόντιες αντίστοιχα, στοιχισμένες με το πλέγμα των οθονών. Αν και παρουσιάζει παραμορφώσεις σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και αποκλείει τις πολικές περιοχές, είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για εφαρμογές μικρής κλίμακας και διαδραστικής πλοήγησης. Η ευρεία αποδοχή του από τις μεγαλύτερες διαδικτυακές πλατφόρμες χαρτογράφησης το έχει καθιερώσει ως το πρότυπο για προβολή χαρτών στο διαδίκτυο (Stefanakis, 2017). Στο σχήμα που ακολουθεί περιγράφεται ο μετασχηματισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων από το σύστημα WGS84 στο σύστημα Web Mercator.



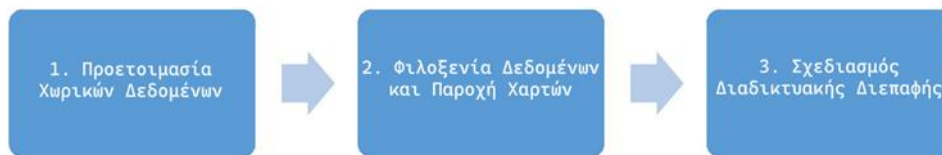
Σχήμα 11. Μετασχηματισμός γεωγραφικών συντεταγμένων WGS84 στο σύστημα Web Mercator. Πηγή: Stefanakis (2017).

### 3.3 Στάδια Δημιουργίας Διαδικτυακών Χαρτών

Σύμφωνα με τον Smith (2016) η διαδικασία ανάπτυξης διαδικτυακών χαρτογραφικών ιστοτόπων μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια (βλ. σχήμα 12):

- Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία των αρχικών δεδομένων του χάρτη, είτε από ανοιχτούς ιστότοπους δεδομένων είτε από πρωτογενή καταγραφή. Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο λογισμικό GIS.

- Το δεύτερο στάδιο αποτελεί μια διαδικασία μετάβασης από τον τοπικό υπολογιστή στον διακομιστή (*desktop-to-server*), κατά την οποία τα χωρικά δεδομένα μεταφορτώνονται στο διακομιστικό περιβάλλον και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας υπηρεσίας χαρτογράφησης. Η υπηρεσία αυτή αναλαμβάνει να αποστέλλει τα δεδομένα του χάρτη στον *browser* του χρήστη. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να υλοποιηθεί αυτή η διαδικασία, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.
- Το τρίτο στάδιο της διαδικασίας εστιάζει στον σχεδιασμό της ιστοσελίδας και στην υλοποίηση της διεπαφής του χάρτη μέσω βιβλιοθηκών *web mapping*, που αναλαμβάνουν την επικοινωνία ανάμεσα στον *browser* και τις διαδικτυακές υπηρεσίες χαρτογράφησης. Το στάδιο αυτό είναι καθοριστικής σημασίας για την ενσωμάτωση διαδραστικών λειτουργιών και για τη συνολική φιλικότητα προς τον χρήστη της εφαρμογής.



Σχήμα 12. Στάδια δημιουργίας χαρτών στο διαδίκτυο. (Πηγή: Smith, 2016, με τροποποίηση).

### 3.4 Προσεγγίσεις ανάπτυξης διαδικτυακών θεματικών χαρτών

Σύμφωνα με τον Smith (2016), υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις ανάπτυξης διαδικτυακών θεματικών χαρτών: η αυτοφιλοξενούμενη (*self-hosted*) χαρτογράφηση ιστού, η χαρτογράφηση μέσω υπηρεσιών *cloud* και η χαρτογράφηση τύπου *infographic*. Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ανάλογα με το τεχνικό υπόβαθρο του χρήστη, τον επιθυμητό βαθμό διαδραστικότητας και την κλίμακα των δεδομένων.

#### Αυτοφιλοξενούμενη χαρτογράφηση ιστού:

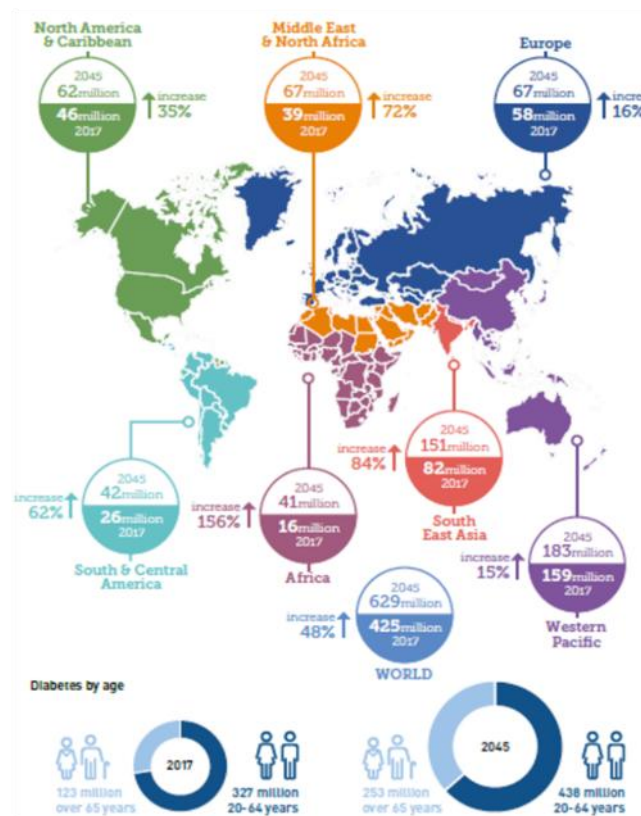
Η αυτοφιλοξενούμενη προσέγγιση προϋποθέτει ότι ο δημιουργός της εφαρμογής διαθέτει και διαχειρίζεται τον διακομιστή στον οποίο φιλοξενούνται τα δεδομένα και οι υπηρεσίες χαρτογράφησης. Παρά το αυξημένο τεχνικό κόστος και την ανάγκη για εξειδικευμένες γνώσεις (π.χ. *PostGIS*, *Mapnik*, *OpenLayers*), προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ευελιξία στον σχεδιασμό, την απόδοση και τη διαδραστικότητα των χαρτών. Είναι κατάλληλη για ερευνητικές εφαρμογές που απαιτούν λειτουργίες αυξημένης πολυπλοκότητας, αλλά και υποστήριξη μεγάλου όγκου δεδομένων.

#### Χαρτογράφηση μέσω υπηρεσιών *cloud*:

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε τρίτες πλατφόρμες, όπως το *Mapbox* και το *CartoDB*, οι οποίες αναλαμβάνουν την αποθήκευση και απόδοση των δεδομένων στο *cloud*. Αν και περιορίζει τον έλεγχο του χρήστη πάνω στο χαρτογραφικό κομμάτι, διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία ανάπτυξης και καθιστά δυνατή τη δημιουργία θεματικών χαρτών ακόμα και από μη προγραμματιστές. Είναι ιδανική για εκπαιδευτικούς σκοπούς, εφαρμογές παρουσίασης, καθώς και για έργα που απαιτούν γρήγορη υλοποίηση ή μικρή τεχνική υποστήριξη.

#### Χαρτογράφηση τύπου *infographic*:

Η προσέγγιση των infographics εστιάζει κυρίως στην οπτικοποίηση δεδομένων μέσα από στατικά ή ημι-διαδραστικά γραφικά, συνήθως χωρίς δυνατότητες πλοήγησης ή ανάλυσης. Βασίζεται σε τεχνολογίες όπως JavaScript, SVG και D3.js και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε εφαρμογές ενημέρωσης του κοινού. Παρόλο που δεν υποστηρίζει εξερεύνηση δεδομένων, αυτό το είδος χαρτών μπορεί να απεικονίσει με σαφήνεια ένα βασικό μήνυμα ή να παρουσιάσει συνοπτικά ένα φαινόμενο. Συχνά συναντάται σε εφημερίδες ή ενημερωτικά site, όπου για παράδειγμα, ένας χάρτης μπορεί να δείχνει με έντονα χρώματα τις περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο, ή να απεικονίζει τα αποτελέσματα των εκλογών σε εθνικό επίπεδο (βλ. σχήμα 13).

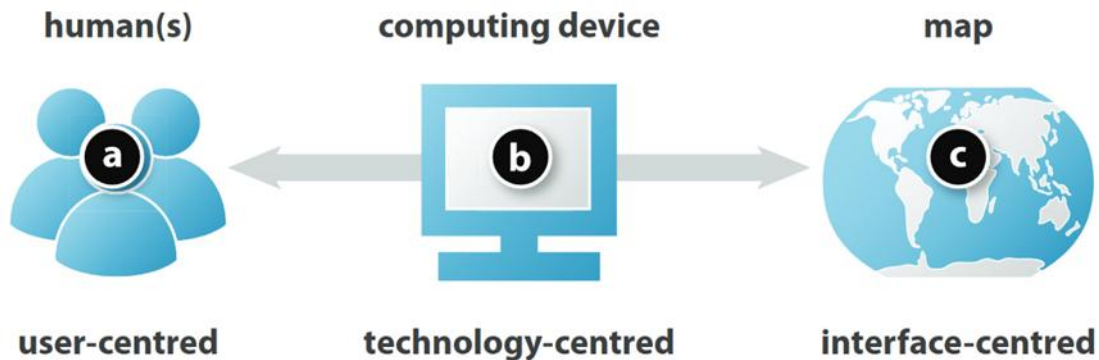


Σχήμα 13. Infographic με τον αριθμό των ατόμων που πάσχουν από ζαχαρώδη διαβήτη το 2017 και η πρόβλεψη για το 2045. Πηγή: Sharma et al. (2021).

### 3.5 Διαδραστικοί χάρτες

Η χαρτογραφική αλληλεπίδραση (cartographic interaction) αποτελεί τον διάλογο μεταξύ χρήστη και χάρτη μέσω υπολογιστικών συστημάτων και προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες να προσαρμόσουν την εμφάνιση των χαρτών σε πραγματικό χρόνο με βάση τις ανάγκες τους (Roth, 2013, Kraak et al., 2020). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην απεικόνιση σύνθετων φαινομένων και μεγάλου όγκου πληροφορίας, καθώς βοηθά στην αποκάλυψη προτύπων και τάσεων που δεν είναι εμφανείς σε έναν στατικό χάρτη. Στο Σχήμα 14 απεικονίζεται αυτή η αλληλεπίδραση.

# CARTOGRAPHIC INTERACTION



Σχήμα 14. Η αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη και χάρτη μέσω υπολογιστή. (Πηγή: Roth, 2013).

Η αλληλεπίδραση υλοποιείται μέσω τελεστών αλληλεπίδρασης (interaction operators), οι οποίοι αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία των διαδραστικών χαρτών. Οι τελεστές διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Kraak et al., 2020):

1. Τελεστές που μεταβάλλουν τον σχεδιασμό του χάρτη και επιτρέπουν στον χρήστη:
  - να απεικονίσει τις ίδιες πληροφορίες με διαφορετική μορφή θεματικού χάρτη ή διαγράμματος (reexpress),
  - να περιηγηθεί μέσα από μια προκαθορισμένη σειρά χαρτών, π.χ. κατάλληλη για την απεικόνιση μεταβολών στον χρόνο (sequence),
  - να προσθέσει επιπλέον θεματικά επίπεδα επάνω στο βασικό χαρτογραφικό υπόβαθρο (overlay),
  - να αλλάξει το υπόβαθρο που εμφανίζεται κάτω από τα δεδομένα του χάρτη (underlay),
  - να τροποποιήσει τον συμβολισμό του ίδιου θεματικού χάρτη, όπως για παράδειγμα τις μεθόδους ομαδοποίησης και τον αριθμό των κατηγοριών ή το χρωματικό σχήμα (resymbolize).
2. Τελεστές που μεταβάλλουν την οπτική γωνία θέασης και επιτρέπουν στο χρήστη:
  - να μετακινήσει το κέντρο του χάρτη οριζόντια ή κάθετα στην οθόνη (pan),
  - να αλλάξει το επίπεδο ζουμ, κάνοντας μεγέθυνση ή σμίκρυνση (zoom),
  - να μεταβάλλει την προβολή ή τον προσανατολισμό του χάρτη, για παράδειγμα περιστρέφοντας τον άξονα του Βορρά (reproject),
  - να αναδιατάξει τα διάφορα στοιχεία της απεικόνισης, όπως χάρτες, διαγράμματα ή πίνακες (arrange).
3. Τελεστές που μεταβάλλουν τα δεδομένα που απεικονίζονται και επιτρέπουν στο χρήστη:
  - να εκτελέσει αναζήτηση για συγκεκριμένα χαρτογραφικά αντικείμενα ή περιοχές (search),
  - να εφαρμόσει φίλτρα ώστε να περιορίσουν την προβολή των δεδομένων βάσει ορισμένων κριτηρίων (filter),
  - να ανακτήσει περισσότερες πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο στοιχείο που είναι ήδη ορατό στον χάρτη (retrieve),

- να υπολογίσει νέες τιμές ή στατιστικά βασισμένα σε υπάρχοντα δεδομένα του χάρτη (calculate).

Οι τελεστές αλληλεπίδρασης πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά με βάση το κοινό για το προορίζεται αλλά και το στόχο που θέλει να πετύχει ο χάρτης. Για παράδειγμα, ένας διαδικτυακός χάρτης που απευθύνεται στο ευρύ κοινό απαιτεί απλές λειτουργίες όπως μετάθεση (pan), μεγέθυνση (zoom) και ανάκτηση στοιχείων (retrieve). Αντίθετα, οι χάρτες εξερεύνησης υποστηρίζουν πιο σύνθετες λειτουργίες, όπως φιλτράρισμα (filter), αναζήτηση (search) και άλλους τελεστές απεικόνισης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα διαδραστικών χαρτών είναι τα χαρτογραφικά ταμπλό (dashboards), τα οποία συνδυάζουν διαδραστικούς χάρτες, διαγράμματα και φίλτρα για την πολυδιάστατη ανάλυση γεωχωρικών φαινομένων. Τέτοιες εφαρμογές ενσωματώνουν τελεστές για φιλτράρισμα, αναζήτηση, επίθεση επιπέδων και αλλαγή υποβάθρων, διευκολύνοντας την κατανόηση μεγάλου όγκου πληροφορίας.

Ωστόσο, σημειώνεται ότι η υπερβολική ενσωμάτωση τελεστών χωρίς ξεκάθαρη ανάγκη μπορεί να οδηγήσει σε πολύπλοκα και δυσλειτουργικά περιβάλλοντα, επηρεάζοντας αρνητικά την εμπειρία του χρήστη (Roth, 2013).

## Κεφάλαιο 4 Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (CVI)

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο δυναμικά και ταυτόχρονα ευάλωτα τμήματα του πλανήτη, καθώς επηρεάζεται τόσο από φυσικές διεργασίες, όπως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η παράκτια διάβρωση και τα έντονα καιρικά φαινόμενα, όσο και από τον ανθρωπογενή παράγοντα (Bird, 2008). Ωστόσο, η κλιματική αλλαγή έρχεται να εντείνει το πρόβλημα, αυξάνοντας την ένταση και τη συχνότητα αυτών των φαινομένων, δημιουργώντας σημαντικές πιέσεις στα παράκτια οικοσυστήματα και στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κινδύνων αυτών, απαιτείται η ανάπτυξη εργαλείων που να επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση αυτής της ευαισθησίας, συμβάλλοντας στη χωρική ανάλυση και στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των ακτών. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι ο Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (Coastal Vulnerability Index – CVI) που θα αναλυθεί παρακάτω.

### 4.1 Παράκτια Ζώνη

*Σύμφωνα με το άρθρο 2 του Πρωτοκόλλου για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση της Παράκτιας Ζώνης της Μεσογείου, της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2008) «Παράκτια ζώνη είναι η γεωμορφολογική περιοχή εκατέρωθεν της ακτογραμμής στην οποία η αλληλεπίδραση μεταξύ του θαλάσσιου και του χερσαίου τμήματος αποκτά τη μορφή πολύπλοκων συστημάτων οικολογικών στοιχείων και πόρων αποτελούμενων από βιοτικές και αβιοτικές συνιστώσες που συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν με τις ανθρώπινες κοινότητες και τις σχετικές κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες.»*

Ιστορικά, οι παράκτιες ζώνες υπήρξαν ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, αποτέλεσαν έναν ιδιαίτερα ελκυστικό χώρο εγκατάστασης, προσφέροντας αφθονία φυσικών, βιολογικών και οικονομικών ευκαιριών (Stanners & Bourdeau, 1995). Η εγγύτητα με τη θάλασσα διευκόλυνε το εμπόριο, την αλιεία και τις θαλάσσιες μεταφορές, ενώ παρείχε και πρόσβαση σε πλούσιους θαλάσσιους πόρους.

Στην παράκτια ζώνη σήμερα κατοικεί πολύ μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με μελέτες, περίπου 200 εκατομμύρια Ευρωπαίοι ζουν σε απόσταση μικρότερη των 50 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία των παράκτιων περιοχών για την ανθρώπινη δραστηριότητα και εγκατάσταση (Stanners & Bourdeau, 1995), ενώ σύμφωνα με άλλες έρευνες πάνω από το 60% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε παράκτιες περιοχές, γεγονός που αναδεικνύει τη στρατηγική σημασία των ζωνών αυτών για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη (Boye et al., 2018).

Οι παράκτιες πεδιάδες λόγω της υψηλής τους γονιμότητα υποστηρίζουν μεγάλο μέρος της γεωργικής παραγωγής, και ταυτόχρονα οι θαλάσσιοι πόροι συμβάλουν στην ανάπτυξη της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας (Dronkers et al., 1990). Επιπλέον, οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν σημαντικές υποδομές, όπως λιμάνια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις εξαιτίας της άμεσης πρόσβασης σε θαλάσσιους διαύλους μεταφοράς αλλά και της δυνατότητας εύκολης ψύξης μέσω θαλασσινού νερού σε μονάδες παραγωγής ενέργειας. Ο τουρισμός είναι ένας ακόμη σημαντικός τομέας που αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό χάρη στην ελκυστικότητα του τοπίου και των δραστηριοτήτων αναψυχής (Gilbert & Vellinga, 1990), αποτελώντας βασική πηγή εισοδήματος για πολλές χώρες.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν ποικίλους οικοτόπους, θαλάσσια λιβάδια, υγροτόπους τα οποία λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα των ρύπων και

παρέχουν τροφή και καταφύγιο σε πολλά είδη ζώων μερικά από τα οποία μάλιστα είναι απειλούμενα (U.S. EPA, 2015). Επιπλέον, οι παράκτιοι υγρότοποι, όπως οι αμμόλοφοι και τα θαλάσσια λιβάδια, μειώνουν την κυματική ενέργεια και προστατεύουν την ακτή από πλημμύρες και διάβρωση (Narayan et al., 2017).

Συνολικά, οι παράκτιες ζώνες αποτελούν κρίσιμο σύνδεσμο μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και ανθρώπινης δραστηριότητας, λειτουργώντας ταυτόχρονα ως οικολογικά καταφύγια και ως μοχλοί οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, τόσο σε εθνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ωστόσο, πολλοί είναι και οι κίνδυνοι που επηρεάζουν τις παράκτιες ζώνες και οφείλονται τόσο στην κλιματική αλλαγή και στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας όσο και στην ταχεία αύξηση του πληθυσμού και τις επακόλουθες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην παράκτια ζώνη, καθιστώντας τις περιοχές αυτές ιδιαίτερα επιρρεπείς στην διάβρωση.

## 4.2 Κίνδυνοι και Κλιματική Αλλαγή

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα δυναμικό και ευαίσθητο σύστημα που επηρεάζεται τόσο από φυσικές διεργασίες όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η διάβρωση των ακτών αποτελεί ένα πολύπλευρο και συνεχώς εξελισσόμενο φαινόμενο για τις παράκτιες περιοχές καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες και οι φυσικές διεργασίες (Watkins et al., 2021). Οι συνέπειες αυτών των διεργασιών γίνονται ορατές στα φυσικά οικοσυστήματα και στις ανθρώπινες δραστηριότητες που εξαρτώνται από τις παράκτιες περιοχές.

Με τον όρο κλιματική αλλαγή περιγράφεται η μεταβολή του κλίματος σε βάθος χρόνου, που προκύπτει είτε από φυσικές αιτίες είτε από την ανθρώπινη δραστηριότητα, με διάρκεια δεκαετιών ή μεγαλύτερη (IPCC, 2007). Μία από τις πιο αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής για τις παράκτιες περιοχές είναι η σταδιακή άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας (Sea Level Rise, SLR). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στη θερμική διαστολή των ωκεανών και το λιώσιμο των παγετώνων, αλλά και δευτερευόντως στις τεκτονικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά μήκος των παράκτιων ζωνών (Antonioli et al., 2020). Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2021) η άνοδος αυτή θα συνεχιστεί για πολλές δεκαετίες και μετά το 2100, ακόμα και αν επιτευχθεί δραστικός περιορισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα παραμείνει ένα κρίσιμο ζήτημα και για τις επόμενες δεκαετίες, επηρεάζοντας όλο και περισσότερο τις παράκτιες περιοχές.

Στη Μεσόγειο, οι παράκτιες πεδινές περιοχές χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη ευπάθεια. Σύμφωνα με μελέτες, η στάθμη της θάλασσας στη λεκάνη αυτή έχει αυξηθεί κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, ενώ την περίοδο 1993–2012 η άνοδος αυτή επιταχύνθηκε, φτάνοντας τα  $2,44 \pm 0,5$  mm ετησίως, ενώ σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Αδριατική και Αιγαίο) τα ποσοστά ανόδου είναι ακόμα μεγαλύτερα (Rizzo et al., 2022). Ο συνδυασμός της ανόδου της στάθμης, των τεκτονικών κινήσεων και της καθίζησης του εδάφους εντείνουν τον κίνδυνο πλημμυρών και διάβρωσης, ιδίως σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο ή αλλουβιακές πεδιάδες (Antonioli et al., 2020).

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, δημιουργεί πρόσθετους κινδύνους για τις παράκτιες ζώνες. Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνεται η

αυξημένη συχνότητα και ένταση των πλημμυρών από τις καταιγίδες και τα κύματα, καθώς και η υφαλμύρωση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, η παρατεταμένη άνοδος της στάθμης οδηγεί στη σταδιακή απώλεια υγροτόπων και άλλων παράκτιων οικοσυστημάτων, αλλά και σε εντονότερη διάβρωση των ακτών, ενώ σε ορισμένες περιοχές μπορεί να διαταραχθεί και η φυσική εναπόθεση ιζημάτων. Οι επιπτώσεις αυτές, όπως επισημαίνει ο Nicholls (2011), ενδέχεται να γίνουν εντονότερες τοπικά, ανάλογα με τη μορφολογία του παράκτιου χώρου και τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Είναι πλέον φανερό πως η αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων απαιτεί όχι μόνο μέτρα περιορισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό και προσαρμογή των παράκτιων περιοχών, προκειμένου να ανταποκριθούν στις διαρκώς μεταβαλλόμενες προκλήσεις. Η έγκαιρη προσαρμογή και προετοιμασία είναι απαραίτητη, ανεξάρτητα από το πόσο φιλόδοξοι θα είναι οι μελλοντικοί στόχοι μείωσης εκπομπών (IPCC, 2021).

### 4.3 Παράκτια τρωτότητα και εργαλεία διαχείρισής της

Σύμφωνα με την 4η αξιολόγηση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2007), τρωτότητα ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίο ένα σύστημα είναι ευάλωτο ή ανίκανο να ανταπεξέλθει στις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητότητας του κλίματος και των ακραίων καιρικών φαινομένων. Δηλαδή προκύπτει ως ο συνδυασμός της έκθεσης σε κινδύνους (όπως η άνοδος της στάθμης θάλασσας, η διάβρωση, οι πλημμύρες), της ευαισθησίας και της ικανότητας προσαρμογής του συστήματος. Η τρωτότητα επιτρέπει την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το περιβάλλον, αλλά και τους ανθρώπους, την οικονομία και τα πολιτιστικά στοιχεία που είναι πιθανό να επηρεαστούν.

Η αξιολόγηση και η χαρτογράφηση των παράκτιων κινδύνων και της τρωτότητας αποτελούν βασικά ζητήματα στη διαχείριση των παράκτιων περιοχών σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι διαδικασίες αυτές αποτελούν καθιερωμένες προσεγγίσεις που συμβάλλουν ουσιαστικά στην προετοιμασία για ορθολογικό σχεδιασμό χρήσεων γης, ειδικά σε περιοχές με υψηλή τρωτότητα. Ιδανικά, η εκτίμηση και η χαρτογράφηση των παραμέτρων αυτών θα πρέπει να αποτελεί το αρχικό στάδιο σε κάθε σχέδιο διαχείρισης, καθώς παρέχει μία συνολική εικόνα για τον εντοπισμό των παράκτιων περιοχών που διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο (Rangel-Buitrago et al., 2020).

Το πρώτο βήμα κάθε σχεδίου προσαρμογής περιλαμβάνει την κατανόηση και ποσοτικοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παράκτια τρωτότητα, ώστε να είναι εφικτή η στοχευμένη διαχείριση των κινδύνων και η αποτελεσματική κατανομή των πόρων (Rangel-Buitrago et al., 2020). Σύμφωνα με τους Nguyen et al. (2016), στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις σχετικά με τις μεταβλητές που θεωρούνται ότι επηρεάζουν την τρωτότητα των ακτών. Οι βασικές κατηγορίες αυτών των παραμέτρων είναι οι γεωλογικοί, οι υδροφυσικοί και οι κοινωνικοοικονομικοί. Η πλειονότητα των μελετών εστιάζει στους γεωφυσικούς παράγοντες που σχετίζονται με την παράκτια τρωτότητα, όπως η γεωμορφολογία, η άνοδος στάθμης της θάλασσας παρά σε κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες όπως ο πληθυσμός και η φτώχεια.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ποικίλες μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της τρωτότητας και του κινδύνου στις παράκτιες ζώνες, με τις πιο διαδεδομένες μεθόδους να περιλαμβάνουν τη χρήση δεικτών τρωτότητας (όπως ο Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας – Coastal Vulnerability Index - CVI). Σύμφωνα με ανασκόπηση των Roukounis & Tsihrintzis (2022), υπάρχει μεγάλη ποικιλία στον τρόπο που εφαρμόζονται αυτοί οι δείκτες και στα κριτήρια που επιλέγονται κάθε φορά, ενώ απουσιάζει ένα ενιαίο πλαίσιο, ειδικά όσον αφορά τα κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά. Τονίζεται επίσης ότι χρειάζονται πιο ολιστικές και ευέλικτες προσεγγίσεις, ώστε να αποτυπώνεται καλύτερα η τρωτότητα όχι μόνο του φυσικού περιβάλλοντος αλλά και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Σύμφωνα με το έγγραφο “Methods for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change” του IPCC (2011), για την εκτίμηση της παράκτιας τρωτότητας χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις προσεγγίσεις. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση δεικτών τρωτότητας (όπως ο Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας - CVI) καθώς συνδυάζουν μετρήσιμα χαρακτηριστικά της ακτογραμμής (π.χ. γεωμορφολογία, υψόμετρο, ύψος κυμάτων, εύρος παλίρροιας) σε έναν συνολικό δείκτη που αποτυπώνει τον σχετικό βαθμό τρωτότητας κάθε τμήματος της ακτής. Αυτές οι μέθοδοι είναι ευέλικτες, εύκολα εφαρμόσιμες και επιτρέπουν γρήγορη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών περιοχών.

Μία άλλη προσέγγιση χρησιμοποιεί τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και τις πολυκριτηριακές χωρικές αναλύσεις αξιοποιώντας τα χωρικά δεδομένα και συνδυάζοντας πολλαπλά θεματικά επίπεδα (όπως χρήση γης, πληθυσμιακή κατανομή, υψομετρικά δεδομένα και κίνδυνοι από τη θάλασσα) ώστε να εντοπίζουν και να χαρτογραφούν ζώνες με αυξημένη τρωτότητα. Τέλος, τα δυναμικά υπολογιστικά μοντέλα προσομοιώνουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις φυσικές διεργασίες (όπως κύματα, παλίρροιες, μεταβολές ακτογραμμής και ρυθμός ανόδου της στάθμης της θάλασσας), επιτρέποντας την ανάλυση πιθανών μελλοντικών σεναρίων και των επιπτώσεών τους στην παράκτια ζώνη.

Κάθε προσέγγιση έχει πλεονεκτήματα και περιορισμούς, και η επιλογή εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και τον σκοπό της μελέτης. Όπως αναφέρει ο Hinkel (2011), οι δείκτες τρωτότητας δεν είναι κατάλληλοι για τον καθορισμό στόχων μετριασμού, την ευαισθητοποίηση σχετικά με την κλιματική αλλαγή, τη διάθεση πόρων προσαρμογής ή την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των πολιτικών προσαρμογής. Παρ’ όλα αυτά, η χρήση των δεικτών τρωτότητας μπορεί να είναι χρήσιμη για τον εντοπισμό ευάλωτων περιοχών ή πληθυσμών, ιδίως όταν η ανάλυση περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο και βασίζεται σε λίγες και σαφώς προσδιορισμένες μεταβλητές που αντικατοπτρίζουν παρατηρούμενες βλάβες. Παρακάτω θα αναλυθεί εκτενώς ο Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (CVI).

#### 4.4 Ο δείκτης παράκτιας τρωτότητας CVI

Η χρήση του όρου Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (Coastal Vulnerability Index - CVI) προτάθηκε πρώτη φορά από την Gornitz (1991) με στόχο την αξιολόγηση της τρωτότητας των παράκτιων περιοχών στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό που έδωσαν οι Thieler και Hammar-Klose (1999), ο Δείκτης Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) είναι ένας σύνθετος δείκτης που προκύπτει από το συνδυασμό γεωλογικών, γεωμορφολογικών και ωκεανογραφικών μεταβλητών, με σκοπό την

ποσοτικοποίηση της σχετικής τρωτότητας της ακτής έναντι της ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Thieler and Hammar-Klose, 1999).

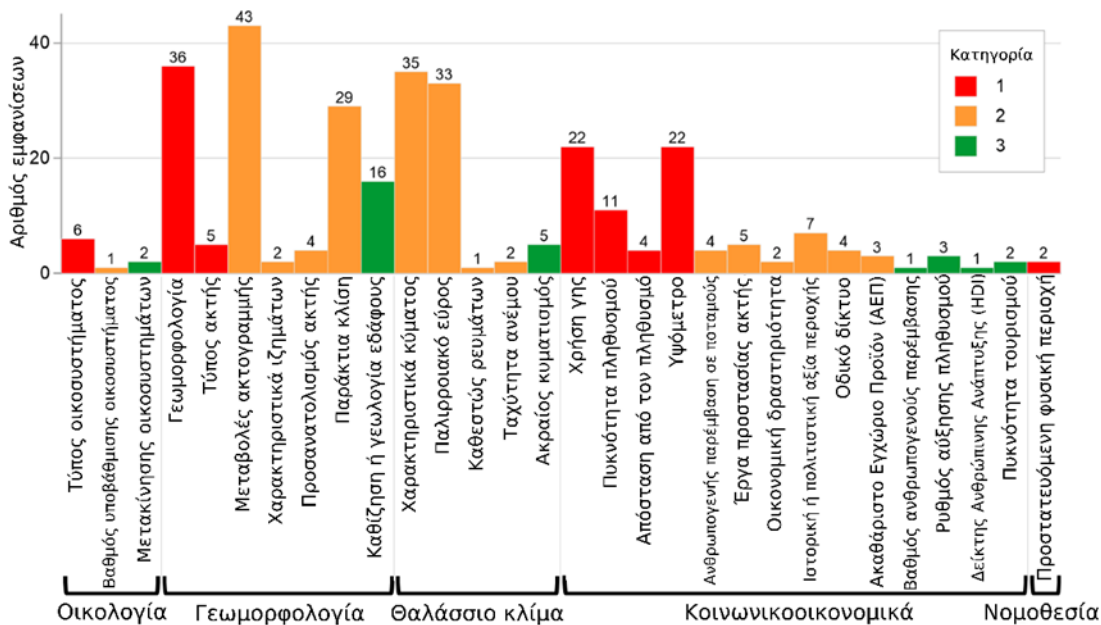
#### 4.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την παράκτια τρωτότητα

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι παράγοντες που υπολογίζονται στους δείκτες παράκτιας τρωτότητας είναι οι γεωλογικοί (γεωμορφολογία, ανάγλυφο, παράκτιο υψόμετρο, παράκτια κλίση, ρυθμός διάβρωσης/προσαύξησης ακτών, πλάτος θινών), οι υδροφυσικοί (μέση παλίρροια, μέσο σημαντικό ύψος κύματος, σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας, αριθμός ακραίων γεγονότων, κύμα καταιγίδας), και οι παράγοντες βλάστησης (τύπος βλάστησης παραλίας, υποθαλάσσια βλάστηση). Επιπλέον, σε διάφορες μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες (πυκνότητα πληθυσμού, ηλικία κατοίκων και κάλυψη γης) (Rakounis & Tsihritzis et al., 2022; Theocharidis et al., 2024).

Οι Cruz-Ramírez et al. (2024) εξετάζοντας 60 μελέτες των τελευταίων 29 ετών (1994–2023) διαπίστωσαν ότι η κάθε μελέτη χρησιμοποιεί διαφορετικό αριθμό μεταβλητών (από 3 έως 32), περιλαμβάνοντας κυρίως φυσικές παραμέτρους. Οι βασικές ταξινομήσεις των μεταβλητών που εντοπίστηκαν ήταν οι οικολογικές (τύπος οικοσυστήματος, βαθμός υποβάθμισης οικοσυστήματος), οι γεωμορφολογικές (τύπος γεωμορφολογίας, κλίση ακτής), οι θαλάσσιες (ρυθμός ανόδου στάθμης θάλασσας, παλιρροιακό εύρος), οι κοινωνικοοικονομικές (πυκνότητα πληθυσμού, οικονομική δραστηριότητα) και οι νομοθετικές (προστατευόμενες περιοχές). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεταβλητές παρατηρήθηκε ότι ήταν η μετατόπιση της ακτογραμμής, το ύψος κύματος, και ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης της θάλασσας. Στη μελέτη, οι μεταβλητές κατηγοριοποιούνται, επίσης, σύμφωνα με τις βαθμίδες ανάλυσης σε τρεις κατηγορίες ως εξής:

- Κατηγορία 1. Κυρίως ποιοτικές και εύκολες στην περιγραφή μεταβλητές. Παρέχουν μία αρχική και γρήγορη εκτίμηση της τρωτότητας.
- Κατηγορία 2. Επιτρέπουν πιο ακριβή ανάλυση και αποτύπωση των συνθηκών της παράκτιας ζώνης. Αυτές οι μεταβλητές είναι ποιοτικές και ποσοτικές, απαιτούν όμως περισσότερο χρόνο για συλλογή και ανάλυση.
- Κατηγορία 3. Επιτρέπουν μια πιο ολοκληρωμένη και σε βάθος ανάλυση. Η επεξεργασία και η εξαγωγή τους απαιτεί συνήθως περισσότερους υπολογιστικούς πόρους και χρόνο.

Στο σχήμα 15 φαίνονται οι ταξινομήσεις που πρότειναν οι Cruz-Ramírez et al. (2024) καθώς και το πλήθος εμφάνισης κάθε μεταβλητής στο σύνολο 60 μελετών.



Σχήμα 15. Ο αριθμός εμφάνισης κάθε μεταβλητής σε 60 μελέτες και η ταξινόμηση τους με βάση την θεματική κατηγορία αλλά και την κατηγορία σημαντικότητας. Πηγή: (Cruz-Ramírez et al., 2024) με τροποποίησηση.

#### 4.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του CVI

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό του δείκτη είναι η επιλογή των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της παράκτιας τρωτότητας. Το δεύτερο βήμα είναι η ποσοτικοποίηση των μεταβλητών σε μία συγκεκριμένη κλίμακα (π.χ. 1-5) ανάλογα με την συμβολή της παραμέτρου στην τρωτότητα των ακτών. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται με βάση τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές πληροφορίες (Theocharidis et al., 2024.)

Αναφορικά με τον τύπο υπολογισμού του CVI έχουν προταθεί διάφορες εξισώσεις. Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) για την αξιολόγηση της τρωτότητας της ακτογραμμής των ΗΠΑ σε εθνική κλίμακα (Thieler & Hammar-Klose et al., 1999) χρησιμοποίησε έξι ισοβαρείς μεταβλητές οι οποίες συνδυάστηκαν με τον ακόλουθο τύπο:

$$CVI = \sqrt{\frac{\alpha * \beta * \gamma * \delta * \epsilon * \sigma}{6}}$$

Όπου, α=γεωμορφολογία, β=ρυθμός μεταβολής της ακτογραμμής, γ=παράκτια κλίση, δ=σχετική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, ε=μέσο σημαντικό ύψος κύματος, στ=μέσο παλιρροιακό εύρος.

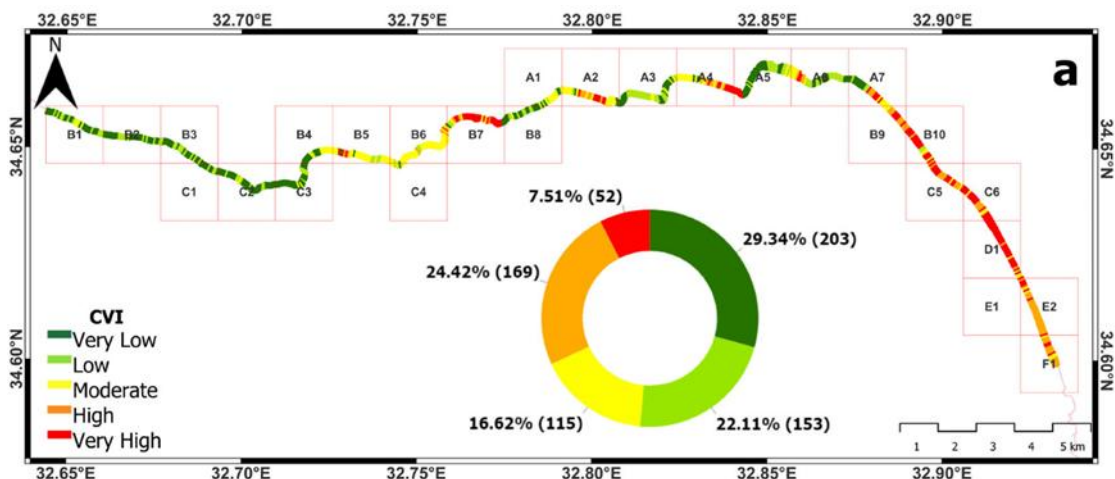
Έκτοτε οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο της τετραγωνικής ρίζας γεωμετρικού μέσου μεταβάλλοντας μόνο το πλήθος των μεταβλητών.

## 4.5 Παραδείγματα εφαρμογών παράκτιας τρωτότητας - Μέθοδοι οπτικοποίησης

### 4.5.1 Η προσέγγιση των Theocharidis et al. (2024) για τη Λεμεσό

Ένα κλασικό παράδειγμα εφαρμογής του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) αποτελεί η μελέτη των Theocharidis et al. (2024) που εφαρμόστηκε στην περιοχή δυτικά της Λεμεσού στην Κύπρο. Η ανάλυση του δείκτη βασίζεται σε οκτώ βασικές παραμέτρους: κάλυψη γης, κλίση ακτής, ρυθμός διάβρωσης της ακτογραμμής, παλιρροϊκό εύρος, σημαντικό ύψος κύματος, υψόμετρο ακτής, άνοδος στάθμης θάλασσας και παράκτια γεωμορφολογία. Οι μεταβλητές αυτές ταξινομούνται σε μία κλίμακα από το 1 έως το 5 ανάλογα με την συμβολή κάθε παραμέτρου στην τρωτότητα της ακτής. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποίησαν οι Thieler & Hammar-Klose (1999) με τη διαφορά ότι έχουν συμπεριληφθεί οκτώ παράμετροι.

Για την οπτικοποίηση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, δημιουργούνται διατομές κάθετα στην ακτογραμμή (transects) για να υπολογιστεί η τρωτότητα σε διαστήματα ανά 50 μέτρα. Στη συνέχεια, αυτή η πληροφορία αποδίδεται γραφικά πάνω στη γραμμική οντότητα της ακτογραμμής, ώστε να προκύψει ένας θεματικός χάρτης τρωτότητας. Ακολουθεί ο χάρτης με τα τελικά αποτελέσματα του δείκτη CVI.



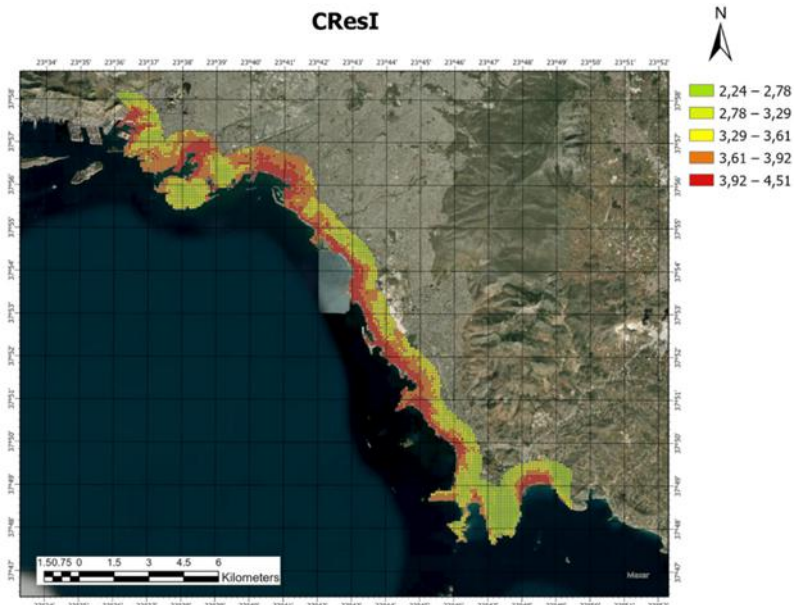
Σχήμα 16. Χάρτης του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) για την περιοχή δυτικά της Λεμεσού. Πηγή: Theocharidis et al. (2024).

### 4.5.2 Η προσέγγιση CResI των Roukounis et al. (2023) στην Αττική

Οι Roukounis et al. το 2023, πρότειναν μία λίγο διαφορετική προσέγγιση (από ότι ο κλασικός δείκτης CVI) για τη διαχείριση της παράκτια ζώνης με τη χρήση του δείκτη παράκτιας ανθεκτικότητας (Coastal Resilience Index - CResI). Ο δείκτης αυτός εξετάζει την ανθεκτικότητα των παράκτιων αστικών περιοχών της Αττικής σε πλημμύρες που προκαλούνται από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, λαμβάνοντας υπόψη 19 παραμέτρους που χωρίζονται σε 6 κατηγορίες (γεωμορφολογία, πλημμύρες, έκθεση κυμάτων, κοινωνικοοικονομικά, χρήσεις γης, υποδομές/λειτουργικότητα). Κάθε παράμετρος ταξινομήθηκε στην ενιαία κλίμακα από το 1 έως το 5. Έπειτα, σε κάθε μία εκχωρήθηκαν βάρη χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακή

ανάλυση και έπειτα τα τελικά αποτελέσματα υπολογίζονται με έναν μαθηματικό συνδυασμό των παραμέτρων αυτών.

Η οπτικοποίηση του δείκτη πραγματοποιήθηκε με χρήση πλέγματος (grid) διαστάσεων 100×100 μέτρων, τα οποία εκτείνονταν εντός της στεριάς σε απόσταση έως και 1000 μέτρων από την ακτογραμμή, ώστε να συμπεριληφθούν τα κρίσιμα χαρακτηριστικά της παράκτιας ζώνης. Ακολουθεί ο τελικός χάρτης με την εκτίμηση της ανθεκτικότητας της παράκτιας ζώνης.



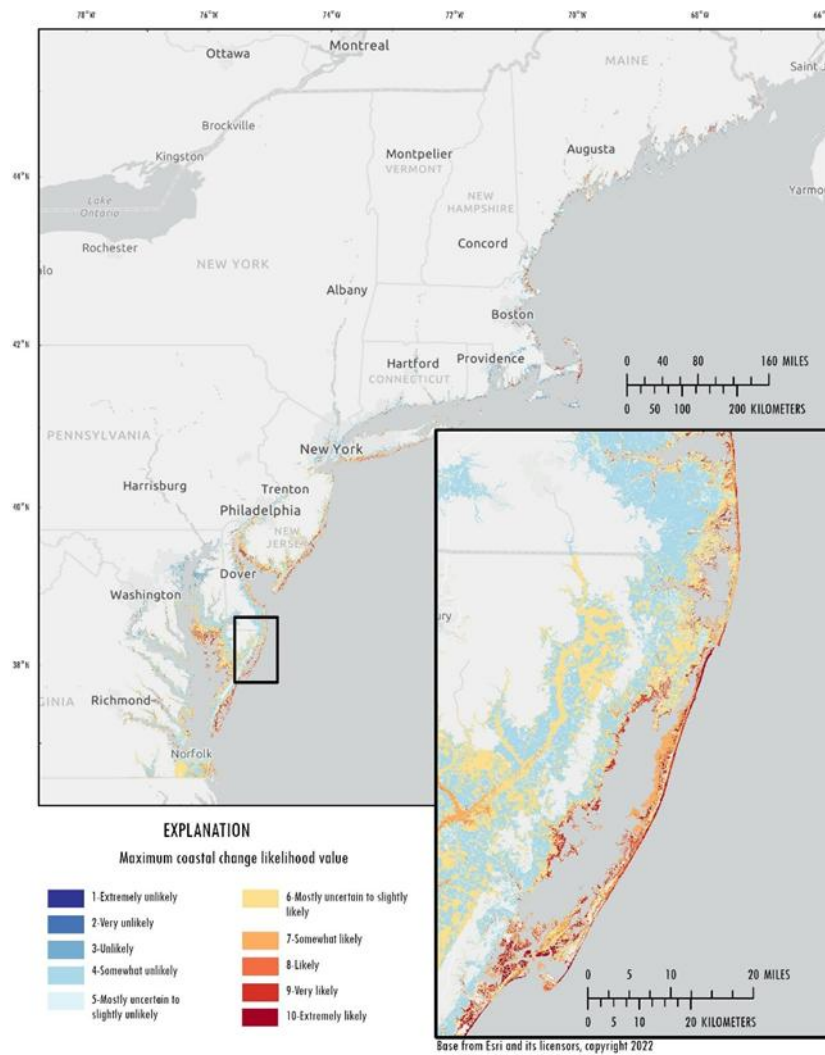
Σχήμα 17. Χάρτης εκτίμησης της ανθεκτικότητας της παράκτιας ζώνης της Αττικής, όπως υπολογίστηκε με τον δείκτη CResI. Πηγή: Roukounis et al. (2023).

#### 4.5.3 Η προσέγγιση της USGS για την Εκτίμηση Πιθανότητας Αλλαγών στην Παράκτια Ζώνη

Μία πολύ αξιόλογη και πρωτοποριακή μελέτη εκπονήθηκε από τη Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ με τίτλο “Development and application of a coastal change likelihood assessment for the Northeastern United States” και αφορά την ανάπτυξη ενός νέου δείκτη αξιολόγησης της πιθανότητας αλλαγής των παράκτιων ζωνών στη βορειοανατολική Αμερική, σε ορίζοντα δεκαετίας. Στόχος της έρευνας αυτής είναι ο εντοπισμός των περιοχών που κινδυνεύουν περισσότερο από αλλαγές όπως η διάβρωση, οι πλημμύρες και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί περισσότερες από 20 κατηγορίες θεματικών επιπέδων (π.χ. μορφολογία ακτογραμμής, δυναμική κυμάτων, πλημμυρικές ζώνες) οι οποίες ταξινομούνται σε συγκεκριμένη κλίμακα (συνήθως διαφορετική για κάθε μεταβλητή). Οι μεταβλητές αυτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, που ονομάζονται “fabric” (αντίσταση/ευπάθεια τοπίου) και “hazards” (κίνδυνοι από φυσικά φαινόμενα). Στη συνέχεια, το μοντέλο εκπαιδεύεται με εποπτευόμενο αλγόριθμο Machine Learning (ML) με βάση γνωστές αλλαγές της ακτογραμμής από το παρελθόν. Έτσι, ο εκπαιδευμένος πλέον αλγόριθμος μπορεί να συνδυάζει τα σημερινά δεδομένα και να αποδίδει την πιθανότητα μεταβολής της ακτογραμμής για κάθε σημείο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης παρέχονται σε επιφανειακή (raster/grid) μορφή, χωρική ανάλυση κάθε κελιού 10x10 μέτρα. Στον χάρτη του σχήματος 18

αποτυπώνεται το τελικό αποτέλεσμα της πιθανότητας παράκτιας αλλαγής στη βορειοανατολική ακτή των ΗΠΑ.



Σχήμα 18. Χάρτης πιθανότητας παράκτιας αλλαγής, όπως υπολογίστηκε με εποπτευόμενο μοντέλο μηχανικής μάθησης για τη βορειοανατολική ακτή των ΗΠΑ. Πηγή: USGS, 2022 (Harke et al.).

## Κεφάλαιο 5. Υπολογισμός του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI). Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ο τρόπος επιλογής, συλλογής, επεξεργασίας και ταξινόμησης των παραμέτρων που λήφθηκαν υπόψη για τη μελέτη της παράκτιας τρωτότητας της νήσου Λέσβου. Για τον υπολογισμό του δείκτη επιλέχθηκαν συνολικά οκτώ μεταβλητές εκ των οποίων οι τέσσερις αφορούσαν γεωλογικούς παράγοντες (παράκτιο υψόμετρο, παράκτια κλίση, παράκτια γεωμορφολογία, διάβρωση ακτής), οι τρεις υδροφυσικούς (σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας, μέσο σημαντικό ύψος κύματος, παλιρροιακό εύρος), ενώ μία παράμετρος αφορά την κάλυψη γης. Τα αρχικά δεδομένα αντλήθηκαν από διάφορες πηγές που βρίσκονταν σε διανυσματική ή ψηφιδωτή μορφή και μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο περιβάλλον του λογισμικού QGIS, ενσωματώθηκαν σε κάθε χωρική μονάδα ανάλυσης (πλέγμα ή διατομή).

Η ανάλυση έγινε με τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες: 1) με τη χρήση διατομών (transects) κάθετα στην ακτογραμμή, 2) με την εφαρμογή πλέγματος (fishnet) 200μ. x 200μ. κατά μήκος της ακτογραμμής και 3) πλέγματος 1.000μ. x 1.000μ. Για κάθε χωρική μονάδα υπολογίστηκαν οι τιμές των οκτώ παραμέτρων και στη συνέχεια ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες τρωτότητας από 1 (πολύ χαμηλή) έως 5 (πολύ υψηλή), ανάλογα με τον βαθμό συμβολής τους στη συνολική τρωτότητα των ακτών. Η τελική τιμή του δείκτη παράκτιας τρωτότητας προέκυψε με ισοβαρή συμμετοχή όλων των παραμέτρων, βάσει συγκεκριμένου μαθηματικού τύπου της μεθοδολογίας των Theocharidis et al. (2024).

Τέλος, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, αναδείχθηκαν οι περιοχές με υψηλή και αντίστοιχα οι περιοχές με χαμηλή τρωτότητα, γεγονός που μπορεί να αξιοποιηθεί για τη λήψη στοχευμένων μέτρων προστασίας. Επιπλέον, η σύγκριση των τριών μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν ανέδειξε ομοιότητες αλλά και διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματά τους, προσφέροντας μια πληρέστερη εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε μεθόδου.

### 5.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι η νήσος Λέσβος. Η Λέσβος είναι το τρίτο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και βρίσκεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο. Διοικητικά ανήκει στην ομώνυμη Περιφερειακή Ενότητα της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου. Σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛΣΤΑΤ το 2021 ο πληθυσμός του νησιού ήταν 83.754 κάτοικοι. Έχει έκταση 1.631 χλμ<sup>2</sup> και μήκος ακτογραμμής είναι 444,032 χιλιόμετρα, όπως προέκυψε από ανάλυση στο λογισμικό QGIS.

Το ανάγλυφο της Λέσβου χαρακτηρίζεται κυρίως ως ορεινό και ημιορεινό, με τις υψηλότερες κορυφές να είναι ο Λεπέτυμνος (968 μ.) στα βόρεια και ο Όλυμπος (967 μ.) στα νότια. Η γεωλογική δομή του νησιού χαρακτηρίζεται κυρίως από την παρουσία ηφαιστειογενών πετρωμάτων, τα οποία καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της έκτασής του (53,5%) (Λειβαδίτης & Αλεξούλη-Λειβαδίτη, 2004). Η ηφαιστειακή δραστηριότητα του παρελθόντος έχει συμβάλει στη δημιουργία εντυπωσιακών γεωμορφολογικών σχηματισμών, όπως το Απολιθωμένο Δάσος στη δυτική Λέσβο, καθώς και στη γενικότερη ποικιλομορφία του τοπίου με απότομες ακτές, πολυάριθμους κόλπους και παράκτιες πεδινές εκτάσεις.

Λόγω της σημαντικής αυτής γεωλογικής της κληρονομιάς, η Λέσβος έχει ανακηρυχθεί ως Παγκόσμιο Γεωπάρκο της UNESCO (2012), μεταξύ άλλων λόγω της σημαντικής γεωλογικής της κληρονομιάς, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα απολιθώματα που βρίσκονται στο δυτικό τμήμα του νησιού, όπου εκτείνεται το Απολιθωμένο Δάσος. Σύμφωνα με τον Ζούρο (2007), τα απολιθώματα αυτά βρίσκονται τόσο στην ξηρά όσο και σε παραθαλάσσιες αλλά και υποθαλάσσιες θέσεις. Η παράκτια διάβρωση για τα απολιθώματα είναι διπλής φύσης, από τη μία συνδράμει στην αποκάλυψη νέων ευρημάτων αλλά από την άλλη τα απειλεί με καταστροφή. Επομένως, η παράκτια διάβρωση αναγνωρίζεται ως μία από τις σημαντικότερες απειλές για τη διατήρηση των γεωμορφολογικών και παλαιοντολογικών στοιχείων του Απολιθωμένου Δάσους και ταυτόχρονα αναδεικνύεται η ανάγκη για μέτρα διαχείρισης και προστασίας των εκτεθειμένων απολιθωμάτων.

Η επιλογή, λοιπόν, της Λέσβου για τη μελέτη του δείκτη παράκτιας τρωτότητας έγινε κυρίως λόγω της μεγάλης γεωλογικής και γεωμορφολογικής ποικιλομορφίας του νησιού κάτι που την καθιστά ιδανική περιοχή για την ανάδειξη περιοχών με μεγάλη αλλά και μικρή παράκτια τρωτότητα. Παράλληλα, το νησί διαθέτει πλούσια οικοσυστήματα, στα οποία συγκαταλέγονται υγροβιότοποι, αμμοθίνες, αλμυρόβαλτοι και αλυκές. Οι παράκτιοι βιότοποι αποτελούν σημαντικά καταφύγια για πολλά πουλιά, ενώ μεγάλο μέρος του έχει ενταχθεί στο δίκτυο Natura 2000, επισημαίνοντας την ανάγκη για την αποτελεσματική προστασία τους. Τέλος, η διαπιστωμένη παράκτια τρωτότητα σε διάφορες περιοχές του νησιού όπως για παράδειγμα της Σκάλας Ερεσού υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης και εφαρμογής ολοκληρωμένων πολιτικών προστασίας των παράκτιων ζωνών.

## 5.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας βασίζεται στη μελέτη των Theocharidis et al. (2024) στην οποία έγινε εκτίμηση του δείκτη στη θαλάσσια περιοχή δυτικά της Λεμεσού. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι εξής οκτώ μεταβλητές για τον υπολογισμό του CVI:

- Κάλυψη γης
- Παράκτια κλίση
- Διάβρωση ακτής
- Παλιρροιακό εύρος
- Μέσο σημαντικό ύψος κύματος
- Παράκτιο υψόμετρο
- Σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας
- Παράκτια γεωμορφολογία

Οι συγκεκριμένες παράμετροι επιλέχθηκαν καθώς θεωρούνται καθοριστικές για την αξιολόγηση της τρωτότητας των παράκτιων περιοχών της Μεσογείου. Η επιλογή τους βασίστηκε τόσο στη συχνή χρήση τους σε παρόμοιες μελέτες όσο και στη δυνατότητά τους να αποτυπώσουν τις βασικές φυσικές και ανθρωπογενείς πιέσεις που δέχονται τα παράκτια συστήματα της περιοχής.

Έπειτα, ταξινομήθηκαν από το 1 (πολύ χαμηλή τρωτότητα) έως το 5 (πολύ υψηλή τρωτότητα) με βάση ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια με βάση την εργασία των Theocharidis et al. (2024) και των Pantusa et al. (2022). Στον παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακα 1) φαίνεται η ταξινόμηση που έγινε για κάθε μία παράμετρο.

Παράμετρος	Βαθμολογία CVI				
	Πολύ Χαμηλή (1)	Χαμηλή (2)	Μέτρια (3)	Υψηλή (4)	Πολύ υψηλή (5)
Κάλυψη γης	Δενδρώδης κάλυψη, δάσος	Έκταση με θαμνώδη βλάστηση, γυμνό έδαφος	Καλλιεργούμενες, χορτολιβαδικές εκτάσεις	Υγρότοπος με ποώδη βλάστηση	Δομημένη περιοχή, αστική περιοχή
Παράκτια κλίση (%)	>12	8-12	4-8	2-4	<2
Ρυθμός μεταβολής ακτής (m/y)	>2	1 - 2	(-1) - 1	(-2) - (-1)	< (-2)
Παλιρροιακό εύρος (m)	>6.0	4-6	2-4	1-2	<1
Μέσο σημαντικό ύψος κύματος (m)	0 – 0.55	0.55 – 0.85	0.85 – 1.05	1.05 – 1.25	> 1.25
Παράκτιο υψόμετρο (m)	>= 20	10 - 20	5 - 10	2 - 5	0 - 2
Σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας (mm/y)	<1.8	1.8 – 2.5	2.5 - 3	3 – 3.4	>3.4
Παράκτια γεωμορφολογία	Βραχώδεις, απόκρημνες ακτές	Μεσαίου ύψους απόκρημνες ακτές	Ακτές με χαμηλούς γκρεμούς	Ακτές με βότσαλα, εκβολές, λιμνοθάλασσες	Αμμώδεις ακτές, δέλτα ποταμών, αλυκές, ύφαλοι

Πίνακας 1. Οι παράμετροι και η κατάταξη τους για τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας.

Έπειτα για τον υπολογισμό του συνολικού δείκτη CVI χρησιμοποιήθηκε ο εξής μαθηματικός τύπος:

$$CVI = \sqrt{\frac{\alpha * \beta * \gamma * \delta * \varepsilon * \sigma\tau * \zeta * \eta}{8}}$$

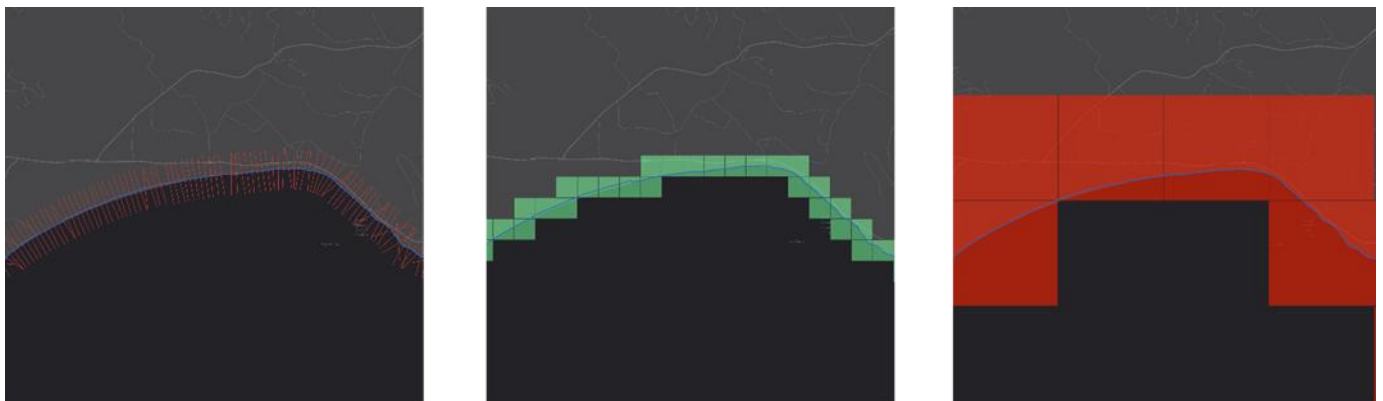
Όπου, α=κάλυψη γης, β=παράκτια κλίση, γ=διάβρωση ακτής, δ=παλιρροιακό εύρος, ε=μέσο σημαντικό ύψος κύματος, στ=παράκτιο υψόμετρο, ζ=σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η=παράκτια γεωμορφολογία.

Ο τύπος αυτός χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλες οι παράμετροι θα έχουν την ίδια βαρύτητα ενώ παράλληλα, δίνει μία ισορροπημένη εκτίμηση της τρωτότητας. Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες με στόχο την ποικιλία στους τρόπους απεικόνισης του φαινομένου αλλά και τη δυνατότητα ανάλυσης σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε μεθοδολογία συγκρίθηκαν μεταξύ τους, προκειμένου να αξιολογηθούν αυτές οι διαφορετικές προσεγγίσεις.

Πιο συγκεκριμένα, για την οπτικοποίηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διακριτές χωρικές μεθοδολογίες (βλ. σχήμα 19):

- Δημιουργήθηκαν κάθετες διατομές (transects) κατά μήκος της ακτογραμμής, με μήκος 400 μέτρα (η ακτογραμμή στο κέντρο κάθε διατομής) και μεταξύ τους απόσταση 50 μέτρων. Για κάθε διατομή αποδόθηκε μία τιμή τρωτότητας για κάθε παράμετρο, και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο τελικός δείκτης. Αυτή η πληροφορία αποδίδεται γραφικά στη γραμμική οντότητα της ακτογραμμής, ώστε να αποτυπώνονται καλύτερα χωρικά οι τιμές του δείκτη.
- Κατασκευάστηκε πλέγμα (fishnet) με διαστάσεις 200μ. x 200μ. κατά μήκος της ακτογραμμής, στο οποίο αποδόθηκαν οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη τρωτότητας.
- Εφαρμόστηκε επίσης πλέγμα με μεγαλύτερα κελιά, διαστάσεων 1.000μ. x 1.000μ., για την αποτύπωση και σύγκριση της τρωτότητας σε ευρύτερη κλίμακα κατά μήκος της ακτογραμμής.

Η τυπική μεθοδολογία υπολογισμού του CVI που χρησιμοποιείται και στις περισσότερες μελέτες βασίζεται στη δημιουργία διατομών κάθετων στην ακτογραμμή (transects) (Pantusa et al., 2022). Παρόλα αυτά, κατά τη βιβλιογραφική αναζήτηση παρατηρήθηκε ότι σε μερικές άλλες όπως στην δημοσίευση των Pendleton et al., (2010) χρησιμοποιείται μία εναλλακτική μέθοδος για τη χαρτογράφηση και τον υπολογισμό του δείκτη με τη χρήση χωρικών πλεγμάτων (grids). Η χρήση του πλέγματος δίνει τη δυνατότητα αποτύπωσης του φαινομένου σε ευρύτερο χωρικό επίπεδο και επιτρέπει την καλύτερη οπτικοποίηση του. Με αυτόν τον τρόπο, επιτεύχθηκε η ανάλυση και απεικόνιση της τρωτότητας τόσο σε λεπτομερές επίπεδο (μέσω των διατομών και του πυκνού πλέγματος) όσο και σε πιο γενικευμένη κλίμακα (μέσω του αραιότερου πλέγματος).



Διατομές κάθετες στην ακτογραμμή (Transects)

Πλέγμα (Fishnets) με διαστάσεις 200 x 200 m

Πλέγμα (Fishnets) με διαστάσεις 1000 x 1000 m

Σχήμα 19. Παράδειγμα των τριών μεθοδολογιών υπολογισμού του Δείκτη Τρωτότητας Ακτών (CVI) σε τμήμα της περιοχής μελέτης: (α) διατομές (transects) κάθετα στην ακτογραμμή, (β) πλέγμα fishnet 200μ x 200μ, (γ) πλέγμα fishnet 1.000μ x 1.000μ.

Οι τελικές τιμές του δείκτη ταξινομήθηκαν, και πάλι, σε πέντε ομάδες, αντίστοιχα με τις κατηγορίες των αρχικών παραμέτρων, όπου η κάθε μία είχε το ίδιο πλήθος εμφανίσεων (πεντημόρια), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κανονικής τμηματοποίησης (quantile).

Η συλλογή των δεδομένων των αρχικών παραμέτρων έγινε από διάφορες πηγές όπως για παράδειγμα από το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Θαλάσσιων Παρατηρήσεων και Δεδομένων

(EMODnet)<sup>1</sup>. Η επεξεργασία των δεδομένων και ο υπολογισμός του δείκτη και της τρωτότητας έγινε στο λογισμικό QGIS Desktop 3.16.11-Hannover<sup>2</sup>.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η δημιουργία των διατομών (transects), κάθετων στην ακτογραμμή, βασίστηκε στη μεθοδολογία που ακολουθεί το λογισμικό DSAS (Digital Shoreline Analysis System)<sup>3</sup>, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS)<sup>4</sup>. Ωστόσο, η εξαγωγή των διατομών έγινε με βάση γεωγραφικά και γεωμετρικά κριτήρια (όπως το μήκος και η μεταξύ τους απόσταση), και όχι βάσει της συνολικής χωροχρονικής μεταβολής της ακτογραμμής, οι διατομές δημιουργήθηκαν με πρωτότυπο κώδικα (Κατίκας, Κονταρίνης, & Γκιούλης, υπό δημοσίευση) ως απλούστερη εκδοχή της μεθοδολογίας του DSAS.

Στο ακόλουθο διάγραμμα ροής φαίνεται όλη η διαδικασία, επιλογής, υπολογισμού και ταξινόμησης των αρχικών παραμέτρων και στο τέλος φαίνεται ο τελικός υπολογισμός του δείκτη CVI. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού του δείκτη.

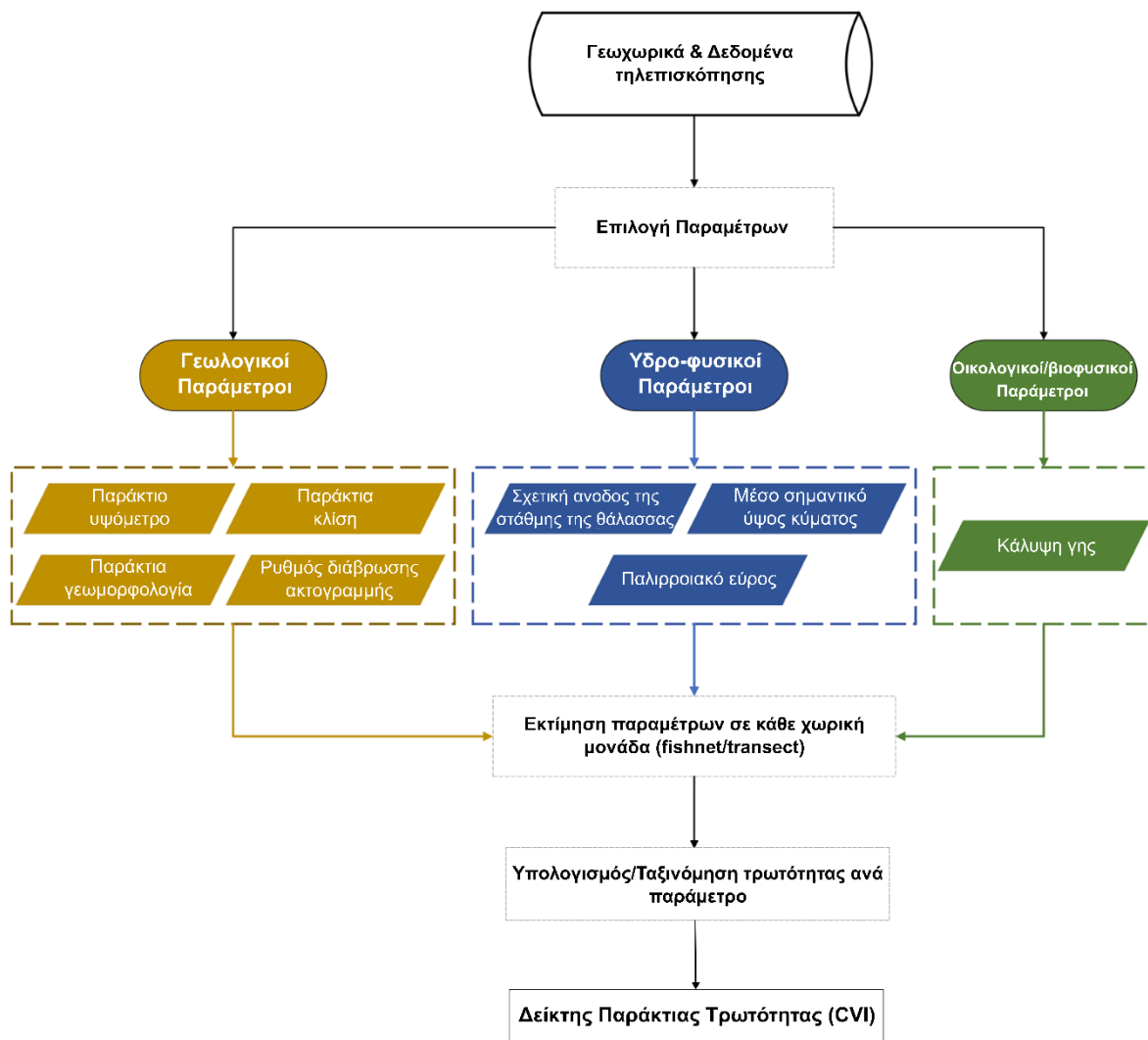
---

<sup>1</sup> <https://emodnet.ec.europa.eu>

<sup>2</sup> <https://qgis.org>

<sup>3</sup> <https://www.usgs.gov/centers/whcms/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>

<sup>4</sup> [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)



Σχήμα 20. Διάγραμμα ροής που παρουσιάζει τη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI).

### 5.3 Αρχικά Δεδομένα

Ο υπολογισμός του δείκτη παράκτιας τρωτότητας πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα με βάση τις μεταβλητές της μελέτης των Theocharidis et al. (2024). Από τις οκτώ παραπάνω παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του δείκτη στη Λέσβο, οι τέσσερις αφορούσαν γεωλογικούς παράγοντες (παράκτιο υψόμετρο, παράκτια κλίση, παράκτια γεωμορφολογία, διάβρωση ακτής), οι τρεις αφορούσαν υδροφυσικούς (σχετική ανοδος της στάθμης της θάλασσας, μέσο σημαντικό ύψος κύματος, εύρος παλίρροιας), ενώ μία παράμετρος αφορούσε την κάλυψη γης.

Τα αρχικά δεδομένα ήταν είτε σε διανυσματική (vector) είτε σε ψηφιδωτή (raster) μορφή και έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία ενσωματώθηκαν σε κάθε χωρική μονάδα αντίστοιχα (πλέγμα ή διατομή). Παρακάτω αναλύονται όλα τα αρχικά δεδομένα (βλ. Πίνακα 2) για κάθε παράμετρο και οι λόγοι για τους οποίους αυτές αποτελούν κρίσιμους παράγοντες στον υπολογισμό της παράκτιας τρωτότητας.

Μεταβλητή	Τύπος	Χωρική Ανάλυση	Χρονική Περίοδος	Πηγή
Παράκτιο Υψόμετρο	Raster	25 μ	2013	EU-DEM, <a href="https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/eng/catalog.search#/metadata/66fa7dca-8772-4a5d-9d56-2caba4ecd36a">https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/eng/catalog.search#/metadata/66fa7dca-8772-4a5d-9d56-2caba4ecd36a</a>
Παράκτια Κλίση	Raster	25 μ	2013	EU-DEM, <a href="https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/eng/catalog.search#/metadata/66fa7dca-8772-4a5d-9d56-2caba4ecd36a">https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/eng/catalog.search#/metadata/66fa7dca-8772-4a5d-9d56-2caba4ecd36a</a>
Παράκτια Γεωμορφολογία	Vector	-	-	<a href="https://gis.mwlesvos.gr/">https://gis.mwlesvos.gr/</a>
Διάβρωση Ακτής	Vector	-	-	<a href="https://chw-app.coastalhazardwheel.org/">https://chw-app.coastalhazardwheel.org/</a>
Απόλυτη Άνοδος της Στάθμης της Θάλασσας (ASLR)	Raster	8 χλμ.	1993-2012	<a href="https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description">https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description</a>
Τεκτονικές Μετακινήσεις Εδάφους	Vector	-	2019-2023	<a href="https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service/egms-ortho#download">https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service/egms-ortho#download</a>
Σημαντικό Ύψος Κύματος	Raster	4χλμ.	1993-2016	<a href="https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012/description">https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012/description</a>
Παλιρροιακό Εύρος	-	-	-	Tsimplis, M. N. (1994). Tidal characteristics of the Aegean Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 38(5), 517–527.
Κάλυψη Γης	Raster	10 μ	2021	<a href="https://worldcover2021.esa.int/download">https://worldcover2021.esa.int/download</a>

Πίνακας 2. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες πηγές τους.

### 5.3.1 Παράκτιο υψόμετρο

Το παράκτιο υψόμετρο αναφέρεται στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της στάθμης της θάλασσας και της στάθμης της ξηράς. Οι παράκτιες περιοχές με χαμηλό υψόμετρο είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας και στις καταιγίδες με υψηλούς κυματισμούς. Περιοχές με υψηλότερο υψόμετρο τείνουν να είναι λιγότερο ευπαθείς στη διάβρωση κατά τη διάρκεια καταιγίδων καθώς μπορούν να απορροφήσουν μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των κυμάτων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του παράκτιου υψομέτρου στην περιοχή μελέτης προήλθαν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους EU-DEM<sup>5</sup> του προγράμματος Copernicus. Σύμφωνα με την επίσημη σελίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το EU-DEM έχει δημιουργηθεί με βάση δεδομένα του SRTM και του ASTER GDEM τα οποία είναι δύο ανεξάρτητα δορυφορικά προγράμματα. Η χωρική ανάλυση των δεδομένων στην περιοχή μελέτης είναι 25m.

<sup>5</sup><https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/eng/catalog.search#/metadata/66fa7dca-8772-4a5d-9d56-2caba4ecd36a>

### 5.3.2 Παράκτια κλίση

Σύμφωνα με τη δημοσίευση των Kumar et al. (2010), ένας καθοριστικός παράγοντας για τον υπολογισμό της παράκτιας τρωτότητας είναι η κλίση του εδάφους. Η παράκτια κλίση αφορά στην επιπεδότητα ή μη της παράκτιας περιοχής, η οποία επηρεάζει τη διασπορά της κυματικής ενέργειας και τη μεταφορά των ιζημάτων (Kumar et al. 1979). Από τη σχετική βιβλιογραφία έχει προκύψει ότι όσο μικρότερη είναι η κλίση του εδάφους στο παράκτιο τμήμα, τόσο ευκολότερη είναι η διείσδυση του θαλασσινού νερού στη στεριά και τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα απώλειας γης. Όπως αναφέρθηκε και στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, τα δεδομένα αντλήθηκαν από το EU-DEM του προγράμματος Copernicus. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο λογισμικό QGIS και προσδιορίστηκαν οι κλίσεις ως ποσοστό (%).

### 5.3.3 Παράκτια Γεωμορφολογία

Μια ακόμη μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η παράκτια γεωμορφολογία. Σύμφωνα με τον Καρύμπαλη (2010), η γεωλογική σύσταση αλλά και η λιθολογία (πετρώματα, ιζήματα) σε συνδυασμό με το παράκτιο υψόμετρο αλλά και την κλίση επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τρωτότητα των ακτών. Για παράδειγμα οι βραχώδεις απότομες ακτές διαβρώνονται με πιο αργό ρυθμό συγκριτικά με τις επίπεδες αμμώδεις ή ιλυώδεις. Τα γεωλογικά δεδομένα προέκυψαν από τη βάση γεωχωρικών δεδομένων του δήμου Δυτικής Λέσβου<sup>6</sup> που με τη σειρά τους προέρχονται από την ΕΑΓΜΕ.

### 5.3.4 Διάβρωση ακτής

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της ευπάθειας της ακτής είναι ο ρυθμός διάβρωσής της. Η συγκεκριμένη παράμετρος υπολογίζει τη μεταβολή της ακτογραμμής (προσαύξηση/υποχώρηση) με την πάροδο του χρόνου. Ο ρυθμός μεταβολής της ακτογραμμής αποτελεί ίσως και τη σημαντικότερη παράμετρο στον υπολογισμό της παράκτιας τρωτότητας καθώς αντικατοπτρίζει την ισορροπία ή την αστάθεια της ακτής απέναντι σε φυσικές και ανθρωπογενείς πιέσεις και αποτελεί συνισταμένη πολλών άλλων παραγόντων που επηρεάζουν και αυτές με τη σειρά τους την τρωτότητα. Τα δεδομένα προέκυψαν από το διαδικτυακό εργαλείο Coastal Hazard Wheel App<sup>7</sup> και δίνουν απευθείας την διάβρωση της ακτογραμμής στην κλίμακα 1 (πολύ χαμηλή) έως 5 (πολύ υψηλή).

### 5.3.5 Σχετική Άνοδος της Στάθμης της Θάλασσας (RSLR)

Έπειτα, ακολουθούν οι υδροφυσικοί παράγοντες που συμβάλουν στην τρωτότητα των παράκτιων ζωνών με τη σημαντικότερη να αποτελεί τη σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας (Relative Sea Level Rise - RSLR). Η RSLR είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς της απόλυτης ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Absolute Sea Level Rise - ASLR) μείον των τεκτονικών μετακινήσεων του εδάφους. Η ASLR είναι ένα φαινόμενο που απασχολεί ιδιαίτερα τον πλανήτη στις μέρες μας κυρίως λόγω της κλιματικής αλλαγής και της ταχύτατης ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Τα δεδομένα του ASLR αντλήθηκαν από το GLORYS12V1 του

---

<sup>6</sup> <https://gis.mwlesvos.gr/>

<sup>7</sup> <https://chw-app.coastalhazardwheel.org/>

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)<sup>8</sup>. Το συγκεκριμένο σετ δεδομένων δίνει τη μέση τιμή της ανόδου της στάθμης της θάλασσας κατά έτος με χωρική ανάλυση περίπου 8χλμ. Η παραγωγή των δεδομένων βασίζεται σε καταγραφές από το 1993 έως σήμερα, συνδυάζοντας τόσο δορυφορικές όσο και επιτόπιες παρατηρήσεις. Σχετικά με τις τεκτονικές μετακινήσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι παρατηρήσεις από το European Ground Motion Service (EGMS) Ortho 2019-2023<sup>9</sup> που αποτελούν προϊόντα επεξεργασίας δορυφορικών ραντάρ InSAR και αποτυπώνουν τις κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους κατά έτος.

### 5.3.6 Σημαντικό ύψος κύματος

Ως σημαντικό ύψος κύματος ( $H_s$  ή  $H_{1/3}$ ) ορίζεται η μέση τιμή του ανώτερου 33% των υψών των κυμάτων που έχουν καταγραφεί σε ένα κυματικό φάσμα (Gill et al., 2014). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στις μελέτες που αφορούν την παράκτια τρωτότητα, διότι εκφράζει την ενέργεια των κυμάτων που προσπίπτουν πάνω στις ακτές και συνδέεται άμεσα με μορφολογικές αλλαγές της ακτογραμμής. Η κυματική ενέργεια αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια γης (συνήθως ιζημάτων) και αυξημένου κινδύνου πλημμύρας κατά μήκος των ακτών. Τα δεδομένα προέκυψαν από το MEDSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_006\_012 του Copernicus Marine Service (CMEMS)<sup>10</sup> που καταγράφει τα διαχρονικά κυματικά δεδομένα της Μεσογείου από το 1985 με χωρική ανάλυση περίπου 4χλμ. Τα δεδομένα του Mediterranean Sea Waves Reanalysis παράγονται με προσομοίωση (μοντελοποίηση) των κυμάτων της Μεσογείου και για μεγαλύτερη ακρίβεια ενσωματώνονται και δορυφορικές μετρήσεις ύψους κύματος.

### 5.3.7 Παλιρροιακό εύρος

Το παλιρροιακό εύρος ορίζεται ως η κατακόρυφη διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης παλίρροιας. Για πολλά χρόνια επικρατούσε η άποψη ότι οι παράκτιες περιοχές μεγάλου παλιρροιακού εύρους θεωρούνται εξαιρετικά ευάλωτες λόγω της σύνδεσής του με μόνιμους και σποραδικούς κινδύνους πλημμύρας (Gornitz et al., 1991). Σε πολλές άλλες μελέτες (Thieler & Hammar-Klose, 1999, Pendleton et al., 2004), όμως, αναθεωρήθηκε η αρχική αυτή προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, οι μικροπαλιρροϊκές ακτές (παλιρροιακό εύρος <2 m) θεωρούνται περισσότερο ευαίσθητες σε πλημμύρες και ακραία φαινόμενα, καθώς ακόμη και μικρές αυξήσεις της στάθμης μπορούν να ξεπεράσουν τα ανώτερα επίπεδα παλίρροιας. Αντίθετα, σε μακροπαλιρροϊκές ακτές (παλιρροιακό εύρος >4 m), τα ανώτερα επίπεδα παλίρροιας σπάνια ξεπερνιούνται, μειώνοντας έτσι τη σχετική ευπάθεια της ακτής. Για τη συγκεκριμένη μεταβλητή δεν βρέθηκαν γεωχωρικά δεδομένα. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με μελέτες (Tsimplis, 1994), η Λέσβος κατατάσσεται στις περιοχές με μικροπαλίρροιας, καθώς το εύρος της παλίρροιας στις ακτές της δεν υπερβαίνει τα 0,3 μέτρα.

---

<sup>8</sup> [https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_001\\_030/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description)

<sup>9</sup> <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service/egms-ortho#download>

<sup>10</sup> [https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA\\_MULTIYEAR\\_WAV\\_006\\_012/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012/description)

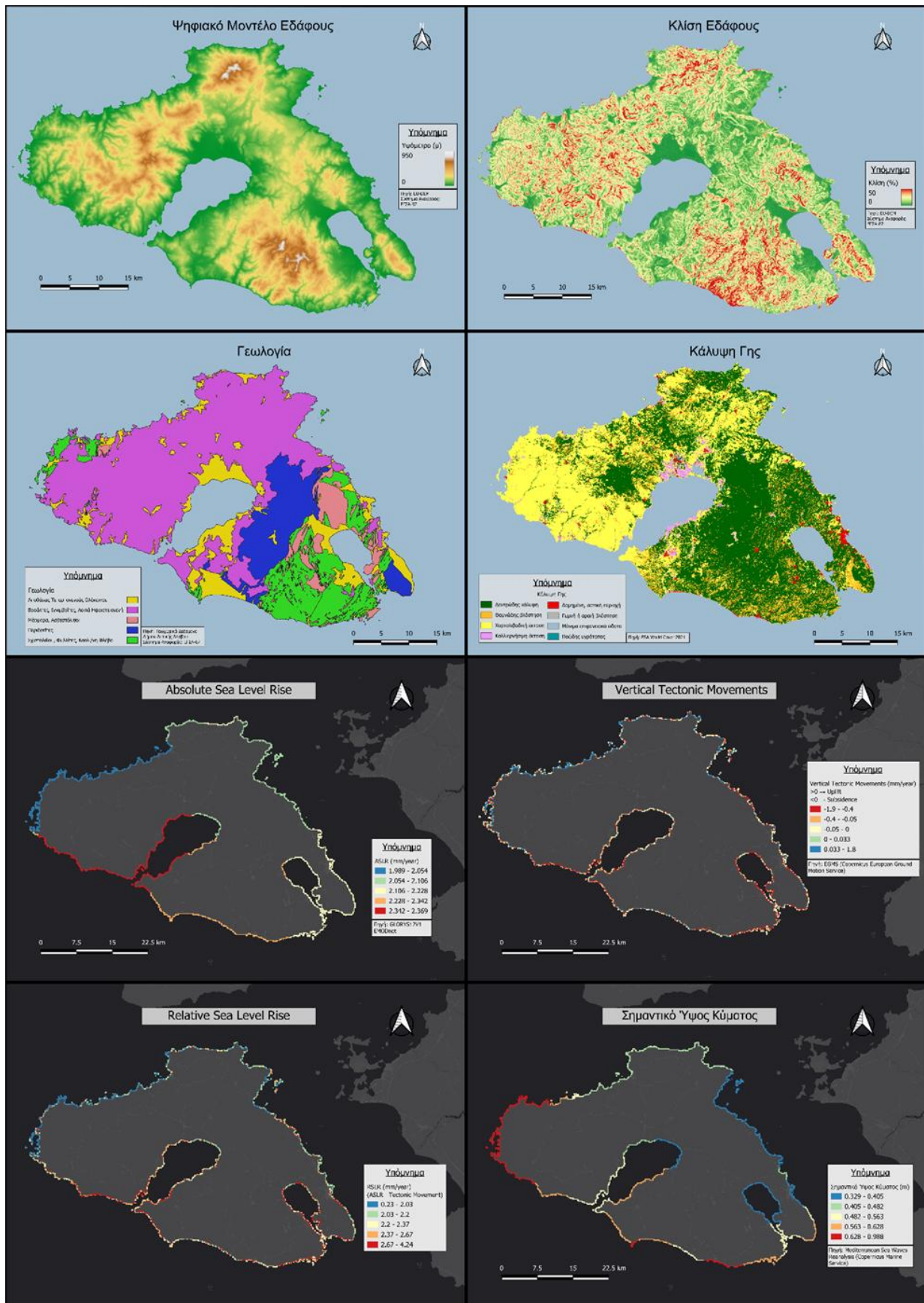
### 5.3.8 Κάλυψη Γης

Η τελευταία παράμετρος που λήφθηκε υπόψη ήταν η κάλυψη γης. Η παράμετρος αυτή είναι ζωτικής σημασίας στον προσδιορισμό του δείκτη τρωτότητας, καθώς οι διάφοροι τύποι κάλυψης γης ποικίλουν ως προς την ικανότητα τους στην προστασία των ακτών από τη διάβρωση ή τις πλημμύρες. Για παράδειγμα, οι παραθαλάσσιες περιοχές που καλύπτονται από βλάστηση είναι λιγότερο ευάλωτες σε σχέση με τις δομημένες ή αστικές περιοχές. Για την εύρεση των διαφόρων καλύψεων γης χρησιμοποιήθηκε το σετ δεδομένων ESA WorldCover 2021<sup>11</sup>, το οποίο είναι ένα παγκόσμιο προϊόν χαρτογράφησης της κάλυψης της γης με χωρική ανάλυση 10 μέτρων, που δημιουργήθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA). Η δημιουργία των δεδομένων προέκυψε από την ανάλυση εικόνων από τους δορυφόρους Sentinel-1 και Sentinel-2 του προγράμματος Copernicus.

Στο σχήμα 21 φαίνονται οι χάρτες με τα πρωτογενή δεδομένα. Έχει εξαιρεθεί η παλίρροια, καθώς δεν υπάρχουν γεωχωρικά δεδομένα για την παράμετρο αυτή. Επιπλέον, δεν έχει απεικονιστεί η διάβρωση των ακτών διότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν την τελική ταξινόμηση με βάση την τρωτότητα και όχι την ετήσια μεταβολή της ακτογραμμής.

---

<sup>11</sup> <https://worldcover2021.esa.int/download>



Σχήμα 21. Οι χάρτες με τις πρωτογενείς τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας.

## 5.4 Τρωτότητα κάθε παραμέτρου

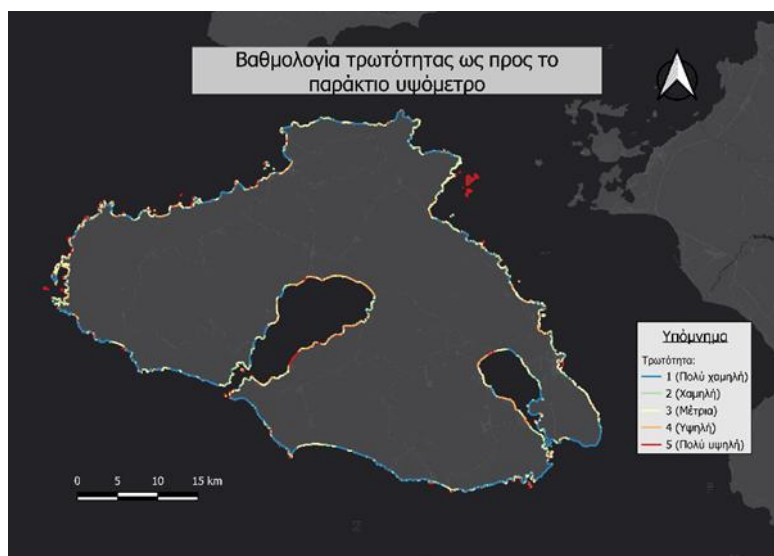
Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται τα 8 πρωτογενή προϊόντα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και προσδιορίζεται η ευπάθεια κάθε μιας παραμέτρου ως προς την τρωτότητα των ακτών. Ο υπολογισμός έγινε τόσο στις διατομές (transects) όσο και σε κάθε τετράγωνο πλέγμα των 200 και των 1000 μέτρων.

### 5.4.1 Μέσο Παράκτιο Υψόμετρο

Όσον αφορά το παράκτιο υψόμετρο, η ταξινόμηση της τρωτότητας έγινε με βάση τις τιμές του πίνακα 1. Πιο συγκεκριμένα, όταν το μέσο υψόμετρο ήταν  $\geq 20$  μέτρα, η τιμή της τρωτότητας ήταν 1 (χαμηλή ευπάθεια), όταν η τιμή του υψομέτρου ήταν 10-20 μέτρα, η τρωτότητα έπαιρνε την τιμή 2 (χαμηλή ευπάθεια), όταν το υψόμετρο ήταν 5-10 μέτρα, η τρωτότητα έπαιρνε την τιμή 3 (μέτρια), όταν το υψόμετρο ήταν 2-5 μέτρα, η τρωτότητα ήταν 4 (υψηλή) και όταν το υψόμετρο ήταν  $< 2$  μέτρα τότε η τρωτότητα έπαιρνε την τιμή 5 (υψηλή τρωτότητα).

Ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου σε κάθε μονάδα του τετράγωνου πλέγματος έγινε με βάση τα pixels του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που βρίσκονταν κάθε φορά εντός των ορίων της. Ωστόσο, στη μέθοδο των διατομών ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου έγινε με βάση τα pixels του ψηφιακού μοντέλου εδάφους τα οποία έτεμνε η κάθε διατομή (transect).

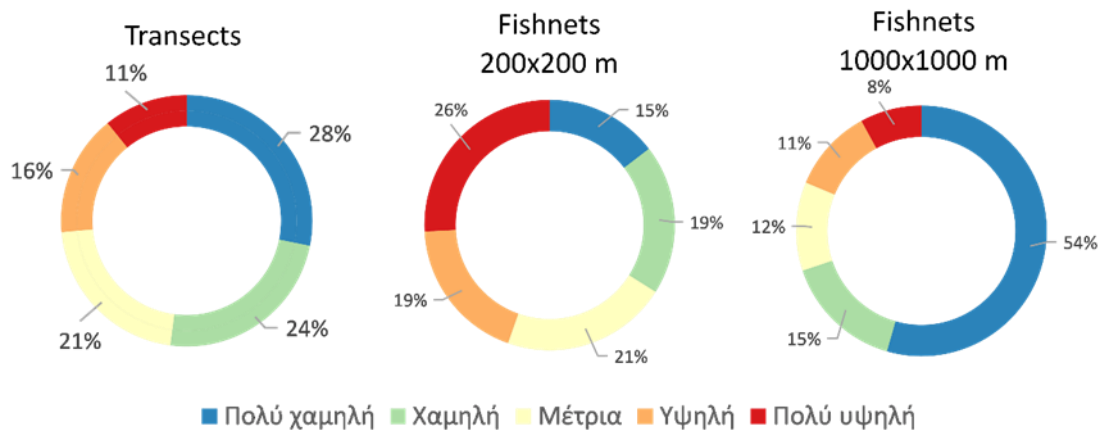
Στον παρακάτω χάρτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρωτότητας λόγω υψομέτρου, τα οποία υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των transects. Τα αποτελέσματα έχουν προσαρμοστεί και μεταφερθεί έτσι ώστε να αποτυπώνονται πάνω στο layer της ακτογραμμής.



Σχήμα 22. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το παράκτιο υψόμετρο.

Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν χάρτες και για τα πλέγματα 1000 και 200 μέτρων. Μετά από μια σύντομη στατιστική ανάλυση των τιμών ευπάθειας (βλ. σχήμα 23), παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των τριών μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, στη μέθοδο των πλεγμάτων ανάλυσης 1000 μέτρων παρατηρούνται υψηλότερες υψομετρικές τιμές, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερες βαθμολογίες τρωτότητας, ενώ, στα αποτελέσματα

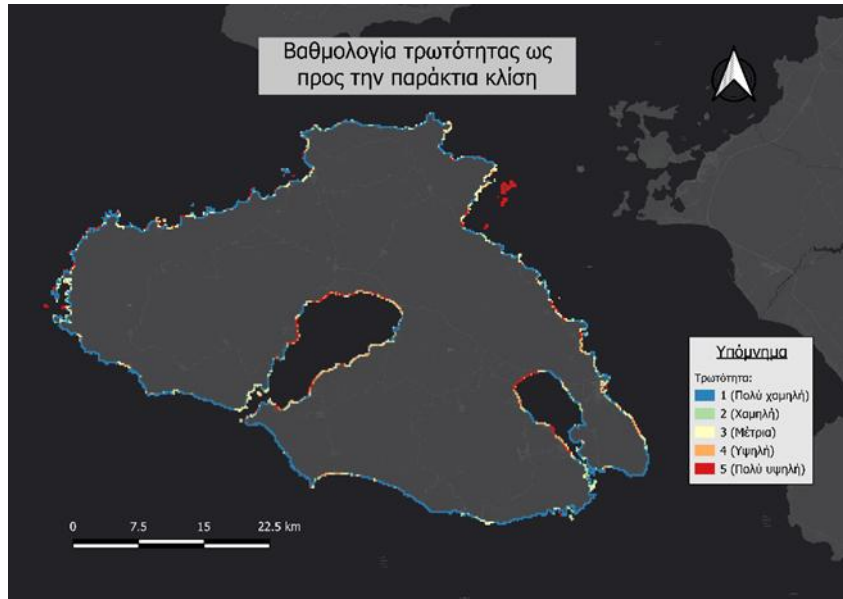
που προκύπτουν από τη μέθοδο των transects καθώς και στα πλέγματα ανάλυσης 200 μέτρων, εντοπίζονται χαμηλότερα υψόμετρα, με συνέπεια την απόδοση υψηλότερων τιμών τρωτότητας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απολύτως αναμενόμενα, καθώς τα πλέγματα ανάλυσης 1.000μ. x 1.000μ. εκτείνονται βαθύτερα προς το εσωτερικό της ξηράς καλύπτοντας εκτάσεις με μεγαλύτερα υψόμετρα. Αντίθετα, οι διατομές (transects) και τα πλέγματα ανάλυσης 200μ. x 200μ. περιορίζονται πιο κοντά στη ζώνη της ακτής και καλύπτουν κυρίως περιοχές με χαμηλά υψόμετρα. Ακολουθούν τα διαγράμματα με τα στατιστικά κάθε μεθόδου.



Σχήμα 23. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή του μέσου παράκτιου υψόμετρου για κάθε μία μεθοδολογία.

#### 5.4.2 Μέση παράκτια κλίση

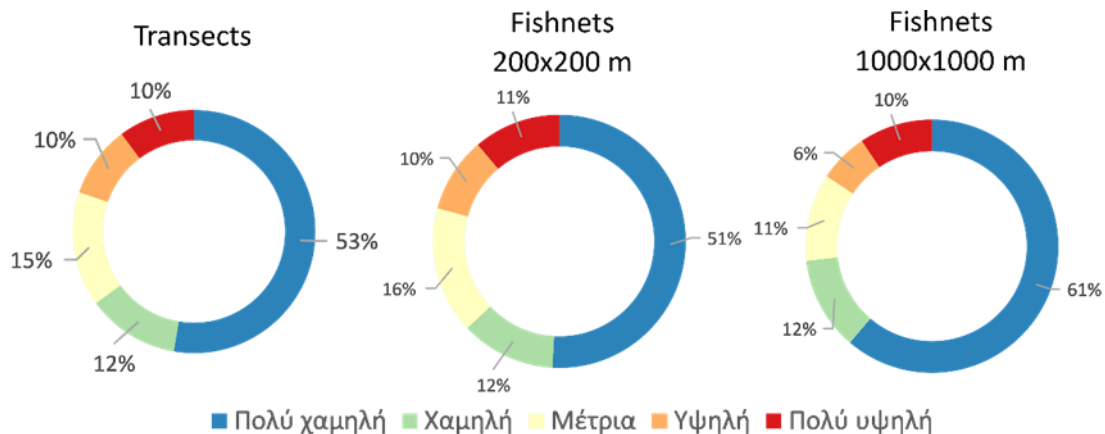
Όπως και στον προσδιορισμό της ευπάθειας του μέσου παράκτιου υψόμετρου, για τον υπολογισμό της τρωτότητας για την μέση παράκτια κλίση αξιοποιήθηκε ο Πίνακας 1. Συγκεκριμένα, όταν η παράκτια κλίση ήταν μεγαλύτερη από 12%, η τρωτότητα χαρακτηριζόταν με τιμή 1 (χαμηλή ευπάθεια). Για κλίσεις μεταξύ 8% και 12% δόθηκε τιμή 2 (χαμηλή ευπάθεια), για κλίσεις από 4% έως 8% η τιμή ήταν 3 (μέτρια ευπάθεια), για 2% έως 4% αποδόθηκε η τιμή 4 (υψηλή ευπάθεια), ενώ για παράκτια κλίση μικρότερη του 2% η τρωτότητα έλαβε τιμή 5 (πολύ υψηλή ευπάθεια). Για τον υπολογισμό των τιμών που αποδόθηκαν σε κάθε πλέγμα και κάθε διατομή εφαρμόστηκε ακριβώς η ίδια μεθοδολογία με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τα παράκτια υψόμετρα. Στον παρακάτω χάρτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρωτότητας ως προς την κλίση του εδάφους, τα οποία υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πλεγμάτων (fishnets) ανάλυσης 200 μέτρων.



Σχήμα 24. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την παράκτια κλίση.

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω χάρτη, οι περιοχές με χαμηλές τιμές τρωτότητας λόγω παράκτιας κλίσης εντοπίζονται στα νότια και δυτικά τμήματα του νησιού, ενώ υψηλές τιμές καταγράφονται στους δύο κόλπους (Καλλονής και Γέρας), καθώς και σε ορισμένα τμήματα στα βορειοανατολικά.

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τα fishnets ανάλυσης 1000 μέτρων, καθώς και για τα transects, με αποτέλεσμα να παραχθούν αντίστοιχοι χάρτες. Μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων παρατηρήθηκαν μερικές μικρές διαφορές στη μέση κλίση του εδάφους, όπως καταγράφεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 25. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της μέσης παράκτιας κλίσης για κάθε μία μεθοδολογία.

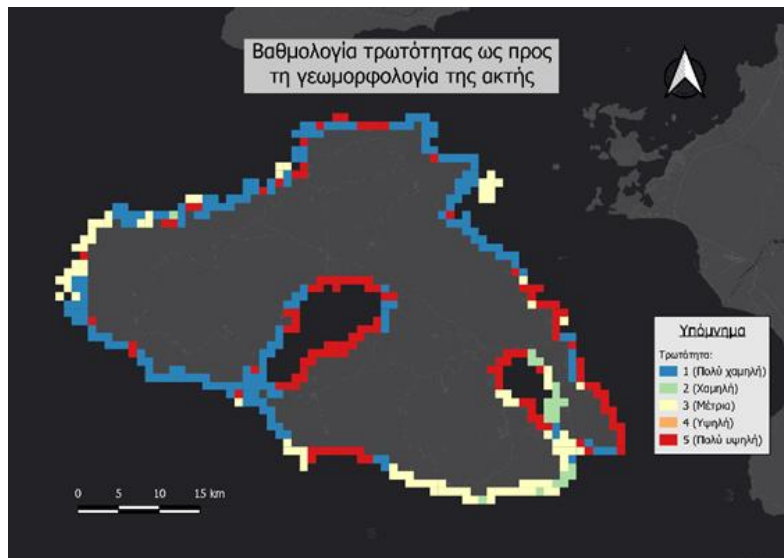
### 5.4.3 Παράκτια Γεωμορφολογία

Για την παράμετρο αυτή, ήταν απαραίτητη η συσχέτιση και η μετατροπή των πρωτογενών γεωλογικών δεδομένων, ώστε να προσαρμοστούν στη μορφή που παρουσιάζει η γεωμορφολογία της ακτής. Με βάση τα πρωτογενή δεδομένα, στο νησί της Λέσβου απαντώνται οι εξής πέντε γεωλογικές κατηγορίες: 1) Αποθέσεις Τεταρτογενούς Ολόκαινου, 2)

Βασάλτες, Ιγνιμβρίτες, λοιπά Ηφαιστειογενή, 3) Μάρμαρα, Ασβεστόλιθοι, 4) Περιδοτίτες, 5) Σχιστόλιθοι, Φυλλίτες, Καολινίτης (ΕΑΓΜΕ). Οι παραπάνω γεωλογικές κατηγορίες για να μπορέσουν να αντιστοιχιστούν με την ταξινόμηση της μελέτης των Theocharidis et al. (2024) έπρεπε να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες πέντε γεωμορφολογικές κατηγορίες: 1) Βραχώδεις, απόκρημνες ακτές (πολύ χαμηλή τρωτότητα), 2) Μεσαίου ύψους απόκρημνες ακτές (χαμηλή τρωτότητα), 3) Ακτές με χαμηλούς γκρεμούς (μέτρια τρωτότητα), 4) Ακτές με βότσαλα, εκβολές, λιμνοθάλασσες (υψηλή τρωτότητα), 5) Αμμώδεις ακτές, δέλτα ποταμών, αλυκές, ύφαλοι (πολύ υψηλή τρωτότητα).

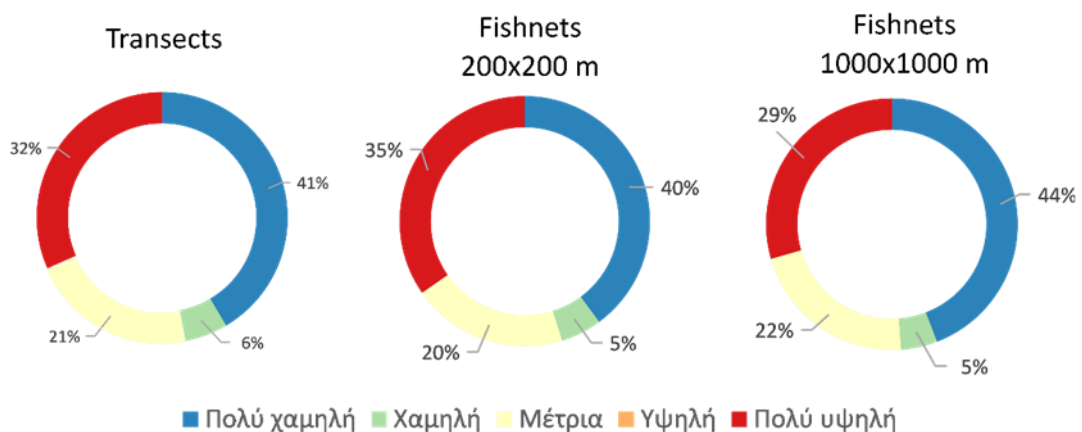
Σύμφωνα με τον Bird (2010), οι αποθέσεις Τεταρτογενούς Ολόκαινου αποτελούνται από πρόσφατα χαλαρά ιζήματα τα οποία σχηματίζουν παραλίες, δέλτα και αμμοθίνες, και συνεπώς χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή τρωτότητα (κατηγορία 5). Οι βασάλτες, οι ιγνιμβρίτες και τα λοιπά ηφαιστειογενή πετρώματα σχηματίζουν κυρίως βραχώδεις, απόκρημνες ακτές, με την ακριβή γεωμορφολογία να εξαρτάται από τη σκληρότητα και τη δομή του κάθε πετρώματος, και για τον λόγο αυτό κατατάσσονται στην κατηγορία 1 (πολύ χαμηλή τρωτότητα). Τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι, λόγω της υψηλής τους αντοχής στη διάβρωση, σχηματίζουν κυρίως βραχώδεις, απόκρημνες ακτές, όμως τοποθετήθηκαν στη κατηγορία 2 (χαμηλή τρωτότητα), δεδομένου ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή λόγω έντονης τεκτονικής διάρρηξης ή/και ανάπτυξης καρστικών μορφών. Οι περιδοτίτες παρουσιάζουν πολύ υψηλή αντοχή στη διάβρωση και σχηματίζουν απόκρημνες, βραχώδεις ακτές, γι' αυτό κατατάσσονται επίσης στην κατηγορία 1 (πολύ χαμηλή τρωτότητα). Τέλος, οι σχιστόλιθοι και φυλλίτες εμφανίζουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και σχηματίζουν ακτές με πρηνή ή μεσαίου ύψους απόκρημνες ακτές, ενώ ο καολινίτης, ως κύριο συστατικό των αργιλικών αποθέσεων, παρουσιάζει πολύ χαμηλή αντοχή και συνδέεται με την ανάπτυξη ήπιων, μαλακών ακτών, συνεπώς αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία 3 (μέτριας τρωτότητας).

Για τον υπολογισμό της γεωλογικής κατηγορίας που αποδόθηκε σε κάθε μονάδα των πλεγμάτων και κάθε διατομή, χρησιμοποιήθηκε ως τιμή εκείνη της γεωλογίας με τις περισσότερες εμφανίσεις. Συγκεκριμένα, για κάθε fishnet προσδιορίστηκε η γεωλογική κατηγορία που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του κάθε κελιού (βάσει του αριθμού των rixel που περιλαμβάνονται στο κάθε κελί), ενώ για τα transects ελήφθη υπόψη η γεωλογική κατηγορία που διατρέχεται σε μεγαλύτερο μήκος επάνω σε κάθε διατομή. Στον παρακάτω χάρτη παρουσιάζεται η τελική τιμή τρωτότητας λόγω της γεωμορφολογίας της ακτής για κάθε κελί πλέγματος 1000 μέτρων.



Σχήμα 26. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς τη γεωμορφολογία της ακτής.

Από τον παραπάνω χάρτη βγαίνει το συμπέρασμα ότι το δυτικό και βόρειο τμήμα του νησιού παρουσιάζει πολύ χαμηλή ευπάθεια εξαιτίας των σκληρών ηφαιστειακών πετρωμάτων και των γεωμορφών που σχηματίζουν. Αντίθετα οι αμμώδεις αποθέσεις στους δύο κόλπους αλλά και στα νοτιοανατολικά οδηγούν σε υψηλότερες τιμές της τρωτότητας. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τα fishnets ανάλυσης 200 μέτρων, καθώς και για τα transects, με αποτέλεσμα να παραχθούν αντίστοιχοι χάρτες. Μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων παρατηρήθηκαν ορισμένες μικρές διαφορές στην ταξινόμηση της παράκτιας γεωμορφολογίας, όπως αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 27. Τα διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της παράκτιας γεωμορφολογίας για κάθε μία μεθοδολογία.

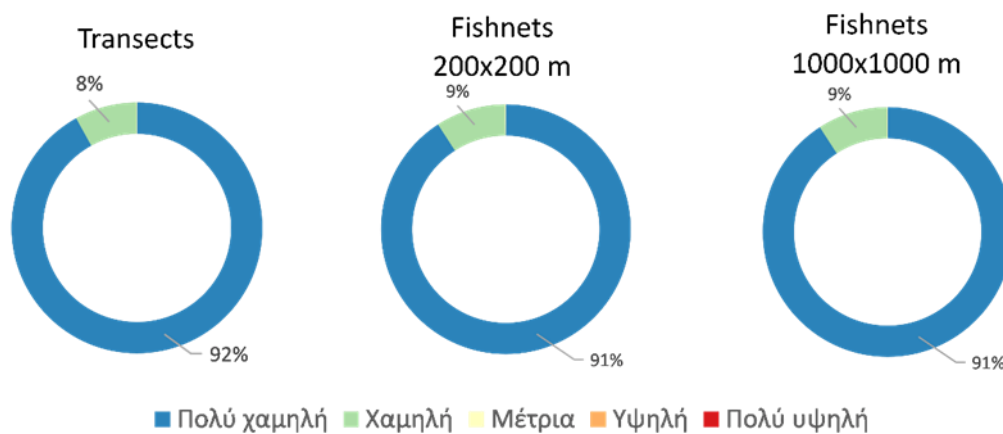
#### 5.4.4 Διάβρωση ακτής

Για τη μεταβολή της ακτογραμμής δεν εφαρμόστηκε ο υπολογισμός που περιγράφεται στη μελέτη των Theocharidis et al. (2024), καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν διέθεταν ήδη έτοιμη την ταξινόμηση της μεταβολής της ακτογραμμής σε πέντε κατηγορίες. Έτσι, επιλέχθηκε να διατηρηθεί η ταξινόμηση που είχε γίνει από το διαδικτυακό εργαλείο Coastal Hazard Wheel App (University of Copenhagen). Σύμφωνα με αυτή, η ταξινόμηση δίνεται ως γραμμική οντότητα κατά μήκος της ακτογραμμής και απεικονίζεται στον παρακάτω χάρτη.



Σχήμα 28. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς τη διάβρωση της ακτής.

Από τον χάρτη αυτό παρατηρείται ότι στο νησί της Λέσβου δεν σημειώνονται ιδιαίτερα έντονες μεταβολές της ακτογραμμής. Ελαφρώς μεγαλύτερη μεταβολή εντοπίζεται στις αμμώδεις και βοτσαλωτές παραλίες, ενώ μέτρια τρωτότητα καταγράφεται μόνο σε ένα μικρό τμήμα της ακτογραμμής, στο δέλτα ενός ποταμού στον κόλπο Καλλονής. Δεδομένου ότι τα στοιχεία παρέχονται από τη γραμμική οντότητα της ακτογραμμής, είναι εύλογο να μην παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στα στατιστικά μεταξύ των τριών μεθόδων υπολογισμού του CVI (fishnet 200, fishnet 1000, transects).



Σχήμα 29. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της παράκτιας διάβρωσης για κάθε μία μεθοδολογία.

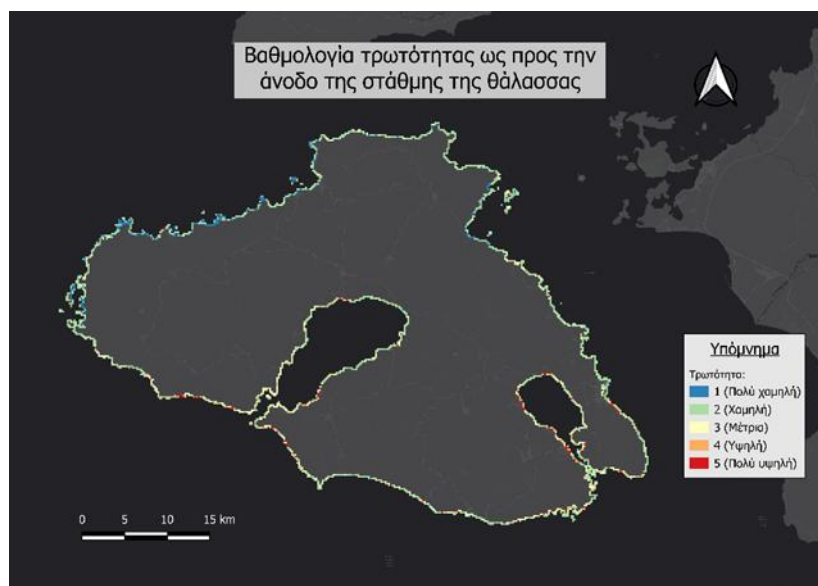
#### 5.4.5 Σχετική Άνοδος της Στάθμης της Θάλασσας (RSLR)

Όσον αφορά τη σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η ταξινόμηση της τρωτότητας έγινε σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 1. Συγκεκριμένα, όταν η τιμή της σχετικής ανόδου ήταν μικρότερη από 1.8 μέτρα, η τρωτότητα λάμβανε την τιμή 1 (χαμηλή τρωτότητα). Για τιμές από 1.8 έως 2.5 μέτρα, η τρωτότητα ήταν 2 (χαμηλή τρωτότητα), από 2.5 έως 3 μέτρα λάμβανε

την τιμή 3 (μέτρια τρωτότητα), από 3 έως 3.4 μέτρα η τιμή ήταν 4 (υψηλή τρωτότητα), ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 3.4 μέτρα η τρωτότητα λάμβανε την τιμή 5 (πολύ υψηλή τρωτότητα).

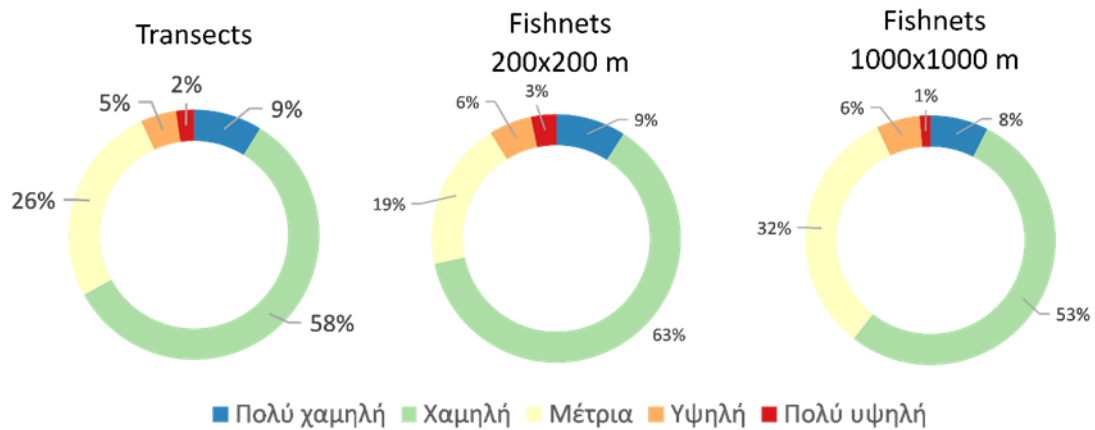
Επειδή τα αρχικά δεδομένα της απόλυτης ανόδου της στάθμης της θάλασσας βρίσκονταν σε μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή, έγινε παρεμβολή των δεδομένων με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor), ώστε κάθε fishnet ή transect να αντλεί την τιμή από το πλησιέστερο pixel. Στη συνέχεια, για τα δεδομένα της κατακόρυφης μετατόπισης του εδάφους λόγω τεκτονικών μετακινήσεων, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών στα σημεία που περιείχαν πληροφορία. Δηλαδή, για κάθε κελί και διατομή που επικαλυπτόταν με αυτά τα σημεία, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της κατακόρυφης μετατόπισης. Η τελική τιμή της σχετικής ανόδου της στάθμης της θάλασσας προκύπτει από τη διαφορά της απόλυτης ανόδου της στάθμης της θάλασσας και των τεκτονικών μετακινήσεων και βρέθηκε η τελική τιμή της σχετικής ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

Στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται ο χάρτης τρωτότητας λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Παρατηρείται ότι στο νότιο τμήμα του νησιού εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένος κίνδυνος, ο οποίος σχετίζεται κυρίως με την απόλυτη άνοδο της στάθμης λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η μικρή αυτή διακύμανση μεταξύ των διαφόρων περιοχών του νησιού οφείλεται, μεταξύ άλλων, στις τοπικές διαφοροποιήσεις του βαρυτικού πεδίου, οι οποίες επηρεάζουν την απόλυτη άνοδο της στάθμης της θάλασσας και κατ' επέκταση τη σχετική άνοδο της στάθμης της.



Σχήμα 30. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

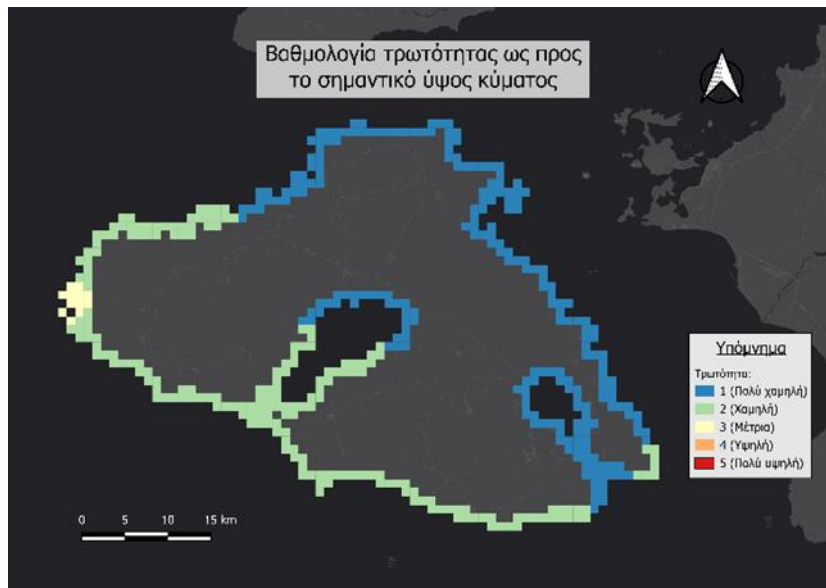
Στα διαγράμματα που ακολουθούν διακρίνονται ορισμένες μικρές διαφορές στα στατιστικά τρωτότητας μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού του δείκτη (fishnets 1000, fishnets 200, transects). Οι διαφορές αυτές πιθανώς οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες και στις οριακές τιμές που προκύπτουν από τον υπολογισμό του μέσου όρου σε κάθε κελί ή διατομή, καθώς και στη χωρική κατανομή των δεδομένων.



Σχήμα 31. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας για κάθε μία μεθοδολογία.

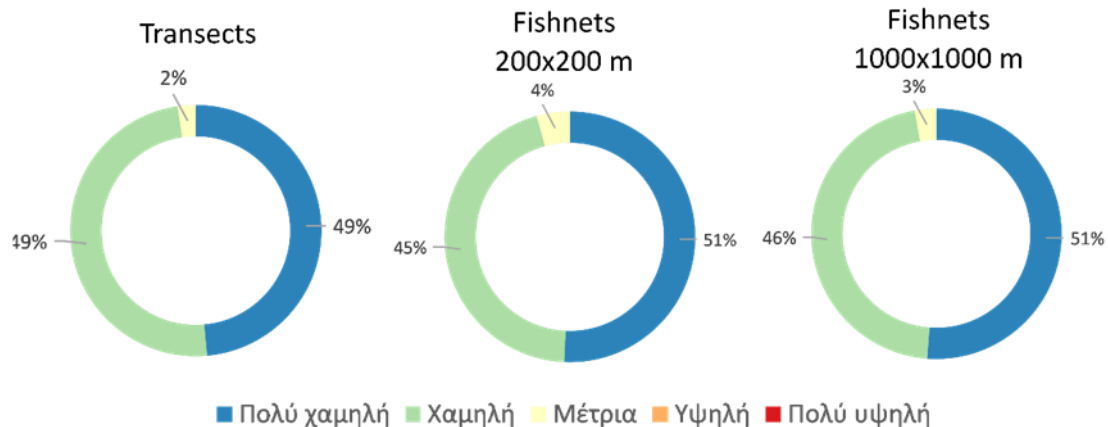
#### 5.4.6 Σημαντικό ύψος κύματος

Η επόμενη μεταβλητή είναι το σημαντικό ύψος κύματος, το οποίο ταξινομήθηκε σε κατηγορίες τρωτότητας σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 1. Συγκεκριμένα, όταν το ύψος κύματος κυμαινόταν από 0 έως 0.55 μ., η τρωτότητα έπαιρνε την τιμή 1 (πολύ χαμηλή). Για ύψος κύματος 0.55–0.85 μ. αποδίδονταν η τιμή 2 (χαμηλή), για 0.85–1.05 μ. τιμή 3 (μέτρια), για 1.05–1.25 μ. τιμή 4 (υψηλή) και για ύψος κύματος μεγαλύτερο του 1.25 μ. η τρωτότητα λάμβανε την τιμή 5 (πολύ υψηλή). Επειδή τα αρχικά δεδομένα για το σημαντικό ύψος κύματος βρίσκονταν μακριά από την ακτογραμμή, ακολουθήθηκε παρόμοια μεθοδολογία με αυτή για την απόλυτη άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Έγινε, δηλαδή, υπολογισμός μέσω παρεμβολής των τιμών με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor), ώστε κάθε fishnet ή transect να αντλεί την τιμή από το πλησιέστερο διαθέσιμο pixel. Στο χάρτη που ακολουθεί απεικονίζεται η τρωτότητα με βάση το σημαντικό ύψος κύματος, όπου φαίνεται ότι το φαινόμενο είναι εντονότερο στα δυτικά και νότια του νησιού.



Σχήμα 32. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το σημαντικό ύψος κύματος.

Από τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτει ότι σχεδόν η μισή ακτογραμμή του νησιού έχει πολύ χαμηλή τρωτότητα εξαιτίας του σημαντικού ύψους κύματος, ενώ το υπόλοιπο τμήμα έχει χαμηλή τρωτότητα. Επίσης, παρατηρούνται ορισμένες μικρές διαφοροποιήσεις στα στατιστικά τρωτότητας, ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού του δείκτη (fishnets 1000, fishnets 200, transects). Αυτές οι διαφορές ενδέχεται να σχετίζονται με τυχαίους παράγοντες που αφορούν τόσο στη δομή των fishnets όσο και στην πυκνότητα των transects.



Σχήμα 33. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας εξαιτίας των σημαντικών κυμάτων για κάθε μία μεθοδολογία.

#### 5.4.7 Παλιρροιακό εύρος

Σύμφωνα με τη μελέτη που αναφέρθηκε παραπάνω (Tsimplis, 1994), το παλιρροιακό εύρος της ακτογραμμής της Λέσβου είναι σταθερό και μικρότερο από 0.3 μ. Έτσι, η ευπάθεια που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη τιμή είναι πολύ υψηλή και ίση με 5. Γι' αυτό ο χάρτης (βλ. σχήμα 34) της τρωτότητας εξαιτίας της παλίρροιας δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή σε κάποιο τμήμα της ακτογραμμής.



Σχήμα 34. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς το εύρος της παλίρροιας.

#### 5.4.8 Κάλυψη Γης

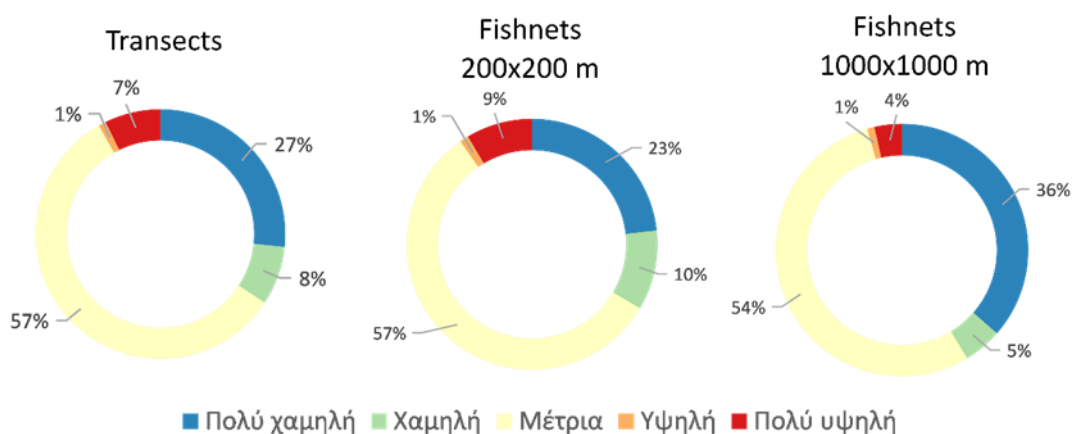
Τέλος, υπολογίστηκε η τρωτότητα για κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα τα αρχικά δεδομένα του ESA World Cover έδιναν συγκεκριμένες θεματικές κατηγορίες κάλυψης γης, η ταξινόμηση των οποίων πραγματοποιήθηκε με βάση τον Πίνακα 1. Η αντιστοίχιση των κατηγοριών κάλυψης γης με τιμές τρωτότητας πραγματοποιήθηκε ως εξής: Στις περιοχές με δενδρώδη βλάστηση αποδόθηκε τιμή 1 (πολύ χαμηλή τρωτότητα), στις θαμνώδεις εκτάσεις ή στα αραιά/γυμνά εδάφη τιμή 2 (χαμηλή τρωτότητα), στις χορτολιβαδικές και καλλιεργούμενες εκτάσεις τιμή 3 (μέτρια τρωτότητα), στους ποώδεις υγροτόπους τιμή 4 (υψηλή τρωτότητα) και στις δομημένες ή αστικές περιοχές τιμή 5 (πολύ υψηλή τρωτότητα).

Για τον υπολογισμό της κατηγορίας κάλυψης γης που αποδόθηκε σε κάθε fishnet και κάθε transect, επιλέχθηκε ως τιμή εκείνη της κάλυψης με τις περισσότερες εμφανίσεις. Συγκεκριμένα, για κάθε fishnet προσδιορίστηκε η κατηγορία κάλυψης γης που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του (βάσει του αριθμού των pixels που περιλαμβάνονται στο κελί), ενώ για τα transects ελήφθη υπόψη η κατηγορία που διατρέχεται στο μεγαλύτερο μήκος. Στον χάρτη του Σχήματος 35 παρουσιάζεται η τελική τιμή τρωτότητας λόγω της κάλυψης γης της ακτής για κάθε κελί πλέγματος 200 μέτρων.



Σχήμα 35. Χάρτης με τη βαθμολογία της τρωτότητας ως προς την κάλυψη γης.

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα στατιστικά τρωτότητας για κάθε μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Από την ανάλυση διαπιστώνεται ότι οι δομημένες περιοχές καταγράφουν υψηλότερα ποσοστά στα transects και στα fishnets των 200 μέτρων σε σύγκριση με τα fishnets των 1.000 μέτρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι παραθαλάσσιοι οικισμοί, με εξαίρεση την πόλη της Μυτιλήνης, έχουν μικρή έκταση και βρίσκονται πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Έτσι, στα fishnets των 1000 μέτρων κυριαρχούν άλλες κατηγορίες κάλυψης γης, καθώς συγκεντρώνουν περισσότερες εμφανίσεις pixels εντός των μεγαλύτερων κελιών.



Σχήμα 36. Διαγράμματα με τη χωρική κατανομή της τρωτότητας εξαιτίας της κάλυψης γης για κάθε μία μεθοδολογία.

## 5.5 Υπολογισμός Δείκτη

Εφόσον προσδιορίσθηκε η τιμή της τρωτότητας για κάθε κατηγορία τιμών όλων των μεταβλητών, επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός του δείκτη CVI. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο μαθηματικός τύπος που παρουσιάστηκε παραπάνω και για τις τρεις μεθοδολογίες (fishnets 1000, fishnets 200, transects). Τα αποτελέσματα και των τριών

μεθόδων παρουσιάζουν θετική ασυμμετρία, δηλαδή οι περισσότερες τιμές βρίσκονται κάτω από το μέσο όρο. Η ύπαρξη ωστόσο ορισμένων ακραίων υψηλών τιμών αυξάνει τον μέσο όρο σε σχέση με τη διάμεσο. Επίσης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών μεθοδολογιών αποκάλυψε σημαντικές διακυμάνσεις και αποκλίσεις, τόσο ως προς τα τελικά εύρη τιμών, όσο και ως προς τις τιμές του μέσου όρου και της διαμέσου μεταξύ των μεθόδων, αυτό απεικονίζεται και στον Πίνακα 3.

Μεθοδολογία	Έυρος τιμών	Μέσος όρος	Διάμεσος
<b>Fishnets 1000x1000 μ.</b>	1.118 - 43.301	7.345	3.354
<b>Fishnets 200x200 μ.</b>	0.791 - 54.772	10.568	4.743
<b>Transects</b>	0.791 - 55.902	9.424	7.500

Πίνακας 3. Τα εύρη τιμών, ο μέσος όρος και η διάμεσος του δείκτη CVI για κάθε μία από τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν.

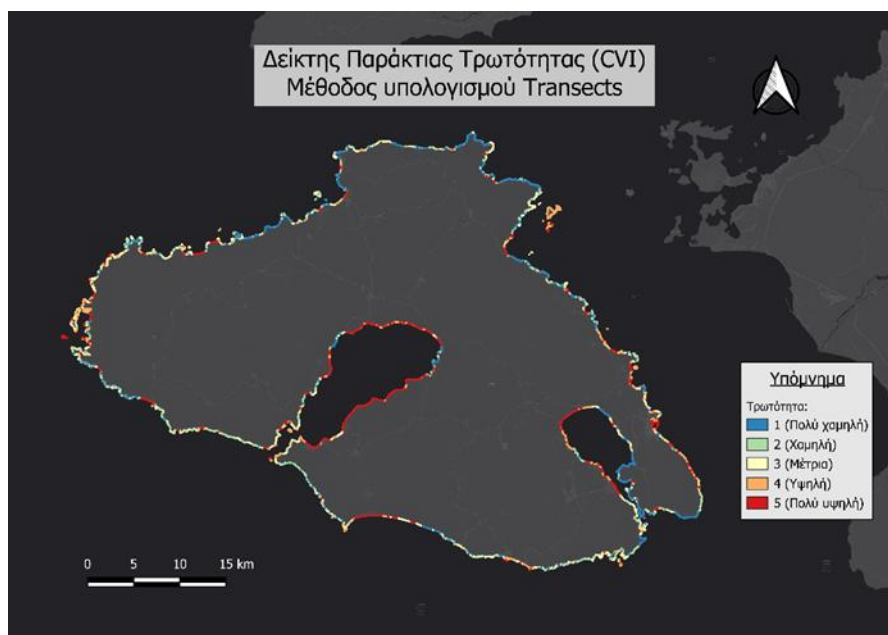
Για την τελική ταξινόμηση των αποτελεσμάτων του CVI χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ομαδοποίησης κανονικής τμηματοποίησης (quantiles) (Theocharidis et al., 2024), δηλαδή η ομαδοποίηση με ίσο αριθμό στοιχείων ανά κατηγορία. Αυτό έγινε για τα transects και στη συνέχεια τα ίδια αριθμητά όρια χρησιμοποιήθηκαν στα πολύγωνα των 1000μ.χ1000μ. και 200μ.χ200μ. (παρότι η κατανομή τους είναι λίγο διαφορετική), ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεθοδολογιών. Στο πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα εύρη τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την τελική ταξινόμηση των τιμών του δείκτη. Στην πράξη όμως δεν προκύπτουν ακριβώς ισοπληθείς οι ομάδες, επειδή στα όρια αλλαγής των τιμών του δείκτη συγκεντρώνονται πολλές διατομές (transects) με τις ίδιες τιμές, οι οποίες τελικά ταξινομούνται όλες στην ίδια ομάδα (π.χ. όσες έχουν τιμή 2.739 στην ομάδα 1 — πολύ χαμηλή τρωτότητα).

Quantile Range	CVI	Vulnerability
0–20%	≤2.739	Very Low
20–40%	2.739 - 4.330	Low
40–60%	4.330 - 7.500	Moderate
60–80%	7.500 - 16.771	High
80–100%	>16.771	Very High

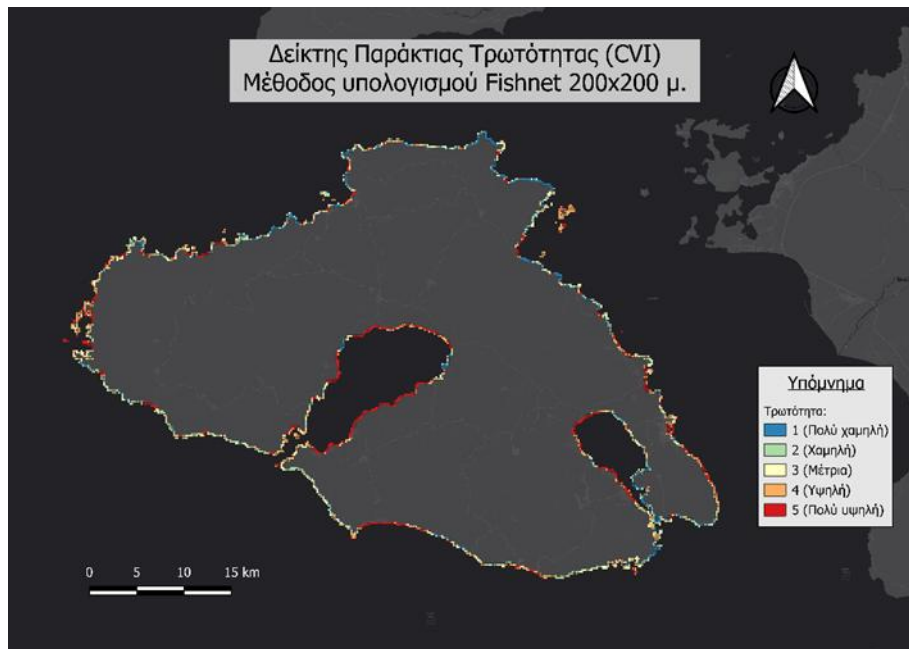
Πίνακας 4. Η τελική ταξινόμηση του δείκτη CVI με τη μέθοδο Quantiles.

Παρά το γεγονός ότι η χρήση της μεθόδου quantiles παράγει χάρτες με ομοιόμορφη κατανομή παρατηρήσεων ανά κατηγορία τρωτότητας, η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να μην αντανακλά τις πραγματικές διαφορές τρωτότητας ανάμεσα στις διάφορες περιοχές. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις όπου οι τιμές του δείκτη είναι συγκεντρωμένες σε ένα μικρό εύρος τιμών μπορεί να δημιουργηθεί τεχνητή διάκριση μεταξύ περιοχών χωρίς ουσιαστική διαφορά στην τρωτότητα. Επιπλέον, περιοχές με πολύ υψηλή τρωτότητα μπορεί να μην αναδειχθούν επαρκώς, εφόσον το κριτήριο ταξινόμησης είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων ανά κατηγορία και όχι η κατανομή ή η φυσική σημασία των τιμών αυτών. Στην περίπτωση της Λέσβου, η μεγάλη ποικιλομορφία που καταγράφηκε σε πολλές από τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν και το μεγάλο εύρος των τελικών τιμών του δείκτη δικαιολογεί εν μέρη την επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου, ωστόσο ο αναπόφευκτος αυτός συμβιβασμός θα πρέπει να συνεκτιμηθεί κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

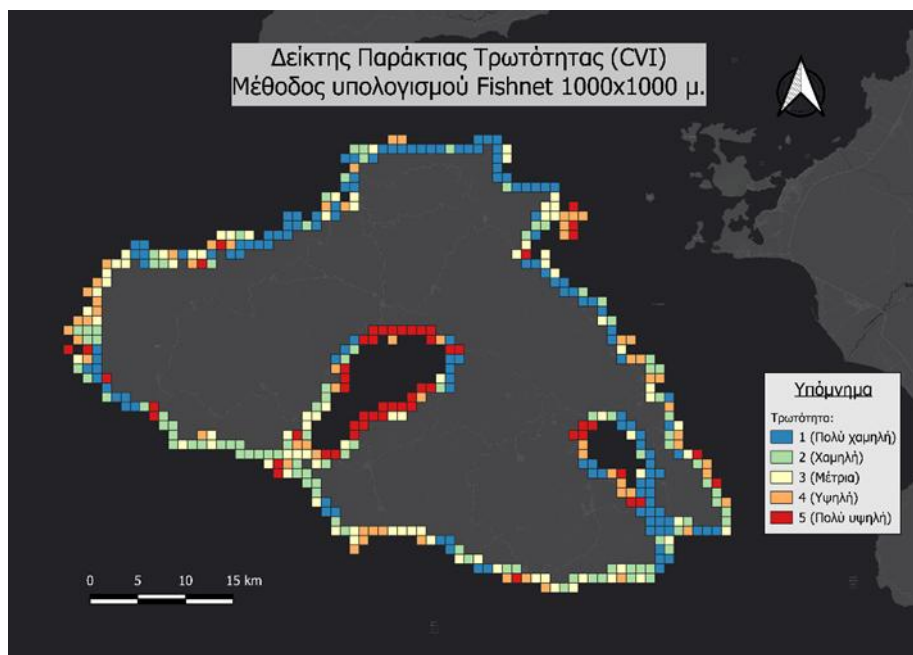
Με βάση, λοιπόν, αυτόν τον τρόπο ταξινόμησης των τελικών τιμών, υπολογίστηκε η παράκτια τρωτότητα για κάθε μία από τις τρεις μεθοδολογίες. Μεταξύ των τριών μεθόδων καταγράφονται και οπτικά διάφορες μικροδιαφορές. Όμως και οι τρεις έχουν αναδείξει ουσιαστικά τις ίδιες περιοχές με ιδιαίτερα υψηλό κίνδυνο παράκτιας τρωτότητας. Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο πρόβλημα εντοπίζεται στον κόλπο της Καλλονής αλλά και στα δυτικά του κόλπου της Γέρας (βλ. Σχήμα 37) όπου καταγράφονται πολλά σημεία με πολύ υψηλή τρωτότητα. Επίσης, σε διάφορα άλλα τμήματα της ακτογραμμής εμφανίζονται μεμονωμένα υψηλές τιμές τρωτότητας όπως για παράδειγμα στη Σκάλα Ερεσού και στα Βατερά. Όλες αυτές οι περιοχές που καταγράφουν πολύ υψηλή τρωτότητα έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά που σχετίζονται τόσο με τη γεωμορφολογία όσο και με την κάλυψη γης που επικρατεί. Δηλαδή, πρόκειται για παράκτιες πεδινές πεδιάδες με αμμώδεις παραλίες, δέλτα ποταμών, αλυκές με πολύ μικρό υψόμετρο και ήπιες κλίσεις εδάφους. Συγχρόνως, υπάρχει δόμηση και ανθρωπογενής παρέμβαση που εντείνουν την τρωτότητα. Απεναντίας, οι περιοχές με πολύ χαμηλή τρωτότητα εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στα βόρεια του νησιού όπου επικρατούν απότομες πλαγιές με μεγάλη κλίση εδάφους, μικρή ανθρωπογενή παρέμβαση, αποτελούμενη από ηφαιστειακά πετρώματα. Στους χάρτες των Σχημάτων 37-39 αποτυπώνεται η τελική ταξινόμηση των τιμών του δείκτη παράκτιας τρωτότητας για κάθε μία από τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν.



Σχήμα 37. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο των *Transects*.



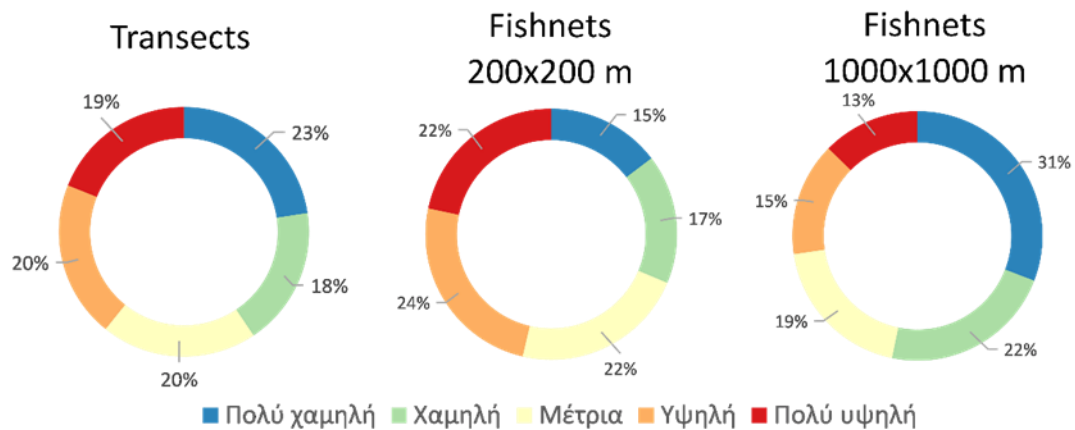
Σχήμα 38. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο του πλέγματος (Fishnets) 200μ.χ200 μ.



Σχήμα 39. Χάρτης με την τελική παράκτια τρωτότητα με τη μέθοδο του πλέγματος (Fishnets) 1000μ.χ1000 μ.

Ακολουθώς, παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα στατιστικά τρωτότητας για κάθε μία μέθοδο. Από την ανάλυση προκύπτει ότι όσο μικρότερη είναι η περιοχή που εξετάζεται κοντά στην ακτογραμμή, δηλαδή όσο λιγότερο εκτείνεται η μελέτη προς το εσωτερικό της ξηράς, τόσο μεγαλύτερες εμφανίζονται οι τιμές του δείκτη CVI. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο παραμέτρους: το υψόμετρο και την κάλυψη γης. Όσον αφορά το υψόμετρο, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, παρατηρείται ότι τα υψόμετρα αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από την ακτογραμμή. Συνεπώς, οι περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στη θάλασσα, χαρακτηρίζονται συνήθως από χαμηλότερα υψόμετρα, τα οποία συνδέονται με υψηλότερη τρωτότητα. Επιπλέον, σχετικά με την κάλυψη γης, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε

βασίστηκε στην επικρατέστερη κατηγορία κάλυψης (δηλαδή τη συχνότερη εμφάνιση pixel συγκεκριμένου τύπου εντός των πλεγμάτων, ή τη μεγαλύτερη έκταση κατά μήκος κάθε διατομής). Καθώς οι περισσότεροι παραθαλάσσιοι οικισμοί της Λέσβου είναι συνήθως μικρής έκτασης, όσο αυξάνεται το μέγεθος της περιοχής που μελετάται, τόσο μειώνεται η πιθανότητα να καταγράφεται ως κυρίαρχη κάλυψη η δομημένη ή αστική περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται υψηλότερες τιμές τρωτότητας στις αναλύσεις που βασίζονται σε μικρότερα πλέγματα (π.χ. 200μ.χ200μ.) ή στη μεθοδολογία των transects, καθώς αποτυπώνονται καλύτερα και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι καλύψεις γης κοντά στην ακτογραμμή.



Σχήμα 40. Διαγράμματα με τη χωρική του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI) για κάθε μία μεθοδολογία.

## Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός και Υλοποίηση Εφαρμογής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά ο σκοπός και η μεθοδολογία υλοποίησης της διαδικτυακής εφαρμογής. Γίνεται αναφορά στα βασικά εργαλεία και λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και στις κύριες λειτουργίες και δυνατότητες της εφαρμογής που σχεδιάστηκε για την απεικόνιση και αξιολόγηση της παράκτιας τρωτότητας.

### 6.1 Σκοπός

Ο σκοπός της δημιουργίας μιας διαδικτυακής εφαρμογής που θα απεικονίζει την παράκτια τρωτότητα βασίζεται στην ανάγκη για εύκολη, διαδραστική και άμεση πρόσβαση σε γεωχωρικά δεδομένα που αφορούν ένα κρίσιμο φαινόμενο. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να υποστηρίξει την ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού γύρω από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και της επακόλουθης διάβρωσης των ακτών. Επιπλέον, μέσω της συγκριτικής ανάλυσης που προσφέρει δίνει τη δυνατότητα για αξιολόγηση και προτεραιοποίηση μέτρων προσαρμογής και προστασίας της παράκτιας ζώνης.

Από χαρτογραφική σκοπιά, η πολυμεταβλητή χαρτογράφηση των οκτώ αρχικών μεταβλητών που επιλέχθηκαν για την εκτίμηση της παράκτιας τρωτότητας αποδόθηκε μέσω του σύνθετου δείκτη CVI. Η θεματική αυτή απεικόνιση επέτρεψε την ενσωμάτωση των επιμέρους μεταβλητών σε έναν ενιαίο δείκτη, καθιστώντας την ερμηνεία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων πιο απλή και κατανοητή. Επιπλέον, οι δυνατότητες του διαδικτυακού χάρτη επέτρεψαν τη διαδραστικότητα και την εναλλαγή μεταξύ της απεικόνισης του τελικού δείκτη CVI και των οκτώ επιμέρους μεταβλητών. Ένα επιπλέον εργαλείο που ενισχύει την κατανόηση ήταν η δυνατότητα αλλαγής υποβάθρου, ώστε ο χρήστης να επιλέγει μεταξύ δορυφορικών εικόνων και χαρτών αναγλύφου, διευκολύνοντας έτσι την αναγνώριση της μορφολογίας και της χωρικής κατανομής των τιμών. Παράλληλα, η προσθήκη συμπληρωματικών θεματικών επιπέδων, όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα, οι προστατευόμενες περιοχές και οι περιοχές κινδύνου πλημμύρας, συνέβαλε στην πολύπλευρη αξιολόγηση των τιμών του δείκτη. Τέλος, η δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων για την απομόνωση περιοχών με υψηλή τρωτότητα, σε συνδυασμό με τις παραπάνω θεματικές, ενίσχυσε την κατανόηση της σημασίας και της επικινδυνότητας του φαινομένου σε κάθε περιοχή. Συνεπώς, η διαδραστική διαδικτυακή απεικόνιση αποτελεί ένα ουσιαστικό εργαλείο για την ερμηνεία και αξιολόγηση του δείκτη CVI.

### 6.2 Εργαλεία Υλοποίησης

Για την υλοποίηση της εφαρμογής αξιοποιήθηκε ένας συνδυασμός από εφαρμογές, γλώσσες προγραμματισμού και λογισμικά, τα οποία συνέβαλαν στην σωστή λειτουργικότητά της και τις πρόσθεσαν δυνατότητες διαδραστικότητας και αποδοτικής απεικόνισης των δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της εφαρμογής.

## 6.2.1 HTML, CSS, JavaScript

Για την υλοποίηση της διαδικτυακής εφαρμογής αξιοποιήθηκαν οι τρεις βασικές γλώσσες προγραμματισμού για κάθε ιστοσελίδα που είναι οι: HTML για τη δομή, CSS για την αισθητική παρουσίαση, JavaScript για τη λειτουργικότητα και τη διαδραστικότητα. Σύμφωνα με τον Neumann (2012) αυτές οι γλώσσες αποτελούν τη βάση της σύγχρονης διαδικτυακής χαρτογράφησης, καθώς επιτρέπουν την ανάπτυξη χαρτών που λειτουργούν άμεσα σε όλους τους browsers, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων λογισμικών. Οι σύγχρονες δυνατότητες των τεχνολογιών του διαδικτύου όπως η πιο πρόσφατη έκδοση της γλώσσας HTML (HTML5) και οι εξελίξεις στην JavaScript σε συνδυασμό με το WebGL (τεχνολογία γραφικών που επιτρέπει την απόδοση 2D και 3D) επιτρέπουν την υλοποίηση περίπλοκων διαδραστικών χαρτογραφικών εφαρμογών υψηλής απόδοσης, ενισχύοντας την εμπειρία του χρήστη και την αποτελεσματικότητα της απεικόνισης (Zunino et al., 2020).

Αρχικά, η Γλώσσα Σήμανσης Υπερκειμένου ή HyperText Markup Language (HTML) αποτελεί τη βασική γλώσσα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και τη δομή των ιστοσελίδων. Μέσω της HTML ορίζονται τα βασικά στοιχεία (elements) μιας σελίδας όπως τίτλοι, επικεφαλίδες, παράγραφοι, σύνδεσμοι, εικόνες και διάφορα άλλα πλαίσια. Κάθε στοιχείο αποτελείται από την ετικέτα (tag) έναρξης, το περιεχόμενο και την ετικέτα λήξης, όπως για παράδειγμα `<body> ... </body>` για το κύριο σώμα της ιστοσελίδας, `<h1> ... </h1>` για την κύρια επικεφαλίδα, `<p> ... </p>` για παραγράφους κειμένου (Dorman, 2020). Επειδή από μόνη της δεν περιλαμβάνει λειτουργικότητα και μορφοποίηση, γι' αυτό το λόγο συνεργάζεται με τη γλώσσα CSS για την εμφάνιση και με την JavaScript για τη διαδραστικότητα.

Αναφορικά με την CSS (Cascading Style Sheets) είναι μια γλώσσα που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της εμφάνισης και της αισθητικής των ιστοσελίδων. Μέσω της CSS καθορίζονται ιδιότητες όπως το χρώμα, οι γραμματοσειρές, τα περιθώρια, το πλάτος και το ύψος των στοιχείων, καθώς και η διάταξή τους. Η CSS μπορεί να ενσωματωθεί είτε εντός του κώδικα της HTML είτε να συνδεθεί ως εξωτερικός σύνδεσμος ή ακόμη να βρίσκεται και σε εξωτερικό αρχείο (Dorman, 2020). Στο παράδειγμα που ακολουθεί φαίνεται ο καθορισμός της εμφάνισης inline (δηλαδή μέσα στον κώδικα HTML): `<p style="color: blue; font-style: italic;">` Παράδειγμα CSS, όπου θα εμφανίσει το κείμενο της παραγράφου με μπλε, italic γράμματα.

Κομβική για τη λειτουργικότητα και τη διαδραστικότητα μιας χαρτογραφικής διαδικτυακής εφαρμογής αποτελεί η γλώσσα προγραμματισμού JavaScript (JS). Η JavaScript αποτελεί μία γλώσσα προγραμματισμού που προσδίδει διαδραστικότητα στις ιστοσελίδες, καθιστώντας δυνατή την αλληλεπίδραση με τα στοιχεία της σελίδας σε πραγματικό χρόνο. Εκτελείται τοπικά στον browser, χωρίς να απαιτείται διακομιστής και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές web mapping καθώς προσφέρει δυνατότητες όπως zoom, pan, φόρτωση GeoJSON αρχείων και δυναμική διαχείριση των δεδομένων του χάρτη. Συνεπώς, αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για τους σύγχρονους διαδικτυακούς χάρτες.

Για την υλοποίηση της διαδικτυακής εφαρμογής αξιοποιήθηκε η HTML5 για τον ορισμό της βασικής δομής της ιστοσελίδας, δηλαδή των στατικών στοιχείων όπως τα πλαίσια απεικόνισης των χαρτών, τα μενού επιλογών, τα υπομνήματα και τα συνοδευτικά κείμενα. Αν και η HTML δεν προσφέρει από μόνη της διαδραστικότητα, ορίζει τα απαραίτητα στοιχεία της σελίδας, τα οποία στη συνέχεια αποκτούν λειτουργικότητα μέσω της JavaScript. Οι διαδραστικές

λειτουργίες, όπως η εναλλαγή θεματικών επιπέδων, η εφαρμογή φίλτρων, η εστίαση στον χάρτη και η εμφάνιση αναδυόμενων παραθύρων (popups), υλοποιήθηκαν εξολοκλήρου με JavaScript, αξιοποιώντας τη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS. Μέσω αυτής, έγινε δυνατή η δυναμική απεικόνιση των γεωχωρικών δεδομένων, τα οποία είχαν προετοιμαστεί τοπικά και μεταφορτωθεί στην πλατφόρμα του Mapbox. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών οδήγησε στην ανάπτυξη μιας λειτουργικής και διαδραστικής χαρτογραφικής εφαρμογής.

## 6.2.2 Mapbox

Το Mapbox είναι μια πλατφόρμα δημιουργίας και προβολής διαδραστικών χαρτών στο διαδίκτυο. Χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή εξατομικευμένων χαρτών σε ιστοσελίδες και εφαρμογές, προσφέροντας ένα πλήρες περιβάλλον εργασίας, το Mapbox Studio (Mapbox, 2025). Με αυτό το εργαλείο, ο χρήστης μπορεί να εισάγει και να δημιουργήσει datasets (γεωχωρικά δεδομένα), να τα μετατρέψει σε μορφή tilesets (δηλαδή σε μορφή πινακίδων για γρήγορη απεικόνιση) και να τα επεξεργαστεί εύκολα, αλλάζοντας την οπτικοποίηση και την εμφάνισή τους μέσω του Style Editor. Η λειτουργία του Mapbox βασίζεται στη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS, η οποία είναι γραμμένη σε JavaScript και χρησιμοποιεί την τεχνολογία WebGL για την απεικόνιση των χαρτών σε προγράμματα περιήγησης. Αυτό επιτρέπει στο Mapbox να εμφανίζει μεγάλους όγκους δεδομένων με υψηλή απόδοση, καθώς η επεξεργασία γίνεται απευθείας στην κάρτα γραφικών (GPU) του χρήστη (Zunino et al., 2020).

Η πλατφόρμα Mapbox προσφέρει ένα πλήρες φάσμα εργαλείων και υπηρεσιών για τη δημιουργία, επεξεργασία και δημοσιοποίηση διαδραστικών χαρτών σε διάφορες εφαρμογές. Ενδεικτικά, οι βασικές της δυνατότητες περιλαμβάνουν:

- *Έτοιμα χαρτογραφικά επίπεδα:*

Το Mapbox παρέχει πλούσια και συνεχώς ενημερωμένα χαρτογραφικά υπόβαθρα (όπως τα: Mapbox Streets, Mapbox Terrain, Mapbox Traffic, Mapbox Satellite) που περιλαμβάνουν οδικό δίκτυο, υψομετρικά δεδομένα, πληροφορίες κυκλοφορίας και δορυφορικές εικόνες.

- *Εργαλεία σχεδιασμού και παραμετροποίησης χαρτών:*

Με το Mapbox Studio και το ενσωματωμένο Style Editor, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν και να προσαρμόσουν την εμφάνιση των χαρτών τους, τροποποιώντας χρώματα, γραμματοσειρές, ονομασίες, φίλτρα, ακόμη και προσθέτοντας προσαρμοσμένα εικονίδια ή 3D στοιχεία.

- *Διαχείριση και εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη:*

Πέρα από τα έτοιμα υπόβαθρα, οι χρήστες μπορούν να εισάγουν τα δικά τους δεδομένα ως datasets ή να τα μετατρέψουν σε tilesets. Αυτά τα δεδομένα ενσωματώνονται εύκολα στους χάρτες τους και μπορούν να οπτικοποιηθούν και να τροποποιηθούν μέσα από το Mapbox Studio.

- *Δημοσίευση και ενσωμάτωση χαρτών σε εφαρμογές:*

Μετά τον σχεδιασμό, οι χάρτες μπορούν να ενσωματωθούν σε διαδικτυακές εφαρμογές, εφαρμογές για smartphones (Android/iOS), αλλά και desktop GIS εφαρμογές, μέσω των αντίστοιχων SDK και API του Mapbox.

- *Προσθήκη διαδραστικότητας και δυναμικών λειτουργιών:*

Το Mapbox διαθέτει πλούσιο σύνολο εργαλείων (API, plugins) που δίνουν τη δυνατότητα προσθήκης διαδραστικών λειτουργιών, όπως αναζήτηση περιοχής (geocoding), υπολογισμός διαδρομών, χωρική ανάλυση (π.χ. isochrones, clustering, heatmaps), και εμφάνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

- *Υποστήριξη τρισδιάστατης απεικόνισης και απεικόνισης εδάφους:*

Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα για τρισδιάστατη απεικόνιση κτιρίων, εδάφους και άλλες προηγμένες οπτικοποιήσεις.

- *Εξαγωγή στατικών χαρτών:*

Μέσω του Mapbox Static Images API, είναι δυνατή η εξαγωγή στατικών εικόνων υψηλής ανάλυσης για εκτύπωση ή offline χρήση.

Στο Mapbox ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τα γεωχωρικά του δεδομένα με δύο βασικούς τρόπους: είτε ως datasets είτε απευθείας ως tilesets. Τα datasets είναι συλλογές γεωχωρικών δεδομένων που μπορούν να δημιουργηθούν ή να επεξεργαστούν μέσα από το Mapbox Studio, προσφέροντας τη δυνατότητα αλλαγών στη γεωμετρία και στα χαρακτηριστικά των οντοτήτων. Από την άλλη, ο χρήστης μπορεί να ανεβάσει τα δεδομένα του απευθείας ως tilesets, χωρίς ενδιάμεση επεξεργασία ως dataset. Η μεταφόρτωση των αρχείων ως χαρτογραφικές πινακίδες (tilesets) επιτρέπει τη δημιουργία raster tilesets για τα κανονικοποιημένα αρχεία (μορφής GeoTIFF) ή vector tilesets για τα διανυσματικά αρχεία (μορφής GeoJSON, Shapefiles, MBTILES). Τα tilesets μετατρέπουν τα δεδομένα σε μια βελτιστοποιημένη μορφή για γρήγορη και αποδοτική απεικόνιση των δεδομένων σε χάρτες, υποστηρίζοντας θεματική απεικόνιση (όπως εναλλαγές σε χρώματα και συμβολισμούς), αλλά όχι περαιτέρω επεξεργασία γεωμετρίας. Αυτή η ευελιξία στην εισαγωγή και διαχείριση δεδομένων διευκολύνει την παραγωγή διαδραστικών και εξατομικευμένων χαρτών μέσα από την πλατφόρμα του Mapbox.

Επίσης, η Mapbox προσφέρει τη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS η οποία είναι γραμμένη σε JavaScript και δίνει επιπρόσθετες δυνατότητες για διαδραστική επεξεργασία των χαρτών στο διαδίκτυο. Βασίζεται στην τεχνολογία WebGL, η οποία επιτρέπει την απεικόνιση δισδιάστατων και τρισδιάστατων γραφικών απευθείας στον browser, αξιοποιώντας τη δύναμη της κάρτας γραφικών του υπολογιστή. Αυτό σημαίνει ότι οι χάρτες που δημιουργούνται είναι πολύ γρήγοροι, ακόμα και όταν περιέχουν μεγάλο όγκο δεδομένων ή πολύπλοκες θεματικές απεικονίσεις. Η βιβλιοθήκη Mapbox GL JS επιτρέπει την προσθήκη λειτουργιών στους χάρτες όπως ζουμ, αναζήτηση, εμφάνιση πληροφοριών με αναδυόμενα παράθυρα (popups), θεματική απεικόνιση δεδομένων και πολλά ακόμη. Για όλους αυτούς τους λόγους, η Mapbox GL JS αποτελεί πού σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη διαδραστικών θεματικών χαρτών στο διαδίκτυο.

Για την υλοποίηση της χαρτογραφικής διαδικτυακής εφαρμογής στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πολλά από τα εργαλεία και τις υπηρεσίες του Mapbox. Τα γεωχωρικά δεδομένα μεταφορτώθηκαν απευθείας ως tilesets στο cloud περιβάλλον του Mapbox, ώστε στη συνέχεια να ενσωματωθούν στον κώδικα για προβολή. Επίσης, για την οπτικοποίηση του χάρτη στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα από τα χαρτογραφικά υποβάθρα (basemaps) που παρέχει το Mapbox, όπως το Mapbox Satellite και το Mapbox Dark. Η εφαρμογή αξιοποίησε τη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS, η οποία ενσωματώθηκε και χρησιμοποιήθηκε μέσα στον JavaScript κώδικα. Η βιβλιοθήκη αυτή επέτρεψε τη σύνδεση με τον προσωπικό λογαριασμό Mapbox μέσω του Access Token με τη βοήθεια του οποίου έγινε η φόρτωση των δεδομένων σε μορφή tilesets, η χρήση των χαρτογραφικών υποβάθρων και δόθηκε η άδεια για την υλοποίηση των βασικών λειτουργιών διαδραστικότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το Mapbox δεν είναι ένα πλήρως ελεύθερο λογισμικό, αλλά παρέχει ένα δωρεάν πλάνο με περιορισμούς στη χρήση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και εφόσον δεν ξεπεραστούν τα μηνιαία όρια που σχετίζονται με τον αριθμό μεταφόρτωσης δεδομένων, δεν υπάρχει καμία χρέωση και η χρήση του παραμένει δωρεάν.

### 6.2.3 Visual Studio Code

Για τη συγγραφή του κώδικα της εφαρμογής (HTML, CSS, JavaScript), χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) Visual Studio Code το οποίο δημιουργήθηκε από τη Microsoft (Visual Studio Code, 2025). Είναι ένα σύγχρονο πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα που προσφέρει υποστήριξη για πληθώρα γλωσσών προγραμματισμού, επεκτάσεις (extensions) για αυτοματοποίηση εργασιών, ενσωματωμένο τερματικό (integrated terminal) και εργαλεία debugging.

Η επιλογή του λογισμικού αυτού έγινε λόγω της δωρεάν διαθεσιμότητας του και της μεγάλης υποστήριξης από την κοινότητα των χρηστών του. Το πρόγραμμα υποστηρίζει την ταυτόχρονη επεξεργασία του κώδικα (HTML, CSS, JavaScript) και την άμεση προβολή της ιστοσελίδας μέσω κατάλληλων επεκτάσεων (όπως το Live Server). Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να βλέπει σε πραγματικό χρόνο τις αλλαγές που κάνει στον κώδικα, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την αποδοτικότητα κατά τη δημιουργία της εφαρμογής.

### 6.2.4 Tippecanoe

Το Tippecanoe είναι ένα εργαλείο γραμμής εντολών ανοιχτού κώδικα που έχει αναπτυχθεί από την Mapbox, και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή γεωχωρικών δεδομένων (όπως αρχεία GeoJSON) σε διανυσματικά αρχεία πλακιδίων (vector tilesets) στη μορφή MBTiles, τα οποία είναι κατάλληλα για χρήση με το Mapbox Studio (Mapbox Tippecanoe, 2025). Με το Tippecanoe, ο χρήστης μπορεί να ορίσει με ακρίβεια το εύρος των επιπέδων μεγέθυνσης (zoom levels) στα οποία θα εμφανίζονται τα δεδομένα του.

Στην παρούσα εργασία, το Tippecanoe χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή διανυσματικών tilesets με προσαρμοσμένο εύρος επιπέδων μεγέθυνσης, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή απεικόνιση της γραμμικής γεωμετρίας της ακτογραμμής σε όλη την κλίμακα του νησιού της Λέσβου. Το εργαλείο αυτό επέτρεψε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του αυτόματου καθορισμού zoom levels που επιβάλλει το Mapbox Studio, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα τα

δεδομένα να παραμένουν ορατά τόσο σε μικρά όσο και σε μεγάλα επίπεδα ζουμ, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

## 6.3 Υλοποίηση

### 6.3.1 Μεταφόρτωση δεδομένων

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων που περιεγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, ακολούθησε η μεταφόρτωση των τελικών δεδομένων στην πλατφόρμα του Mapbox. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα επιλέχθηκε να ανέβουν στην υπηρεσία cloud Mapbox Studio Tilesets, η οποία μετατρέπει τα δεδομένα σε χαρτογραφικές πινακίδες και συγκεκριμένα σε διανυσματικές πινακίδες (vector tiles). Τα δεδομένα έπρεπε να βρίσκονται στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS84 (ESPG:4326) και για το λόγο αυτό μετασχηματίστηκαν από το σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87 (ESPG:2100) στο οποίο βρισκόταν αρχικά. Μια επίσης, σημαντική παράμετρος ήταν τα δεδομένα να βρίσκονται αποθηκευμένα σε μία αποδεκτή μορφή από το Mapbox, γι' αυτό και αποθηκεύτηκαν σε μορφή GeoJSON.

Τα βασικά δεδομένα που ανέβηκαν στο cloud του Mapbox και αφορούσαν τις τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες υπολογισμού του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI) ήταν τα εξής:

- Η ακτογραμμή στην οποία εκχωρήθηκαν οι τιμές του δείκτη που υπολογίστηκαν στα σημεία τομής με τις διατομές (transects) κάθετα στην ακτογραμμή.
- Τα πλέγματα (fishnet) διαστάσεων 200μ. x 200μ. κατά μήκος της ακτογραμμής, στο οποίο αποδόθηκαν οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη.
- Τα πλέγματα (fishnet) διαστάσεων 1.000μ. x 1.000μ. κατά μήκος της ακτογραμμής, με ανάλογη απόδοση των τιμών του δείκτη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το διανυσματικό αρχείο της ακτογραμμής πριν μεταφορτωθεί στην πλατφόρμα μετασχηματίστηκε σε MBTILES μέσω του εργαλείου Tippecanoe που εκτελέστηκε στη γραμμή εντολών του λογισμικού Ubuntu (Linux). Αυτό ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθεί καθώς λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας της συγκεκριμένης γραμμικής οντότητας ήταν αδύνατη η προβολή της στο επίπεδο ζουμ όπου φαινόταν ολόκληρη η Λέσβος και για αυτό το λόγο μετασχηματίστηκε σε MBTILES ώστε να καθαριστούν νέα εύρη μεγέθυνσης.

Επιπλέον, αυτών των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τρία ακόμη διανυσματικά αρχεία ώστε να ενσωματωθούν στη συνέχεια στον χάρτη και να βοηθήσουν, μέσω της υπέρθεσής τους πάνω από τα υπόλοιπα δεδομένα, στην καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παράκτιας τρωτότητας. Συγκεκριμένα, το πρώτο αφορούσε τις θέσεις με τους οικισμούς και τον μόνιμο πληθυσμό σύμφωνα με την απογραφή του 2021, το δεύτερο αφορούσε της περιοχές του δικτύου Natura 2000 και το τρίτο αφορούσε τον παράκτιο κίνδυνο πλημμύρας από τη διαδικτυακή εφαρμογή Coastal Hazard Wheel (2025).

Στο παρακάτω απόσπασμα (βλ. Σχήμα 41) φαίνεται το αναρτημένο στο cloud του Mapbox Tilesets διανυσματικό επίπεδο Fishnet 1000μ. Στο σχήμα διακρίνεται αλλά και το όνομα του αρχείου αλλά και ο χαρακτηριστικός κωδικός του Tileset ID. Επίσης, στα αριστερά διακρίνεται το εύρος μεγέθυνσης (0-14) που αφορά τα διάφορα επίπεδα zoom στα οποία είναι ορατό το

συγκεκριμένο επίπεδο. Επίσης, φαίνονται όλα τα πεδία που περιλαμβάνει και το συνολικό μέγεθος του αρχείου (372 KB), κάτι που είναι αρκετά σημαντικό καθώς για πολύ μεγαλύτερα αρχεία το Mapbox εφαρμόζει μηνιαία χρέωση.



Σχήμα 41. Απόσπασμα από το περιβάλλον cloud service του Mapbox Studio Tilesets.

### 6.3.2 Σύνταξη κώδικα

Για τη σύνταξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Visual Studio Code, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Εκτός από τα βασικά δομικά στοιχεία της HTML, ενσωματώθηκε η βιβλιοθήκη Mapbox GL JS, καθώς παρέχει έτοιμες εντολές για την απεικόνιση χαρτών, τη διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων και την υλοποίηση λειτουργιών διαδραστικότητας, όπως popups, αλλαγή επιπέδων, φιλτράρισμα δεδομένων και διάφορα εργαλεία πλοήγησης. Οι δυνατότητες και οι εντολές της βιβλιοθήκης αυτής θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στη συνέχεια. Για παράδειγμα η εισαγωγή της βιβλιοθήκης Mapbox GL JS 3.10.0 γίνεται ως εξής:

```
<script src="https://api.mapbox.com/mapbox-gl-js/v3.10.0/mapbox-gl.js"></script>
```

```
<link rel="stylesheet" href="https://api.mapbox.com/mapbox-gl-js/v3.10.0/mapbox-gl.css">
```

Επιπλέον, έγινε η εισαγωγή του Access Token του λογαριασμού που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα του Mapbox ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση της βιβλιοθήκης αλλά και η φόρτωση των layers στη συνέχεια.

```
mapboxgl.accessToken='pk.eyJ1IjoiamltaXMxMGppbWlzIiwiaSI6ImNtODdtYjY2YTBlbXkya3NmcmcGJsMDEpMCAifQ.dpZXMwEwwFCMd078zh9agQ';
```

#### 6.3.2.1 Χαρτογραφικά υπόβαθρα

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία σε μία θεματική απεικόνιση αποτελεί το υπόβαθρο του χάρτη, καθώς λειτουργεί ως βάση, πάνω στην οποία προβάλλονται τα γεωχωρικά δεδομένα και τα θεματικά επίπεδα. Η κατάλληλη επιλογή υποβάθρου βοηθά στην καλύτερη ανάγνωση,

ερμηνεία και ανάδειξη των πληροφοριών, προσδίδοντας παράλληλα αισθητική και λειτουργικότητα στη χαρτογραφική εφαρμογή.

Το Mapbox παρέχει ποικιλία έτοιμων υποβάθρων (basemaps), όπως δορυφορικές εικόνες, χάρτες δρόμων, τοπογραφικά υπόβαθρα και θεματικά στυλ (π.χ. σκοτεινό ή ανοιχτό φόντο). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υπόβαθρα ανάλογα με τις ανάγκες της απεικόνισης, όπως το σκοτεινό υπόβαθρο ("dark-v11") που διευκολύνει την προβολή θεματικών layers με έντονα χρώματα, το δορυφορικό υπόβαθρο που προσφέρει ρεαλιστική απεικόνιση της επιφάνειας της γης και το τοπογραφικό υπόβαθρο για καλύτερη αντίληψη του αναγλύφου. Η επιλογή και αλλαγή υποβάθρου γίνεται δυναμικά μέσα από τη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να προσαρμόζει την προβολή σύμφωνα με τις προτιμήσεις του.

Στο παρακάτω τμήμα του κώδικα φαίνεται η εντολή αρχικοποίησης του χάρτη, όπου ορίζεται το βασικό υπόβαθρο που θα χρησιμοποιεί ο χάρτης, και τέλος, ορίζεται το αρχικό επίπεδο ζουμ και το κέντρο του χάρτη (εκφρασμένο σε γεωγραφικές συντεταγμένες) ώστε να εστιάζει αρχικά στο νησί της Λέσβου.

```
const map = new mapboxgl.Map({
  container: 'map',
  style: 'mapbox://styles/mapbox/dark-v11',
  center: [26.25, 39.18],
  zoom: 9.3
});
```

Η διαδικτυακή εφαρμογή προσφέρει τη δυνατότητα δυναμικής εναλλαγής του υποβάθρου του χάρτη. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ διαφόρων στυλ, όπως νυχτερινό, δορυφορικό και τοπογραφικό υπόβαθρο, μέσω ειδικού μενού στο περιβάλλον της εφαρμογής. Η λειτουργία αυτή υλοποιείται με τη συνάρτηση `changeBasemap(styleUrl, button)`, η οποία καλείται κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει διαφορετικό υπόβαθρο. Αυτή με τη σειρά της καλεί την `map.setStyle(styleUrl)` η οποία ανήκει στη βιβλιοθήκη Mapbox GL JS και δίνει κάνει πράξη την αλλαγή υποβάθρου. Ενδεικτικά, το παρακάτω απόσπασμα που πραγματοποιεί την αλλαγή υποβάθρου είναι το εξής:

```
function changeBasemap(styleUrl, button) {
  map.setStyle(styleUrl);
  map.once('style.load', () => {
    // Επαναπροσθήκη θεματικών layers και ενημέρωση ιδιοτήτων
  });
}
```

Η εναλλαγή υποβάθρου ενεργοποιείται μέσω των αντίστοιχων κουμπιών στην εφαρμογή, τα οποία καλούν τη συνάρτηση αλλαγής υποβάθρου με την επιλογή του χρήστη:

```
<div class="basemap-container">

  <button class="basemap-button"
onclick="toggleBasemapOptions()">Υπόβαθρο</button>

<div class="basemap-options" id="basemapOptions">

  <button class="selected"

    data-style-url="mapbox://styles/mapbox/dark-v11"

    onclick="changeBasemap('mapbox://styles/mapbox/dark-v11', this)">

    <span>Dark</span>

  </button>

  <button data-style-url="mapbox://styles/mapbox/standard-satellite"
onclick="changeBasemap('mapbox://styles/mapbox/standard-satellite',
this)">

  <span>Satellite</span>

</button>

  <button data-style-url="mapbox://styles/mapbox/outdoors-v12"

    onclick="changeBasemap('mapbox://styles/mapbox/outdoors-v12',
this)">

  <span>Outdoors</span>

</button>

</div>

</div>
```

### 6.3.2.2 Εισαγωγή Θεματικών επιπέδων

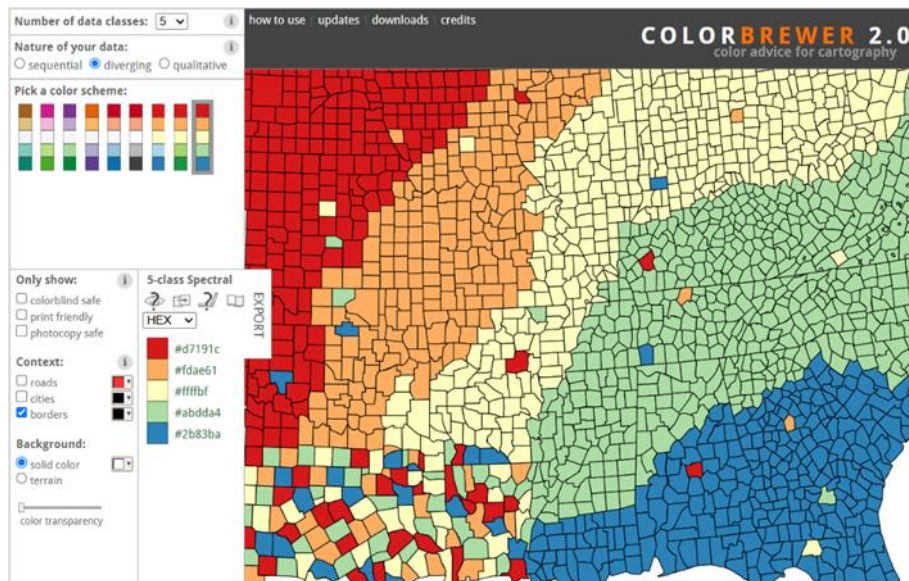
Για την απεικόνιση θεματικών δεδομένων στο χάρτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εισαγωγής custom vector layers μέσω της εντολής `addLayer` (ανήκει στη βιβλιοθήκη `Mapbox GL JS`). Τα δεδομένα αντλήθηκαν από αντίστοιχα `tilesets` που δημιουργήθηκαν στην πλατφόρμα `Mapbox`

Studio και δημοσιεύθηκαν στον λογαριασμό μου. Η σύνδεση με αυτά τα tilesets πραγματοποιείται με βάση το μοναδικό τους Tileset ID και το όνομα του layer μέσα στο tileset, που δηλώνεται ως source-layer. Ενδεικτικό απόσπασμα κώδικα:

```
function addMyTilesetLayer() {  
  map.addSource('my-vector-tileset', {  
    type: 'vector',  
    url: 'mapbox://jimis10jimis.dkkjd72p' // Tileset ID  
  });  
  
  map.addLayer({  
    id: 'my-layer',  
    type: 'fill',  
    source: 'my-vector-tileset',  
  
    'source-layer': 'Fishnets_1000_WGS84-31sn0i', // Όνομα layer μέσα στο  
    tileset  
  
    paint: {  
      'fill-opacity': 0.8,  
      'fill-outline-color': '#000' },  
  
    layout: {  
      visibility: 'none' } } ) ; }  
}
```

Σε αυτό το παράδειγμα, το πεδίο url περιέχει το Tileset ID που αντιστοιχεί στα δεδομένα του θεματικού επιπέδου, ενώ το πεδίο 'source-layer' ορίζει το συγκεκριμένο layer εντός του tileset που πρόκειται να απεικονιστεί στον χάρτη.

Για την επιλογή των χρωμάτων της θεματικής χαρτογράφησης αξιοποιήθηκε η ιστοσελίδα ColorBrewer2, η οποία παρέχει κατάλληλες χρωματικές παλέτες ειδικά σχεδιασμένες για χαρτογραφικές απεικονίσεις. Για την οπτικοποίηση του δείκτη παράκτιας τρωτότητας, όπου είναι σημαντικό να αναδειχθούν τόσο οι περιοχές με χαμηλή όσο και αυτές με υψηλή τιμή, επιλέχθηκε η χρήση αποκλίνουσας χρωματικής παλέτας (diverging). Η συγκεκριμένη παλέτα επιτρέπει την ευδιάκριτη διάκριση μεταξύ των δύο άκρων της κλίμακας, προσφέροντας άμεση και σαφή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε η αποκλίνουσα χρωματική παλέτα με 5 διακριτές κλάσεις (τάξεις), όσες ακριβώς ήταν και οι ομάδες στις οποίες ταξινομήθηκαν οι αρχικές παράμετροι και οι τελικές τιμές του δείκτη CVI, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 42.



Σχήμα 42. Απόσπασμα από την ιστοσελίδα ColorBrewer 2.0 με την επιλεγμένη χρωματική παλέτα.

Οι κωδικοί χρώματος (σε μορφή HEX) ενσωματώθηκαν απευθείας στον κώδικα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω απόσπασμα:

```
function updateLayerStyle(attribute) {
    const colorStops = [
        [1, '#2b83ba'],
        [2, '#abdda4'],
        [3, '#ffffbf'],
        [4, '#fdae61'],
        [5, '#d7191c']
    ];
    // Εδώ ακολουθούν εντολές για εφαρμογή των χρωμάτων στα layers του χάρτη
}
```

### 4.3.3 Διαδραστικές λειτουργίες

#### 4.3.3.1 Εναλλαγή θεματικών επιπέδων

Η διαδικτυακή εφαρμογή παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να εναλλάσσει δυναμικά μεταξύ τριών διαφορετικών θεματικών επιπέδων που απεικονίζουν τον Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI), όπως αυτός υπολογίστηκε με διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις (γραμμή ακτογραμμής/transects, fishnet 200m και fishnet 1000m).

Η εναλλαγή αυτή υλοποιείται μέσω ενός toggle switch (τριπλό κουμπί), που βρίσκεται στην πλευρική μπάρα της εφαρμογής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου `setLayoutProperty` της βιβλιοθήκης `Mapbox GL JS`, έτσι, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το επιθυμητό επίπεδο, βλέποντας άμεσα τις σχετικές χωρικές απεικονίσεις και το αντίστοιχο υπόμνημα που παραμένει ίδιο για όλες τις απεικονίσεις.

Η υλοποίηση βασίζεται στη λογική της απόκρυψης/εμφάνισης των `layers` του χάρτη ανάλογα με το ποιο κουμπί είναι ενεργό. Το παρακάτω απόσπασμα JavaScript παρουσιάζει τη βασική λειτουργικότητα της εναλλαγής των θεματικών επιπέδων:

```
// Εναλλαγή θεματικών επιπέδων

function setLayerVisibility(activeIndex) {

  for (let i = 1; i <= 3; i++) {

    document.getElementById(`layer-btn-${i}`).classList.toggle('selected',
i === activeIndex);

  }

  updateToggleSlider(activeIndex);

  // Εμφάνιση/Απόκρυψη των layers

  if (map.getLayer('coastline-layer')) {

    map.setLayoutProperty('coastline-layer', 'visibility', activeIndex ===
1 ? 'visible' : 'none');

  }

  if (map.getLayer('second-layer')) {

    map.setLayoutProperty('second-layer', 'visibility', activeIndex === 2 ?
'visible' : 'none');

  }

  if (map.getLayer('my-layer')) {

    map.setLayoutProperty('my-layer', 'visibility', activeIndex === 3 ?
'visible' : 'none');

  }

  // Ενημέρωση opacity και διαγράμματος

  updateOpacityForActiveLayer(activeIndex);

  updatePieChart(document.getElementById('attribute-select').value);

}
```



Σχήμα 43. Το κουμπί triple toggle με το οποίο εναλλάσσονται τα θεματικά επίπεδα του δείκτη CVI.

### 6.3.3.2 Εναλλαγή πεδίου απεικόνισης

Η διαδικτυακή εφαρμογή παρέχει επίσης τη δυνατότητα εναλλαγής του θεματικού πεδίου που προβάλλεται στο χάρτη, επιτρέποντας στο χρήστη να δει όχι μόνο τον τελικό δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI), αλλά και τις επιμέρους παραμέτρους που συνυπολογίστηκαν στον δείκτη αυτό. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας, τη γεωμορφολογία, την κάλυψη γης και άλλες μεταβλητές που αναλύθηκαν εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Κάθε παράμετρος έχει ταξινομηθεί σε 5 κλάσεις και η απεικόνισή τους στον χάρτη γίνεται με την ίδια χρωματική παλέτα που χρησιμοποιήθηκε στο τελικό δείκτη CVI, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμη η τρωτότητα που αποδίδεται από κάθε παράγοντα. Η επιλογή του θεματικού πεδίου γίνεται από το σχετικό dropdown menu, και η αλλαγή ενεργοποιεί τη συνάρτηση `updateLayerStyle(attribute)` που ενημερώνει δυναμικά τα χρώματα του επιλεγμένου layer με βάση το νέο πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να εστιάσει σε συγκεκριμένες συνιστώσες του δείκτη τρωτότητας και να αναλύσει ξεχωριστά τη συμβολή κάθε παράγοντα στον συνολικό κίνδυνο, αποκτώντας μια πιο λεπτομερή εικόνα της χωρικής κατανομής της τρωτότητας.

Το παρακάτω απόσπασμα δείχνει την εντολή `setPaintProperty` της Mapbox GL JS η οποία χρησιμοποιείται για την αλλαγή της απεικόνισης ανάλογα με το πεδίο (`attribute`) του κάθε επιπέδου.

```
map.setPaintProperty('coastline-layer', 'line-color', [  
  'interpolate', ['linear'], ['get', attribute],  
  ...colorStops.flat()  
]);
```

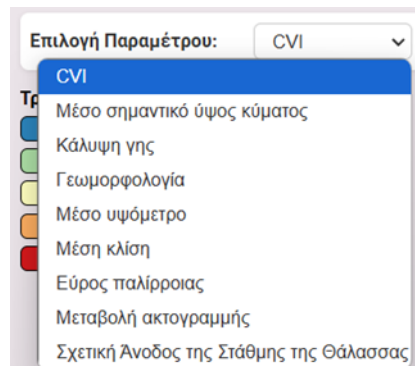
### 6.3.3.3 Αναδυόμενα παράθυρα (popup)

Για τη βελτίωση της διαδραστικότητας της εφαρμογής, προστέθηκαν αναδυόμενα παράθυρα (popups) που εμφανίζουν αναλυτικές πληροφορίες για τα στοιχεία του χάρτη τα οποία επιλέγει με κλικ ο χρήστης. Ανάλογα με το θεματικό επίπεδο το παράθυρο εμφανίζει διαφορετικά πεδία. Για παράδειγμα, layers στα οποία υπολογίστηκε ο δείκτης CVI, εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων, ενώ για τους οικισμούς εμφανίζονται τα στοιχεία του πληθυσμού και της ονομασίας τους.

Στο παρακάτω απόσπασμα φαίνεται πως υλοποιείται η εμφάνιση των αναδυόμενων παραθύρων, όπου η συνάρτηση `map.on('click', function(e) { ... })` εκτελείται κάθε φορά που ο

χρήστης κάνει κλικ στον χάρτη. Επίσης, η `new mapboxgl.Popup()` δημιουργεί ένα νέο αντικείμενο popup.

```
map.on('click', function(e) {  
    const features = map.queryRenderedFeatures(e.point, { layers: ['my-layer']  
});  
    if (!features.length) return;  
    const feature = features[0];  
    new mapboxgl.Popup()  
        .setLngLat(e.lngLat)  
        .setHTML(  
            `Γεωλογία:</strong> ${feature.properties.Geology}<br>  
            <strong>CVI:</strong> ${feature.properties.CVI_Score}`  
        )  
        .addTo(map);  
});
```



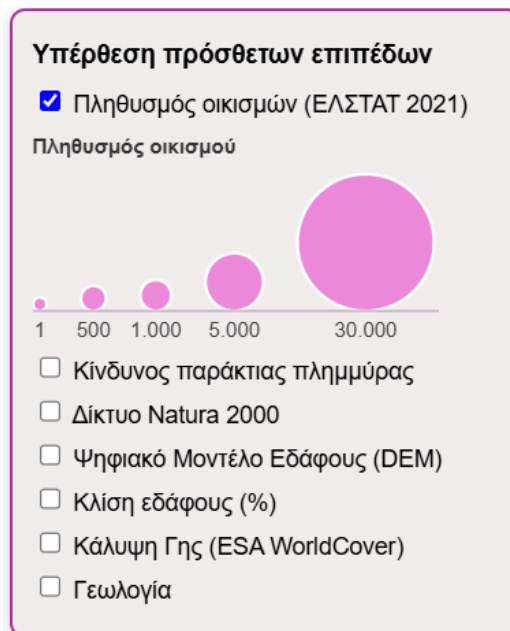
Σχήμα 44. Τα διαθέσιμα πεδία με τις παραμέτρους και τον τελικό δείκτη CVI που μπορεί να εναλλάσσει ο χρήστης.

#### 6.3.3.4 Πρόσθετα επίπεδα με υπέρθεση

Εκτός από τα βασικά θεματικά επίπεδα που απεικονίζουν τις τιμές του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI), προστέθηκαν μερικά επιπλέον επίπεδα υπέρθεσης με στόχο τον εμπλουτισμό της ανάλυσης και την υποβοήθηση στην εξαγωγή πιο στοχευμένων συμπερασμάτων. Τα επιπλέον αυτά επίπεδα περιλαμβάνουν: α) τις θέσεις των οικισμών με τον μόνιμο πληθυσμό τους σύμφωνα με τα δεδομένα της απογραφής 2021 της ΕΛΣΤΑΤ, β) τα όρια των προστατευόμενων περιοχών του δικτύου Natura 2000 και γ) τις ζώνες κινδύνου παράκτιας πλημμύρας, όπως προκύπτουν από τη διαδικτυακή εφαρμογή Coastal Hazard Wheel. Με την υπέρθεση των συγκεκριμένων επιπέδων πάνω από τα δεδομένα του δείκτη CVI, είναι δυνατή η ταυτόχρονη απεικόνιση τόσο της τρωτότητας όσο και άλλων σημαντικών

χωρικών παραγόντων, όπως είναι ο πληθυσμός, οι προστατευόμενες περιοχές ή ο δυνητικός κίνδυνος πλημμύρας. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων του δείκτη με κρίσιμα κοινωνικά, περιβαλλοντικά και φυσικά δεδομένα, βοηθώντας έτσι, στην κατανόηση και ανάδειξη ιδιαίτερα ευάλωτων περιοχών όπου κρίνεται σημαντική η λήψη μέτρων προστασίας. Επίσης, προστέθηκαν τα επίπεδα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, των κλίσεων, των καλύψεων γης και της γεωλογίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό ορισμένων παραμέτρων του δείκτη.

Τα συγκεκριμένα επίπεδα προστέθηκαν στην εφαρμογή με την ίδια μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και για τα θεματικά επίπεδα του CVI, δηλαδή μέσω της μεταφόρτωσής τους ως `tilesets` στην πλατφόρμα του `Mapbox` και της προσθήκης τους στο χάρτη με χρήση της εντολής `addLayer`. Η προβολή τους εντός του χάρτη γίνεται με κατάλληλα `checkboxes`, ενώ η υπέρθεση των δεδομένων πραγματοποιείται προγραμματιστικά με χρήση της εντολής `setLayoutProperty` ώστε να εμφανίζονται ή να αποκρύπτονται δυναμικά, ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη.



Σχήμα 45. Παράθυρο με τα πρόσθετα επίπεδα υπέρθεσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της ακτίνας κάθε κύκλου που απεικονίζει τον πληθυσμό κάθε οικισμού έγινε με τη βοήθεια της διόρθωσης Flannery, με σκοπό τη βελτίωση της οπτικής αντίληψης των διαβαθμίσεων του πληθυσμού στο χάρτη (Στάμου, 2024). Ο τύπος που δίνει την ακτίνα κάθε μεγέθους οικισμού είναι ο εξής:

$$R_i = R_{min} \frac{Pop_i}{Pop_{min}}^{0.57},$$

Όπου,  $R_i$  είναι η ακτίνα του κύκλου του συγκεκριμένου οικισμού,  $R_{min}$  η επιλογή της μικρότερης ακτίνας,  $Pop_i$  ο πληθυσμός του συγκεκριμένου οικισμού και  $Pop_{min}$  ο πληθυσμός του μικρότερου οικισμού.

### 6.3.3.5 Φίλτρα

Επιπλέον, υποστηρίζεται η δυνατότητα για εφαρμογή φίλτρων στα αποτελέσματα του δείκτη CVI με βάση τρεις κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης μπορεί να φιλτράρει τα δεδομένα

ως προς: 1) την πυκνότητα πληθυσμού, αξιοποιώντας τα δεδομένα που παρέχονται από το Global Human Settlement Layer (GHSL), το οποίο καταγράφει τη χωρική κατανομή του πληθυσμού σε επίπεδο κελιού raster, 2) το αν μία περιοχή βρίσκεται εντός των ορίων των ζωνών Natura 2000 και 3) το αν μία περιοχή χαρακτηρίζεται από μέτριο ή υψηλό κίνδυνο παράκτιας πλημμύρας. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα εστίασης αποκλειστικά σε περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα ή σε περιοχές εντός του δικτύου Natura 2000 ή και έχουν μέτριο/υψηλό κίνδυνο παράκτιας πλημμύρας, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό.

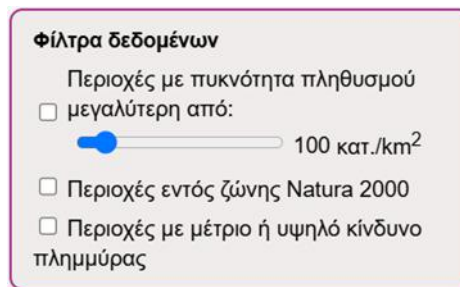
Τα φίλτρα αυτά εφαρμόζονται απευθείας στα θεματικά επίπεδα του CVI, αξιοποιώντας τις λειτουργίες της βιβλιοθήκης Mapbox GL JS, όπως η εντολή `setFilter`, η οποία επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της απεικόνισης των χωρικών δεδομένων ανάλογα με τα επιλεγμένα κριτήρια. Στο απόσπασμα που ακολουθεί φαίνεται η υλοποίηση των φίλτρων στην JavaScript μέσω των μεταβλητών `filter1`, `filter2`, `filter3` που ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τα φίλτρα. Επίσης, για κάθε ένα φίλτρο εφαρμόζεται μία συνθήκη (`conditions`), που ελέγχει δηλαδή ποια δεδομένα πληρούν αυτή την προϋπόθεση. Η `minPop` δηλώνει το κατώφλι της πυκνότητας πληθυσμού που έχει επιλέξει ο χρήστης να προβάλει.

```
function applyFiltersToActiveLayer() {  
  // Ενεργοποίηση από τον χρήστη  
  
  const filter1 = document.getElementById('filter-1').checked;  
  const filter2 = document.getElementById('filter-2').checked;  
  const filter3 = document.getElementById('filter-3').checked;  
  
  const minPop = parseInt(document.getElementById('pop-filter-val').value,  
10) || 0;  
  
  // Σύνθεση των συνθηκών φιλτραρίσματος  
  
  const conditions = [];  
  
  if (filter1) conditions.push(['>', ['to-number', ['get', 'Density']],  
minPop]);  
  
  if (filter2) conditions.push(['==', ['to-number', ['get', 'Natura']], 1]);  
  
  if (filter3) conditions.push(['>=', ['to-number', ['get', 'Flooding']],  
2]);  
  
  // Εφαρμογή των φίλτρων στο ενεργό θεματικό επίπεδο  
  
  const activeLayer = activeLayerIndex === 1 ? 'coastline-layer'  
    : activeLayerIndex === 2 ? 'second-layer'  
    : 'my-layer';  
  
  ['coastline-layer', 'second-layer', 'my-layer'].forEach(layer => {
```

```

    if (map.getLayer(layer)) {
        map.setFilter(layer, layer === activeLayer && conditions.length ?
['all', ...conditions] : null);
    }
});
}

```



Σχήμα 46. Το παράθυρο με τα φίλτρα του χάρτη.

### 6.3.3.6 Αναζήτηση περιοχής

Η εφαρμογή διαθέτει επιπλέον τη λειτουργία αναζήτησης περιοχής, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να πληκτρολογήσει το όνομα της περιοχής που τον ενδιαφέρει και ο χάρτης εστιάζει αυτόματα στην αντίστοιχη περιοχή. Έχει προστεθεί και ένα φίλτρο ώστε η εστίαση να πραγματοποιείται μόνο για την περιοχή της Λέσβου και να αγνοούνται τυχόν άλλες τοποθεσίες εκτός του νησιού. Η λειτουργία αυτή εκτελείται μέσω του Mapbox Geocoding API το οποίο καλείται μέσω του παρακάτω συνδέσμου :

```

const apiURL =
`https://api.mapbox.com/geocoding/v5/mapbox.places/${encodeURIComponent(searchText)}.json`

```

Μέσω της εντολής αυτής, αποστέλλεται αίτημα στο διαδικτυακό API της Mapbox, το οποίο επιστρέφει τις γεωγραφικές συντεταγμένες για την περιοχή αναζήτησης.

### 6.3.3.7 Επιπρόσθετες Λειτουργίες/Χαρακτηριστικά της εφαρμογής

Εκτός από τις βασικές δυνατότητες της θεματικής απεικόνισης που περιεγράφηκαν παραπάνω, η διαδικτυακή εφαρμογή περιλαμβάνει και μια σειρά από πρόσθετες λειτουργίες που ενισχύουν τη διαδραστικότητα και κάνουν την εφαρμογή φιλικότερη προς το χρήστη. Πιο συγκεκριμένα περιέχονται:

- *Ρύθμιση ορατότητας (opacity):*

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει την ορατότητα (ως ποσοστό επί τις %) των θεματικών επιπέδων μέσω ενός ειδικού slider, ώστε να διευκολύνεται η παρατήρηση των υποβάθρων (όπως οι δορυφορικές εικόνες ή το ανάγλυφο του εδάφους) κάτω από τα θεματικά

επίπεδα του δείκτη. Η ρύθμιση αυτή υλοποιείται μέσω της εντολής `setPaintProperty` της βιβλιοθήκης της Mapbox GL JS, η οποία επιτρέπει την δυναμική εναλλαγή της ορατότητας. Για παράδειγμα:

```
map.setPaintProperty('coastline-layer', 'line-opacity', 0.6);
```

- *Εργαλεία Πλοήγησης (Zoom, επαναφορά βορρά, επαναφορά προβολής):*

Επίσης, έχουν ενσωματωθεί διάφορα εργαλεία με σκοπό τη βελτίωση της πλοήγησης του χρήστη μέσα στην εφαρμογή. Δίνεται η δυνατότητα εστίασης (zoom in/zoom out), περιστροφής προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και επαναφορά του προσανατολισμού του χάρτη με τον βορρά προς το πάνω μέρος της οθόνης. Υπάρχει και η επιλογή για επανεστίαση στην αρχική προβολή, δηλαδή στην επαναφορά του χάρτη στο επίπεδο μεγέθυνσης και προβολής όλης της Λέσβου. Η υλοποίηση των παραπάνω εργαλείων γίνεται μέσω των συναρτήσεων `map.zoomIn()`, `map.zoomOut()`, `map.flyTo({...})` όπως φαίνεται και στο παράδειγμα που ακολουθεί:

```
// Zoom in
```

```
document.getElementById('zoom-in').onclick = () => map.zoomIn();
```

```
// Zoom out
```

```
document.getElementById('zoom-out').onclick = () => map.zoomOut();
```

```
// Επαναφορά βορρά
```

```
document.getElementById('resetNorthButton').onclick = () => map.flyTo({  
bearing: 0, pitch: 0 });
```

```
// Reset προβολής στη Λέσβο
```

```
document.getElementById('reset-map-view').onclick = () => map.flyTo({  
center: [26.25, 39.18], zoom: 9.3 });
```

- *Γραφική κλίμακα*

Στο κάτω μέρος της εφαρμογής έχει προστεθεί μια λιτή γραφική κλίμακα που βοηθά τον χρήστη να αντιλαμβάνεται τα πραγματικά μεγέθη και τις αποστάσεις. Η εντολή που προσθέτει τη γραφική κλίμακα στον χάρτη Mapbox GL JS είναι η εξής:

```
map.addControl(new mapboxgl.ScaleControl({  
  
  maxWidth: 100,  
  
  unit: 'metric'  
}), 'bottom-right');
```

- *Διαγράμματα Χωρικής Κατανομής:*

Για κάθε θεματικό πεδίο που επιλέγεται για απεικόνιση, προβάλλεται αυτόματα και το αντίστοιχο διάγραμμα της χωρικής κατανομής της τρωτότητας. Για την αυτόματη εναλλαγή των διαγραμμάτων έχει δημιουργηθεί η συνάρτηση `updatePieChart` η οποία ελέγχει ποιο layer και ποιο πεδίο απεικονίζεται κάθε φορά ώστε να εμφανιστεί το σωστό διάγραμμα που έχει δημιουργηθεί τοπικά και βρίσκεται αποθηκευμένο σε μορφή εικόνας png.

- *Κουμπί Πληροφοριών (Info):*

Τέλος, έχει προστεθεί η δυνατότητα να μπορεί ο χρήστης να δει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή και τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη.

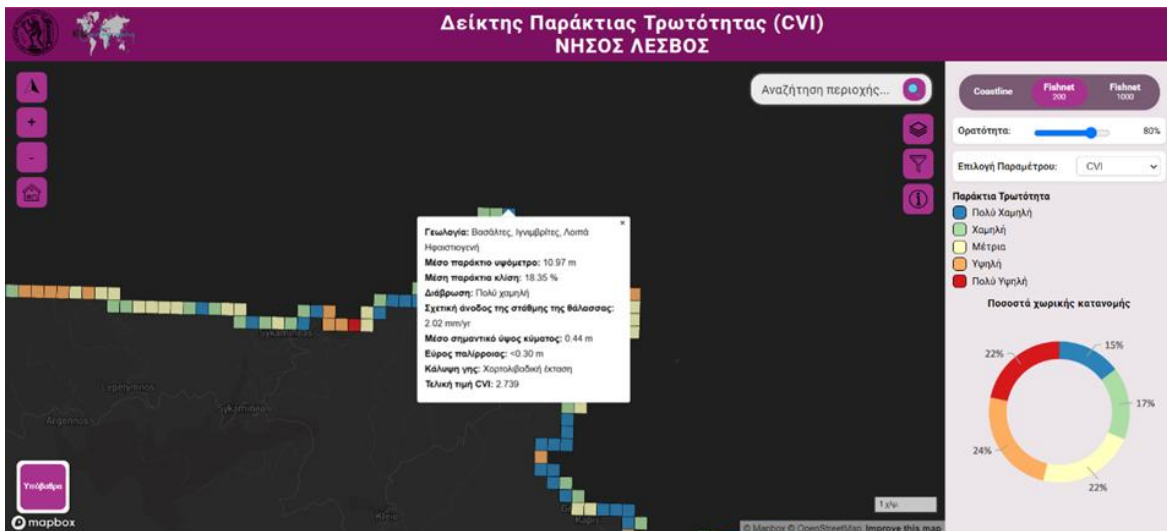
## 6.4 Παρουσίαση τελικής εφαρμογής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τελική μορφή της διαδικτυακής εφαρμογής που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η εφαρμογή συνδυάζει όλες τις λειτουργίες και δυνατότητες που περιγράφηκαν παραπάνω, προσφέροντας στο χρήστη ένα ολοκληρωμένο διαδραστικό περιβάλλον για την ανάλυση και αξιολόγηση της παράκτιας τρωτότητας της Λέσβου. Στον παρακάτω σύνδεσμο του Εργαστηρίου Χαρτογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής, είναι διαθέσιμη η διαδικτυακή εφαρμογή που υλοποιήθηκε: [http://carto.survey.ntua.gr/theses/CVI\\_MAP/CVI\\_MAP.html](http://carto.survey.ntua.gr/theses/CVI_MAP/CVI_MAP.html)

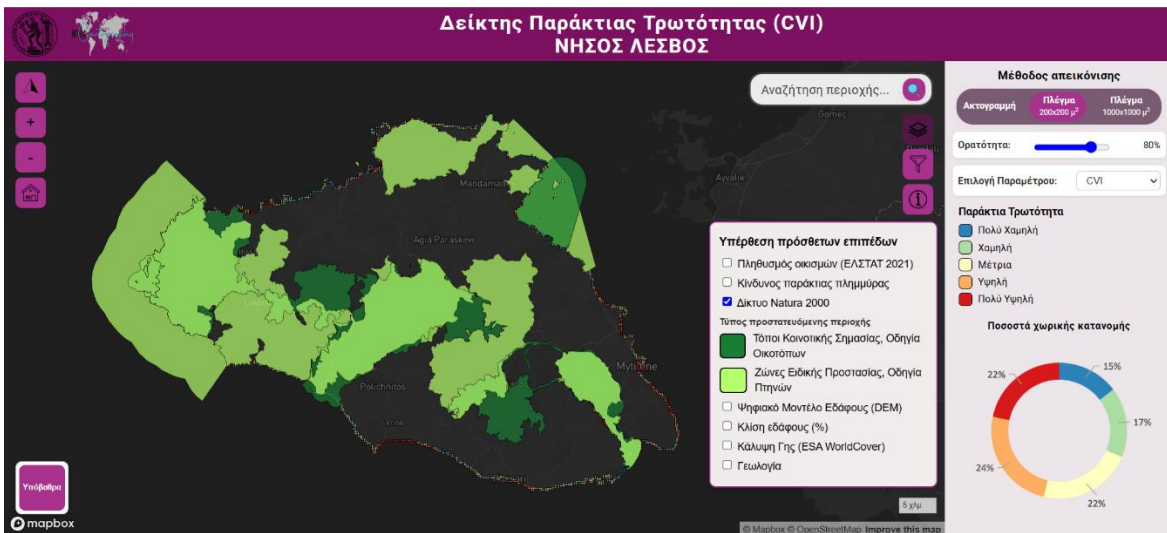
Στο σχήμα 47 παρουσιάζεται η κεντρική οθόνη της εφαρμογής, όπου απεικονίζεται ο δείκτης CVI από το επίπεδο της ακτογραμμής. Ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί στον χάρτη, να αλλάξει επίπεδο προβολής του δείκτη CVI, να ανοίξει το αναδυόμενο παράθυρο (popup) κάποιας περιοχής που τον ενδιαφέρει (βλ. Σχήμα 48), να ενεργοποιήσει πρόσθετα θεματικά επίπεδα (βλ. Σχήμα 49), να εφαρμόσει φίλτρα (βλ. Σχήμα 50) και να πλοηγηθεί χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που διαθέτει.



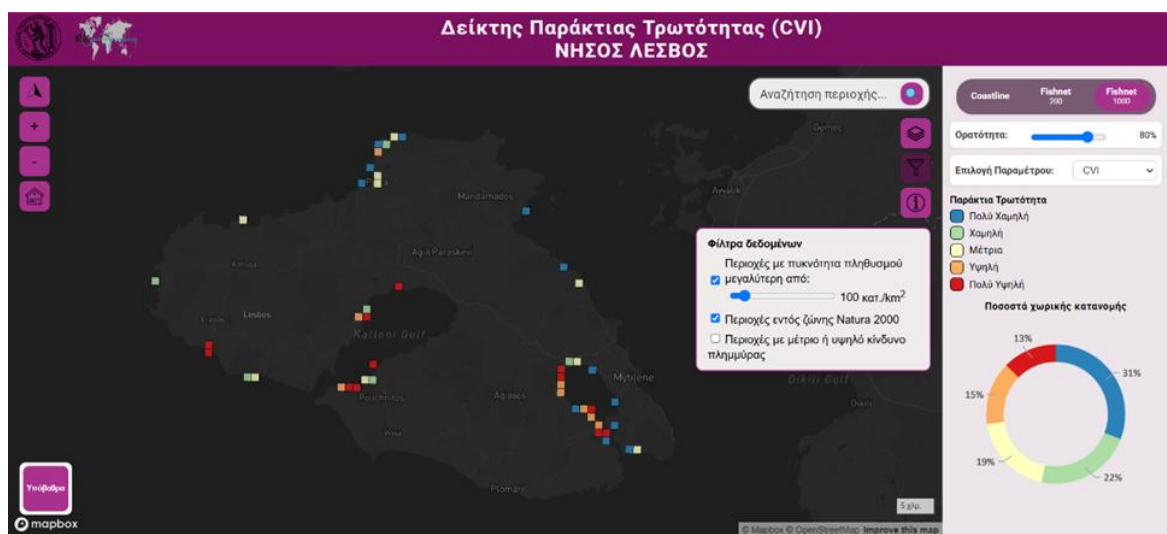
Σχήμα 47. Η κεντρική οθόνη της διαδικτυακής εφαρμογής που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 48. Η κεντρική οθόνη της διαδικτυακής εφαρμογής που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 49. Απόσπασμα της εφαρμογής, όπου απεικονίζεται ο δείκτης CVI με υπέρθεση των περιοχών Natura 2000.



Σχήμα 50. Απόσπασμα από την εφαρμογή όπου έχουν εφαρμοστεί τα φίλτρα για τις περιοχές με πυκνότητα πληθυσμού μεγαλύτερη από 100 κατ./km<sup>2</sup> και ταυτόχρονα βρίσκονται εντός του δικτύου Natura 2000.

Συνολικά, η τελική εφαρμογή ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που τέθηκαν, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την πολυεπίπεδη αξιολόγηση της παράκτιας τρωτότητας στη Λέσβο, με πλούσια διαδραστικότητα και δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες διαφορετικών χρηστών. Η πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι φιλική και κατανοητή προς τον χρήστη χωρίς να γίνεται πολύπλοκη και δυσνόητη χωρίς πολλές περιττές εντολές που μπορεί να δυσκολέψουν την πλοήγηση.

## Κεφάλαιο 7. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τον τρόπο και τη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI) όσο και από τη δημιουργία της διαδικτυακής χαρτογραφικής εφαρμογής. Τα συμπεράσματα χωρίζονται στην αξιολόγηση του αποτελέσματος και στην παρουσίαση προτάσεων για μελλοντικές βελτιώσεις του υπολογισμού της παράκτιας τρωτότητας και της απεικόνισης του φαινομένου μέσω της εφαρμογής.

### 7.1 Αξιολόγηση διαδικασίας - αποτελεσμάτων του Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας (CVI)

Όπως έχει αναλυθεί και στο σχετικό κεφάλαιο, στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό του δείκτη παράκτιας τρωτότητας (CVI), κάτι που επέτρεψε την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά του δείκτη σε διαφορετικές κλίμακες και τρόπους ανάλυσης. Οι μεθοδολογίες διέφεραν τόσο ως προς το μέγεθος των χωρικών μονάδων που εξετάστηκαν (πλέγματα 1000μ.χ1000μ., πλέγματα 200x200 μέτρων), όσο και ως προς τον τρόπο αποτύπωσης της παράκτιας ζώνης, με τη χρήση διατομών (transects) κάθετα στην ακτογραμμή.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν δύο σημαντικές διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους του υψομέτρου και της κάλυψης γης. Καθώς η ταξινόμηση των παραμέτρων έγινε ακριβώς στην ίδια κλίμακα και με τα ίδια όρια τιμών για όλες τις μεθοδολογίες, διαπιστώθηκε ότι στα πλέγματα των 1000μ.χ1000μ. τα μέσα υψόμετρα ήταν υψηλότερα συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθοδολογίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο προχωρούσε η ανάλυση πιο εσωτερικά της στεριάς τόσο πιο μεγάλα υψόμετρα συναντούσε. Έτσι, τα αποτελέσματα της τρωτότητας για τα πλέγματα των 200x200 μέτρων, τα οποία εστιάζουν περισσότερο στην ακτογραμμή, εμφάνιζαν υψηλότερες τιμές τρωτότητας λόγω της χαμηλότερης μέσης τιμής υψομέτρου.

Αναφορικά με την παράμετρο της κάλυψης γης, προέκυψε ότι η ανάλυση σε μεγαλύτερες χωρικές μονάδες (πλέγματα 1000μ.χ1000μ.) οδηγούσε σε απώλεια πληροφορίας, καθώς οι κατηγορίες κάλυψης με μικρή έκταση (όπως οι δομημένες περιοχές ή ο αστικός χώρος) δεν αναδεικνύονται ως η επικρατούσα κάλυψη γης. Αντίθετα, με τη χρήση μικρότερων πλεγμάτων (200μ.χ200μ.) ή διατομών (transects), διατηρήθηκαν οι λεπτομέρειες και αναδείχθηκαν τοπικές διαφοροποιήσεις, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές τρωτότητας σε αυτές τις περιοχές.

Οι χρήσιμες διαφορετικών μεθοδολογιών έδωσε τη δυνατότητα για οπτικοποίηση του φαινομένου τόσο σε μικρή κλίμακα (ολόκληρη η Λέσβος), όσο και σε μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή σε τοπικό επίπεδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν χαμηλή χωρική ανάλυση κάτι που περιόρισε εν μέρη τη δυνατότητα για ακόμη πιο λεπτομερή ανάλυση και ακριβέστερα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά η μελέτη ανέδειξε διάφορες περιοχές με υψηλή ή πολύ υψηλή τρωτότητα, κάτι που επιβεβαιώθηκε και στις τρεις μεθοδολογικές προσεγγίσεις και ενισχύει την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος δείκτης CVI που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη βασίζεται στην ισοβαρή συμμετοχή όλων των παραμέτρων, κάτι που στην πραγματικότητα

δεν αντανακλά πλήρως τη σχετική βαρύτητα κάθε μεταβλητής, καθώς ορισμένες παράμετροι παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην τρωτότητα από άλλες. Όμως, λόγω των περιορισμών της παρούσας μελέτης, δεν ήταν δυνατή η περαιτέρω εμβάθυνση, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης ή η εκχώρηση βαρών σε κάθε παράμετρο ή η χρήση επιπλέον παραμέτρων. Παρά τους περιορισμούς αυτούς η συγκεκριμένη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε αποτελεί μία ευρέως αποδεκτή προσέγγιση που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές παρόμοιες μελέτες. Παρέχει μία καλή πρώτη αποτύπωση της τρωτότητας των ακτών της Λέσβου, ενώ παράλληλα αναδεικνύει τις δυνατότητες και τα περιθώρια για περαιτέρω βελτιώσεις οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω εκτενέστερα.

## 7.2 Αξιολόγηση Διαδικτυακής Εφαρμογής

Η ανάπτυξη της διαδικτυακής διαδραστικής εφαρμογής αποτελεί σημαντικό βήμα για τη διάχυση και την κατανόηση του πολύπλοκου φαινομένου της παράκτιας τρωτότητας και την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της από τους χρήστες. Μέσω της εφαρμογής, οι χρήστες μπορούν να εξετάσουν αναλυτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα, να συγκρίνουν τα αποτελέσματα με επιπλέον δεδομένα και να αντλήσουν συνολικά συμπεράσματα για την υπό μελέτη περιοχή. Παράλληλα, η διαδραστικότητα που προσφέρει, βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου τόσο συνολικά για τη Λέσβο όσο και σε τοπικό επίπεδο.

Η διαδραστικότητα που προσφέρει συμβάλλει στην ουσιαστική κατανόηση του φαινομένου, τόσο συνολικά για τη Λέσβο όσο και σε τοπικό επίπεδο, ενισχύοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων για την περιοχή μελέτης.

Συνολικά, η διαδικτυακή εφαρμογή συμβάλλει στο ζήτημα της αξιολόγησης και της διαχείρισης της παράκτιας τρωτότητας. Ωστόσο, υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης τόσο στη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη όσο και στη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες της εφαρμογής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και τη χρηστικότητα του συστήματος στο μέλλον.

## 7.3 Προτάσεις βελτίωσης

### 7.3.1 Προτάσεις βελτίωσης της μεθοδολογίας υπολογισμού της Παράκτιας Τρωτότητας

Για τη βελτίωση της εκτίμησης της παράκτιας τρωτότητας, προτείνεται η αξιοποίηση δεδομένων με μεγαλύτερη χωρική ανάλυση ίσως και με τη χρήση εμπορικών δεδομένων, ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών. Επιπλέον, η χρήση περισσότερων παραμέτρων στον υπολογισμό του δείκτη, καθώς και η απόδοση διαφορετικών βαρών σε κάθε μεταβλητή (π.χ. με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης), θα συνέβαλε στην αξιοπιστία και στην πιο ουσιαστική αποτύπωση του φαινομένου. Για τα τελικά αποτελέσματα του δείκτη θα βοηθούσε η χρήση κάποιας άλλης μαθηματικής εξίσωσης που παράγει κανονικοποιημένες τιμές σε συγκεκριμένη κλίμακα, αντί τη χρήση τεχνικών όπως τα quantiles ή τα natural breaks που επηρεάζουν την τελική εικόνα των αποτελεσμάτων. Έτσι θα ήταν δυνατή η απευθείας ταξινόμηση των τελικών τιμών του δείκτη σε προκαθορισμένα εύρη τιμών.

Επιπλέον, προτείνεται ο υπολογισμός της παράκτιας τρωτότητας σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες ώστε να μπορεί να αποτυπώνεται η εξέλιξη της τρωτότητας στον χρόνο. Η ενσωμάτωση ιστορικών δεδομένων αλλά και προβλέψεων βάσει κλιματικών μοντέλων (όπως το CMIP5) με διαφορετικά σενάρια για παραμέτρους όπως το ύψος κύματος ή οι παλίρροιες, μπορεί να επιτρέψει την εκτίμηση της μελλοντικής τρωτότητας και να ενισχύσει τον στρατηγικό σχεδιασμό.

Τέλος, αξίζει να εξεταστεί και η εφαρμογή προηγμένων μεθόδων εκτίμησης της παράκτιας τρωτότητας με τεχνικές μηχανικής μάθησης βασισμένη σε ιστορικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα η πρόσφατη μελέτη της Γεωλογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (Harke et al., 2022). Τέλος, η πραγματοποίηση της ανάλυσης σε ακόμη πιο υψηλή χωρική ανάλυση, είτε με τη χρήση περισσότερων διατομών είτε μέσω πυκνού πλέγματος εντός της στεριάς που θα έδινε την εικόνα της τρωτότητας επιφανειακά σε οποιαδήποτε απόσταση από την ακτή, θα παρείχε υψηλότερη ακρίβεια και λεπτομέρεια συμβάλλοντας στη βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και στη λήψη ορθών αποφάσεων για τη διαχείριση της παράκτιας ζώνης.

### 7.3.2 Προτάσεις βελτίωσης της Διαδικτυακής Εφαρμογής

Αναφορικά με την εφαρμογή, μια βασική προσθήκη που θα βοηθούσε στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου θα ήταν η ενσωμάτωση των αρχικών χωρικών δεδομένων, ώστε να μπορεί ο χρήστης απευθείας να τα συγκρίνει με τα επίπεδα που αφορούν τον δείκτη (CVI). Παράλληλα, η δυνατότητα προβολής πρόσθετων θεματικών επιπέδων όπως ιστορικές μεταβολές ακτογραμμής ή μελλοντικά σενάρια κινδύνου, θα μπορούσαν να εμπλουτίσουν σημαντικά την εφαρμογή. Εξίσου σημαντική θα ήταν και η ενσωμάτωση εργαλείων ανάλυσης, όπως η εξαγωγή στατιστικών στοιχείων, η μέτρηση αποστάσεων και εκτάσεων, καθώς και η δυνατότητα εξαγωγής των ίδιων των δεδομένων από τον χρήστη, δίνοντας έτσι δυνατότητες χρήσης και επεξεργασίας των πληροφοριών που προσφέρει η εφαρμογή.

Επίσης, η δυνατότητα χαρτογραφικής γενίκευσης των δεδομένων σε μικρές κλίμακες εστίασης του χάρτη θα βοηθούσε στην καλύτερη και πιο ευκρινή απεικόνιση χωρικών φαινομένων, κάτι που όμως στην παρούσα φάση δεν ήταν δυνατό να συμβεί εξαιτίας των περιορισμών της πλατφόρμας του Mapbox. Το Mapbox από μόνο του πραγματοποιεί μία αυτόματη μικρή γενίκευση στα δεδομένα που όμως δεν βελτιώνει κατά πολύ την εικόνα των εικονιζόμενων δεδομένων ειδικά του πολύπλοκου επιπέδου της ακτογραμμής. Επιπλέον, η δυνατότητα χρήσης της εφαρμογής και από κινητές συσκευές θα την καθιστούσε πιο προσβάσιμη από μεγαλύτερο κοινό. Η προσθήκη ενός οδηγού χρήσης θα διευκόλυνε περαιτέρω την κατανόηση τόσο του φαινομένου όσο και του τρόπου υπολογισμού του δείκτη τρωτότητας. Τέλος, μία σημαντική αναβάθμιση θα ήταν η δυνατότητα αυτόματης ενημέρωσης και επικαιροποίησης των δεδομένων, όπου αυτό είναι εφικτό, και έτσι θα διασφαλιζόταν η μακροχρόνια αξιοπιστία και λειτουργία της εφαρμογής.

## 8. Βιβλιογραφία

Antonoli, F., De Falco, G., Lo Presti, V., Moretti, L., Scardino, G., Anzidei, M., Bonaldo, D., Carniel, S., Leoni, G., Furlani, S., Marsico, A., Petitta, M., Randazzo, G., Scicchitano, G., & Mastronuzzi, G. (2020). Relative Sea-Level Rise and Potential Submersion Risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea.

Bird, E. (2008). Coastal Geomorphology: An Introduction (2nd ed.). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Boye, C., Addo, K. A., Wiafe, G., & Dzigbodi-Adjimah, K. N. (2018). Spatio-temporal analyses of shoreline change in the Western Region of Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 22(2), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0607-z>

Brewer, C. A., & Harrower, M. (2023). ColorBrewer 2.0 [Online]. Διαθέσιμο στο: <https://colorbrewer2.org/#type=diverging&scheme=Spectral&n=5>

Brewer, C. A., & Pickle, L. (2002). Evaluation of Methods for Classifying Epidemiological Data on Choropleth Maps in Series. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(4), 662-681.

Coastal Hazard Wheel. (2025). Coastal Hazard Wheel App [Web application & dataset]. Ανακτήθηκε στις 17 Ιουνίου 2025, από: <https://chw-app.coastalhazardwheel.org/>

Copernicus Marine Service. (2024). GLORYS12V1 – Global Ocean Reanalysis Physics [Dataset]. Ανακτήθηκε στις 18 Απριλίου 2025, από: [https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_001\\_030/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description)

Cruz-Ramírez, C. J., Chávez, V., Silva, R., Muñoz-Perez, J. J., & Rivera-Arriaga, E. (2024). Coastal Management: A Review of Key Elements for Vulnerability Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 386. <https://doi.org/10.3390/jmse12030386>

data.europa.eu (n.d.). Data Visualisation Guide: Choropleth Maps. Διαθέσιμο στο: <https://data.europa.eu/apps/data-visualisation-guide/choropleth-maps>

Dorman, M. (2020). Introduction to web mapping. CRC Press. Διαθέσιμο στο: <https://geobgu.xyz/web-mapping/>

Dronkers, J. et al. (1990). Strategies for Adaptation to Sea Level Rise. Report of the IPCC Coastal Zone Management Subgroup. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Elmer, M. E. (2013). Symbol considerations for bivariate thematic maps. Proceedings of 26th International Cartographic Conference.

European Environment Agency (EEA). Natura 2000 Protected Areas [Σύνολο δεδομένων]. Ανακτήθηκε στις 02/06/2025, από: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/6fc8ad2d-195d-40f4-bdec-576e7d1268e4>

European Ground Motion Service. (2023). [Dataset]. European Environment Agency. Ανακτήθηκε στις 18 Απριλίου 2025, από: <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/api/records/9abe5dd1-3639-4aeb-a8de-ec2eb2f7fc93?language=all>

European Space Agency (ESA). (2021). WorldCover 10m 2021 v100. [Dataset]. Ανακτήθηκε στις 02 Απριλίου 2025, από: <https://worldcover2021.esa.int/>

Gaffuri, J. (2012). Toward Web Mapping with Vector Data. In N. Xiao et al. (Eds.), *Geographic Information Science: Proceedings of the 7th International Conference on GIScience* (pp. 87–101). *Lecture Notes in Computer Science*, vol 7478. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33024-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33024-7_7)

Gill, J., Anwar, A. M., & Omar, K. S. (2014). Towards the implementation of continuous coastal vulnerability index in Malaysia: A review. *Jurnal Teknologi*, 71(4), 1–10. <https://doi.org/10.11113/jt.v71.3819>

Gornitz, V., White, T. W., & Cushman, R. M. (1991). Vulnerability of the U.S. to future sea level rise (NASA Technical Memorandum 103884). NASA Goddard Institute for Space Studies. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920011078>

Hapke, C., Himmelstoss, E., Kratzmann, M., Farris, A., & Thieler, E. (2022). Development and application of a coastal change likelihood assessment for the Northeastern United States. U.S. Geological Survey Data Report 1169, 54 p. <https://pubs.usgs.gov/dr/1169/dr1169.pdf>

Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Geneva: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2011). *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change (Technical Paper 1/2011)*. [https://dorsu.edu.ph/faculty/jscabrera/wp-content/uploads/2022/11/TP\\_1-2011.pdf](https://dorsu.edu.ph/faculty/jscabrera/wp-content/uploads/2022/11/TP_1-2011.pdf)

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

Köbben, B. (2001). “Publishing maps on the web”. In Kraak, M.-J. & Brown, A. (eds.) *Web Cartography. Developments and Prospects* (pp. 73-86). London: Taylor & Francis.

Kraak, M.-J., & Brown, A. (Eds.) (2001). *Web Cartography: Developments and Prospects*. London: Taylor & Francis.

Kraak, M.-J., Roth, R. E., Ricker, B., Kagawa, A., & Le Sourd, G. (Eds.). (2020). *Mapping for a sustainable world*. United Nations.

Kratzer, T. B., Bandi, P., Freedman, N. D., Smith, R. A., Travis, W. D., Jemal, A., & Siegel, R. L. (2024). Lung cancer statistics, 2023. *Cancer*. <https://doi.org/10.1002/cncr.35128>

Mapbox. (2025). What is Mapbox Studio? Διαθέσιμο στο: <https://docs.mapbox.com/studio-manual/guides/>

Mapbox Tippecanoe. (2025). A command-line tool for building vector tilesets from large collections of GeoJSON features. Διαθέσιμο στο: <https://github.com/mapbox/tippecanoe>

Mortality data: National Center for Health Statistics, 2022; Smoking prevalence data: Centers for Disease Control and Prevention, 2023. (Αναφορά συνοδευτική της πηγής Kratzer et al., 2024.)

Narayan, S. et al. (2017). The value of coastal wetlands for flood damage reduction in the northeastern USA. *Scientific Reports*, 7, 9463. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09269-z>

Netek, R., Masopust, J., Pavlicek, F., & Pechanec, V. (2020). Performance Testing on Vector vs. Raster Map Tiles—Comparative Study on Load Metrics. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 101. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020101>

Neumann, A. (2012). Web Mapping and Web Cartography. In W. Kresse & D. M. Danko (Eds.), *Springer Handbook of Geographic Information* (pp. 273–287). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72680-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72680-7_14)

Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18-43.

Nicholls, R. J. (2011). Sea-Level Scenarios for Impact and Adaptation Assessment for Coastal Areas, σελ. 3.

Nitzman, A. (2024). Hybrid Mapping – Choropleth and Graduated Symbols. Διαθέσιμο στο: <https://www.aaroads.com/blog/hybrid-mapping-choropleth-graduated-symbols/>

Office for National Statistics (ONS). The environment. In *Compendium of UK Statistics*. Διαθέσιμο στο: <http://www.ons.gov.uk/ons/guide-method/compendiums/compendium-of-uk-statistics/the-environment/index.html>

Ormeling, F. (1995). Electronic atlases: classification and function. In D.R.F. Taylor (Ed.), *Visualization in modern cartography* (pp. 137–144). Oxford: Pergamon.

Pantusa, D., D'Alessandro, F., Frega, F., Francone, A., & Tomasicchio, G. R. (2022). Improvement of a coastal vulnerability index and its application along the Calabria Coastline, Italy. *Scientific Reports*, 12, Article 21959. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26374-w>

Pendleton, E. A., Barras, J. A., Williams, S. J., & Twichell, D. C. (2010). Coastal Vulnerability Assessment of the Northern Gulf of Mexico to Sea-Level Rise and Coastal Change (U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1146). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1146/>

Pendleton, E. A., Thieler, E. R., & Williams, S. J. (2004). Coastal Vulnerability Assessment of Channel Islands National Park (CHIS) to Sea-Level Rise. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1196.

QGIS Development Team. (2021). QGIS Geographic Information System (Version 3.16.11-Hannover) [Computer software]. Open Source Geospatial Foundation Project. Διαθέσιμο στο: <https://qgis.org>

Rangel-Buitrago, N., Neal, W. J., Bonetti, J., Anfuso, G., & de Jonge, V. N. (2020). Vulnerability assessments as a tool for the coastal and marine hazards management: An overview. *Ocean & Coastal Management*, 198, 105375.

Rizzo, A., Vandelli, V., Gauci, C., Buhagiar, G., Micallef, A. S., & Soldati, M. (2022). Potential Sea Level Rise Inundation in the Mediterranean: From Susceptibility Assessment to Risk Scenarios for Policy Action.

Roth, R. E. (2013). Interactive maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, 6, 59-115. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2013.6.105>

Roukounis, C. N., Tsoukala, V. K., & Tsihrintzis, V. A. (2023). An Index-Based Method to Assess the Resilience of Urban Areas to Coastal Flooding: The Case of Attica, Greece. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1776. <https://doi.org/10.3390/jmse11091776>

Roukounis, C. N., & Tsihrintzis, V. A. (2022). Indices of coastal vulnerability to climate change: a review. *Environmental Processes*, 9(29). <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00577-9>

Sack, C. (2017). Web Mapping. In J. P. Wilson (Ed.), *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* (4th Quarter 2017 Edition, Vol. 2017).

Sharma, P., Tomar, S.K., Goswami, P., Sangwan, V., & Singh, R. (2021). A comprehensive review on management of type 2 diabetes through probiotics. *Clinical Nutrition ESPEN*, 42, 5–16. [https://www.researchgate.net/publication/350099009\\_A\\_COMPREHENSIVE\\_REVIEW\\_ON\\_MANAGEMENT\\_OF\\_TYPE\\_2\\_DIABETES\\_THROUGH\\_PROBIOTICS](https://www.researchgate.net/publication/350099009_A_COMPREHENSIVE_REVIEW_ON_MANAGEMENT_OF_TYPE_2_DIABETES_THROUGH_PROBIOTICS)

Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2004). *Thematic Cartography and Geovisualization* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

Smith, D. A. (2016). Online interactive thematic mapping: Applications and techniques for socio-economic research. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.01.002>

Stanners, D., & Bourdeau, P. (1995). *Europe's environment: The Dobris assessment*. Copenhagen: European Environment Agency.

Stefanakis, E. (2017). Web Mercator and raster tile maps: Two cornerstones of online map service providers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(10), 304. <https://doi.org/10.3390/ijgi6100304>

Theocharidis, C., Doukanari, M., Kalogirou, E., Christofi, D., Mettas, C., Kontoes, C., Hadjimitsis, D., Argyriou, A. V., & Eliades, M. (2024). Coastal Vulnerability Index (CVI) Assessment: Evaluating Risks Associated with Human-Made Activities along the Limassol Coastline, Cyprus. *Remote Sensing*, 16(19), 3688. <https://doi.org/10.3390/rs16193688>

Tsimplis, M. N. (1994). Tidal characteristics of the Aegean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38(5), 517–527.

Tzelepis, N., Nakos, B. & Krassanakis, V. (2014). Using free open source software to create web maps for educational needs (in Greek). Presented at: 13th National Cartographic Conference, October 2014, Patras, Greece.

Turner, E. (1977). *Life in Los Angeles*.

Tyner, J. A. (2010). *Principles of map design*. Guilford Press.

U.S. Environmental Protection Agency. (2015). *Coastal Wetlands Initiative: North Atlantic Review*. EPA-843-R-10-005A. Washington, DC: U.S. EPA.

U.S. Geological Survey (USGS). (2024). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 6.0.170* [Computer software]. U.S. Geological Survey. Διαθέσιμο στο: <https://code.usgs.gov/cch/dsas>

United Nations Development Programme. (2022). *Human Development Report 2021-22: Uncertain times, unsettled lives: Shaping our future in a transforming world* (Human Development Reports 272–275). United Nations Development Programme. <https://hdr.undp.org/>

United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2004). *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. Geneva: United Nations.

Veenendaal, B., Brovelli, M. A., & Li S. (2017). *Review of Web Mapping: Eras, Trends and Directions*.

Visual Studio Code. (2025). *Official Documentation*. Διαθέσιμο στο: <https://code.visualstudio.com/docs>

Watkiss, P., Troeltzsch, J., McGlade, K., & Watkiss, M. (2019). *The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Interim Results*; COACCH: Lecce, Italy, 29p.

Zeit Online. (2019). *Klimawandel: Wie stark hat sich Ihr Wohnort erwärmt?* [Διαδικτυακό άρθρο]. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2019-12/klimawandel-globale-erwaermung-warming-stripes-wohnort>

Zouros, N. C. (2007). Geomorphosite assessment and management in protected areas of Greece: Case study of the Lesvos island – coastal geomorphosites. *Geographica Helvetica*, 62(3), 169–180.

Zunino, A., Quarati, A., & Taffoni, G. (2020). Evaluating the performance of three popular web mapping libraries. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 725. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120725>

Zunino, A., Velázquez, G., Celemín, J. P., Mateos, C., Hirsch, M., & Rodriguez, J. M. (2020). Evaluating the performance of three popular web mapping libraries: A case study using Argentina's Life Quality Index. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 563. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100563>

Δήμος Δυτικής Λέσβου. (2024). Βάση γεωχωρικών δεδομένων [Γεωχωρικά δεδομένα]. Ανακτήθηκε στις 10 Απριλίου 2025 από: <https://gis.mwlesvos.gr/>

ΕΛΣΤΑΤ (2023). Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2021: Μόνιμος Πληθυσμός. Ανακτήθηκε στις 02/06/2025 από: <https://www.statistics.gr/2021-census-res-pop-results>

ΕΛΣΤΑΤ. Ψηφιακά Χαρτογραφικά Δεδομένα - Όρια οικισμών. Ανακτήθηκε στις 02/06/2025, από: <https://www.statistics.gr/digital-cartographical-data>

Ευρωπαϊκή

Καρύμπαλης, Θ. Ε. (2010). Παράκτια γεωμορφολογία. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Κατίκας, Λ., Κονταρίνης, Σ., & Γκιούλης, Θ. (υπό δημοσίευση). Ανάλυση Δείκτη Παράκτιας Τρωτότητας με Υποβοήθηση Τεχνητής Νοημοσύνης: Αυτοματοποίηση Ανάκτησης Γεωχωρικών Δεδομένων και Ερμηνείας Αποτελεσμάτων για την Κλιματική Ανθεκτικότητα [Παρουσίαση συνεδρίου]. 17ο Εθνικό Συνέδριο Χαρτογραφίας, Θεσσαλονίκη, 12-14 Νοεμβρίου 2025. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑΣ.

Κόκλα, Μ., & Νάκος, Β. (2024). Θεματική Χαρτογραφία [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-981>

Λειβαδίτης, Γ. & Αλεξούλη-Λειβαδίτη, Α. (2004). Μορφολογία των ακτών της Λέσβου. Τομέας Γεωγραφίας-Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, ΕΚΠΑ & Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ.

Πρωτόκολλο για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση της Παράκτιας Ζώνης της Μεσογείου (ICZM Protocol). (2008). Άρθρο 2. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:22009A0204\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:22009A0204(01))

Σταμου, Λ. (2024). Παρουσίαση Άσκησης 2 – Θεματική Χαρτογραφία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.