



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

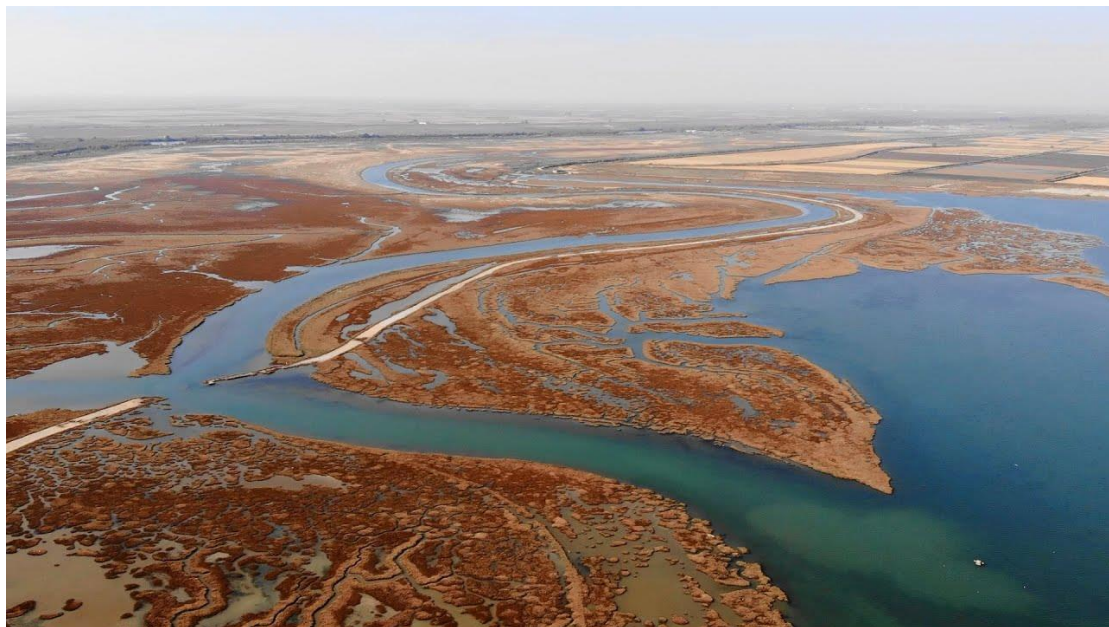
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΧΩΡΟΥ»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Χαρτογράφηση των αλλαγών της ακτογραμμής στα δέλτα των
ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα με την χρήση εργαλείων
Γεωπληροφορικής**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τζαναβάρη Ιωάννα/ AM 219320



Αθήνα, 2022



HAROKOPIO UNIVERSITY

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

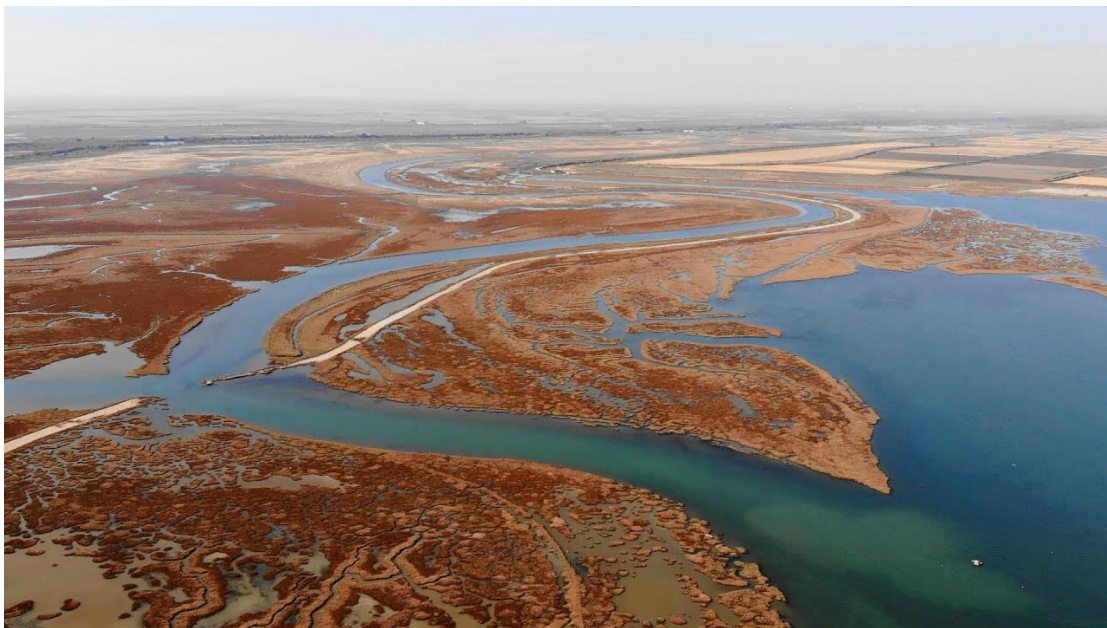
POSTGRADUATE PROGRAMME “APPLIED GEOGRAPHY AND
SPATIAL PLANNING”

STREAM C’ : GEO-INFORMATICS

**Coastline changes mapping in Axios and Aliakmonas river deltas using
Geoinformation technologies.**

Master Thesis

TZANAVARI IOANNA/ 219320



Athens, 2022



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΧΩΡΟΥ»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Π. Πετρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)

Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο πανεπιστήμιο

Ισαάκ Παρχαρίδης

Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο πανεπιστήμιο

Διονύσιος Καλύβας

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Εγώ, η Τζαναβάρη Ιωάννα, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- 3) Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Γεώργιο Π. Πετρόπουλο κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας καθώς και για την επιμονή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της. Η βοήθεια και η καθοδήγησή του για την επίλυση διαφόρων ζητημάτων ήταν πολύτιμη. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική τους συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας και για την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη στα Ελληνικά.....	7
Περίληψη στα Αγγλικά	9
Κατάλογος πινάκων.....	11
Κατάλογος εικόνων	12
Συντομογραφίες.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1. Εισαγωγή στη χαρτογράφηση μεταβολών ακτογραμμής.....	14
1.2. Σκοπός εργασίας.....	15
1.3. Δομή εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	18
2.1. Ακτογραμμή – Τύποι και αίτια μεταβολής.....	18
2.2. Μέθοδοι αποτύπωσης ακτογραμμών με την χρήση Τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ – Σύγχρονες τάσεις	21
2.3. Αντιπροσωπευτικές μελέτες.....	27
2.4. Σύνδεση με τους στόχους της εργασίας.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	32
3.1. Επιλογή περιοχής μελέτης.....	32
3.2. Γεωγραφική τοποθέτηση περιοχής μελέτης	32
3.3. Υδρογραφικό δίκτυο και Λεκάνες απορροής	33
3.4. Γεωλογία – Υδρογεωλογία.....	34
3.5. Χρήσεις γης	37
3.6. Οικότοποι – θέσεις οικολογικού ενδιαφέροντος.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	40
4.1. Δεδομένα Τηλεπισκόπησης.....	40
4.2. Λογισμικά.....	42
4.3. Μεθοδολογία.....	43
4.3.1. Προ-επεξεργασία εικόνων.....	44
4.3.2. Εξαγωγή των ακτογραμμών με την μέθοδο επιβλεπόμενης ταξινόμησης SVM	45
4.3.3. Αξιολόγηση ακρίβειας ταξινόμησης.....	49
4.3.4. Εξαγωγή των ακτογραμμών με χειροκίνητη ψηφιοποίηση επί της οθόνης μέσω φωτοερμηνείας.....	51
4.3.5. Υπολογισμός μετατόπισης ακτογραμμής και διάβρωσης – απόθεσης με την χρήση του πρόσθετου DSAS.....	52
4.3.5. Δημιουργία WebGIS	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

Περίληψη στα Ελληνικά

Η χαρτογράφηση των ακτών έχει μεγάλη σημασία για την προστασία των οικοσυστημάτων, τη διαχείριση των πόρων και τη βιώσιμη παράκτια ανάπτυξη μιας περιοχής. Ιδίως στα δέλτα των ποταμών η χαρτογράφηση των αλλαγών είναι χρήσιμη καθώς αποτελούν σημαντικά περιβάλλοντα με κοινωνικοοικονομική και περιβαλλοντική σημασία. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε να μελετηθούν δύο από τα μεγαλύτερα και πιο σημαντικά δέλτα του Ελλαδικού χώρου, αυτά του Αξιού και του Αλιάκμονα. Αναμφισβήτητα, η μελετώμενη περιοχή αποτελεί ένα δυναμικό συσσωρευτικό παράκτιο περιβάλλον λόγω της δραστηριότητας των δύο ποταμών, που διακρίνονται για την απόρριψη μεγάλης ποσότητας υδάτων και ιζηματογενούς φορτίου. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από μεγάλη οικολογική και περιβαλλοντική σημασία λόγω των υγροτόπων που σχηματίζονται και από τους δύο ποταμούς και οι οποίοι παρέχουν καταφύγιο σε μια μεγάλη ποικιλία ειδών χλωρίδας και πανίδας.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται συγκεκριμένα στη χαρτογράφηση των αλλαγών που σημειώθηκαν στην ακτογραμμή που αναπτύσσεται μεταξύ των Δέλτα των ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα στη Βόρεια Ελλάδα, σε διάστημα 25 ετών, με χρήση τεχνικών Τηλεπισκόπησης και εργαλείων Γεωπληροφορικής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Landsat ως πρωτογενή δεδομένα ενώ για την εξαγωγή των ακτογραμμών από τις επιλεγμένες εικόνες, αξιοποιήθηκε η μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας που βασίζεται σε μηχανική μάθηση. Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκε και μια δεύτερη τεχνική ανίχνευσης των ακτογραμμών, αυτή της χειροκίνητης ψηφιοποίησης επί της οθόνης μέσω φωτοερμηνείας. Ύστερα, αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητά της πρώτης τεχνικής στην παρακολούθηση των αλλαγών των ακτών στην περιοχή μελέτης για το μελετώμενο διάστημα ενώ ακολούθησε συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών. Μετά την εξαγωγή των ακτογραμμών από τις εικόνες Landsat, χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν add on module του λογισμικού ArcGIS, το Digital Shoreline Analysis System (DSAS), για τον υπολογισμό του ποσοστού μετατόπισης της ακτογραμμής, υποδεικνύοντας την παράκτια συσσώρευση/ ύφεση που συμβαίνει στην περιοχή μελέτης. Το τελευταίο βήμα που υλοποιήθηκε για τους σκοπούς της

παρούσας μελέτης ήταν η ανάπτυξη ενός Web-GIS για την παρουσίαση και διαδραστική απεικόνιση των κύριων αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Συνολικά, η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην παροχή τεχνογνωσίας σχετικά με την χρήση της Γεωπληροφορικής στην παρακολούθηση των αλλαγών στις ακτογραμμές.

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν σημαντική παράκτια διάβρωση και απόθεση στην περιοχή μελέτης, κατά μέσο όρο, από τα αποτελέσματα και των δύο τεχνικών, 0,91 m/yr απόθεση και 1,11 m/yr διάβρωση. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν ενδεχομένως να αποτελέσουν ένα υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, ειδικά για φορείς και αρχές διαχείρισης που είναι αρμόδιες για την προστασία ευαίσθητων οικοσυστημάτων καθώς και βάση για περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

Λέξεις-κλειδιά: Γεωπληροφορική, Χαρτογράφηση αλλαγών ακτογραμμής, Δέλτα ποταμών, Δεδομένα παρατήρησης γης, Μηχανική μάθηση, Web-GIS

Περίληψη στα Αγγλικά

Coastline mapping is of highly importance for the ecosystem protection, the resource management, and the sustainable coastal development of an area. Especially in river deltas the mapping of changes is useful as they are important environments of socio-economic and environmental importance. In the context of the present study, two of the largest and most important deltas in Greece, those of Axios and Aliakmonas were selected. Undeniably, the studied coastline segment is a dynamic accumulative coastal environment due to the activity of the two rivers, distinguished for their high-water discharge and sedimentary load. Furthermore, it is characterized of major ecological and environmental importance due to the wetlands, formed by both rivers, providing shelter to a wide range of flora and fauna species.

The present thesis focuses on the mapping of the changes occurred in the coastline between Axios and Aliakmonas river deltas in Northern Greece, over a period of 25 years, using Remote Sensing and GIS techniques. For this purpose, Landsat images were used as primary data, while for the extraction of the coastlines from the selected satellite images, a supervised image classification method based on machine learning was utilized. Also, a second shoreline change detection technique (manual digitization) was additionally used. The effectiveness in the monitoring of coastline changes in the studied region for the studied period was further evaluated, followed by a comparative analysis of the results of the two techniques. After the extraction of shorelines from Landsat images, Digital Shoreline Analysis System (DSAS), which is a free add on module of ArGIS software, was used to calculate shoreline displacement rate, indicating the coastal accretion/ recession occurring in the study area. The final step, implemented for the purpose of the present study, was the development of a Web-GIS for the presentation and interactive visualization of the main results and outputs.

Overall, the present study aims to provide know-how on the use of Geoinformatics in the monitoring of coastal changes. The outputs of the study showed significant coastal accretion/ recession, averaging 0.91 m /yr. deposition and 1.11 m /yr. erosion from both implemented methods. These results could be a supportive decision-making

tool, especially for bodies and management authorities engaged in protection of sensitive ecosystems as well as a basis for further scientific research.

Keywords: Geoinformatics, Coastline changes mapping, River delta, Remote sensing data, Machine learning, Web-GIS

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Μεταβολή της ακτογραμμής σε χωρο-χρονική κλίμακα από φυσικά και ανθρωπογενή αίτια. (Ιωακειμίδου, 2019).....	19
Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παραδοσιακών και σύγχρονων δεδομένων ανάκτησης γεωχωρικών πληροφοριών για την μελέτη των ακτογραμμών	22
Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων ανίχνευσης και εξαγωγής των ακτογραμμών από δεδομένα Τηλεπισκόπησης (Hayward 2017;Πετρόπουλος 2021)	26
Πίνακας 5.4: Ποσοστά συνολικής ακρίβειας και συντελεστή K για κάθε ταξινομημένη εικόνα	60
Πίνακας 5.5: Ποσοστά ακρίβειας του χρήστη (User Accuracy) και ακρίβειας του παραγωγού (Producer Accuracy) για κάθε ταξινομημένη εικόνα	60
Πίνακας 5.6: Ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (αποτελέσματα 1 ^{ης} τεχνικής) .	61
Πίνακας 5.7: Ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (αποτελέσματα 2 ^{ης} τεχνικής) .	63

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 3.1: Γεωγραφική τοποθέτηση περιοχής μελέτης (Google Earth)	33
Εικόνα 3.2: Γεωλογικός χάρτης υπολεκάνης (κάτω ρου) Αλιάκμονα ποταμού (Πηγή: Υ.Α.Α.Τ/ ΠΑΑ 2007-2013: σελ. 13-6)	35
Εικόνα 3.3: Υδρολιθολογικός χάρτης μέρους της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πηγή: Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013: σελ. 13-8)	37
Εικόνα 3.4: Καλύψεις γης ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πηγή: Papoutsis et.al, 2015: σελ. 5)	38
Εικόνα 3.5: GR1220002 - Δέλτα Αλιάκμονα και Αξιού. Προετοιμασία σε	39
Εικόνα 4.6: Ανοικτή βάση δεδομένων Earth Explorer του USGS – Επιλογή δεδομένων Landsat Collection 2 – Level 2 για την περιοχή μελέτης	41
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής διαδικασιών (Flow chart)	43
Εικόνα 4.8: RGB εικόνα για το έτος 2000 σε μορφή .tif μετά από προ-επεξεργασία της αρχικής εικόνα	45
Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας SVM (Πηγή: Βατίτση, 2016: σελ.22)	46
Εικόνα 4.10: Περιοχές εκπαίδευσης αλγορίθμου ταξινόμησης (training ROIs) στο Δέλτα του Αξιού ποταμού (έτος αναφοράς 2020)	47
Εικόνα 4.11: Ακτογραμμή που προέκυψε έπειτα από την εκτέλεση του αλγορίθμου επιβλεπόμενης ταξινόμησης (SVM) και την μετατροπή σε vector για τα έτη 2000 και 2010 (κόκκινη γραμμή)	49
Εικόνα 4.12: Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την ψηφιοποίηση της ακτογραμμής σε περιβάλλον ArcMap 10.5	52
Εικόνα 4.13: Ενδεικτικά στιγμιότυπα από την προεπεξεργασία που απαιτήθηκε για την παραμετροποίηση του DSAS (συγχώνευση ακτογραμμών όλων των ετών και δημιουργία γραμμής βάσης)	53
Εικόνα 4.14: Καθορισμών παραμέτρων ακτογραμμής και γραμμής βάσης για την δημιουργία των κάθετων διατομών	55
Εικόνα 4.15: Περιβάλλον διαμόρφωσης διαδικτυακού χάρτη και οπτικοποίησης αποτελεσμάτων (ArcGIS Online)	56
Εικόνα 4.16: Ταξινόμηση αποτελεσμάτων και διαμόρφωση χρωματικής κλίμακας στο AGOL	57
Εικόνα 4.17: Αποθήκευση διαδικτυακού χάρτη στο AGOL	58
Εικόνα 5.18: Χάρτης περιοχής μελέτης όπου αποτυπώνεται ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (1995-2020) δεδομένων των ακτογραμμών που εξήχθησαν από την 1 ^η τεχνική (SVM)	62
Εικόνα 5.19: Χάρτης περιοχής μελέτης όπου αποτυπώνεται ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (1995-2020) δεδομένων των ακτογραμμών που εξήχθησαν από την 2 ^η τεχνική (manual digitization)	64
Εικόνα 5.20: Διαδικτυακός χάρτης αποτελεσμάτων σε εκτυπώσιμη μορφή	65

Συντομογραφίες

Ελληνικά:

ΕΛ/ΛΑΚ	Ελεύθερο Λογισμικό/Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
Ο.Ε.Γ.Δ	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Γεωγραφικών Δεδομένων
Η.Ε	Ηνωμένα Έθνη

Αγγλικά:

GIS	Geographic Information Systems
FGDC	Federal Geographic Data Committee
Η.Ε	Ηνωμένα Έθνη
AGOL	ArcGIS Online
DGPS	Differential Global Positioning System
NDWI	Normalized Difference Water Index
MNDWI	Modified Normalized Water Index
WRI	Water Ratio Index
AWEI	Automated Water Extraction Index
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
SVM	Support Vector Machines
ESA	European Space Agency
RBF	Radial Basis Function
ROI	Region of Interest
LRR	Linear Regression Rate
WMS	Web Map Services
HTTP	Hypertext Transfer Protocol Secure
WFS	Web Feature Services
GML	Geography Markup Language
XML	eXtensible Markup Language
GPX	GPS Exchange Format

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγή στη χαρτογράφηση μεταβολών ακτογραμμής

Η παράκτια ζώνη είναι μια από τις σημαντικότερες κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές περιοχές σε παγκόσμια κλίμακα, υποστηρίζοντας πλήθος δραστηριοτήτων όπως ο τουρισμός, η γεωργία, το ψάρεμα (Raju Aedla et.al, 2015; Hayward, 2017).

Οι μεταβολές της ακτογραμμής είναι μια δυναμική διαδικασία στην παράκτια ζώνη που μπορεί να οφείλεται σε μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες διεργασίες, όπως η κίνηση των τεκτονικών πλακών ή κάποιο ακραίο καιρικό φαινόμενο αντίστοιχα, και σε ανθρωπογενή ή φυσικά αίτια. Οι κυριότεροι φυσικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην αλλαγή της ακτογραμμής είναι η γεωλογία – παράκτια γεωμορφολογία, το κλίμα, το υδρογραφικό δίκτυο και η βλάστηση. Στους ανθρωπογενείς παράγοντες συγκαταλέγονται οι θαλάσσιες κατασκευές και άλλες ανθρωπογενείς δομές προστασίας ακτών (Αντζουλάτου, 2015). Οι μεταβολές αυτές δύναται να επιφέρουν πολλές φορές καταστροφικές κοινωνικές, οικονομικές και οικολογικές επιπτώσεις εντός της παράκτιας ζώνης, που οδηγούν σε απώλεια ζωνών, περιουσίας, γεωργικής γης και σε καταστροφή φυσικών πόρων και οικοτόπων (Hayward, 2017).

Η χαρτογράφηση των ακτογραμμών και η ανίχνευση των μεταβολών τους είναι επομένως ζωτικής σημασίας όχι μόνο για την προστασία των παράκτιων κατασκευών από την διάβρωση και άλλες διεργασίες που μεταβάλλουν την παράκτια σταθερότητα, αλλά και για την βιώσιμη ανάπτυξη και τον σχεδιασμό – προγραμματισμό παράκτιων περιοχών, την ασφαλή ναυσιπλοΐα, την διαχείριση και διασφάλιση των παράκτιων πόρων και τη γενικότερη περιβαλλοντική διαχείριση ενός παράκτιου οικοσυστήματος (Φωτείνης, 2014; Γεωργουλά, 2017).

Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ολοένα και πιο σύγχρονων και καινοτόμων εργαλείων Γεωπληροφορικής. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), τα Συστήματα Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης (GPS) και η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) έχουν συμβάλει ουσιαστικά

στην ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης. Αποτελούν άλλωστε οικονομικά και αποδοτικά εργαλεία για την χαρτογράφηση των μεταβολών των ακτογραμμών, δίδοντας αξιόπιστα και ταυτόχρονα ποιοτικά αποτελέσματα (Αγαπίου κ.α., 2020).

Συγκεκριμένα, η Τηλεπισκόπηση και η Φωτογραμμετρία έχουν χρησιμοποιηθεί με έναν ευρέως διαδεδομένο τρόπο με σκοπό την παρακολούθηση των μεταβολών των ακτογραμμών στην παράκτια ζώνη. Η χρήση της Τηλεπισκόπησης και της Φωτογραμμετρίας είναι πολύ πιο πρακτική σήμερα συγκριτικά με τις τοπογραφικές μετρήσεις και την χρήση αεροφωτογραφιών που χρησιμοποιούνταν κατά το παρελθόν. Άλλωστε μια μεταβολή της ακτογραμμής είναι εύκολα αντιληπτή αξιολογώντας δορυφορικές εικόνες για διαφορετικά χρονικά διαστήματα και σε βάθος χρόνου για μια δεδομένη περιοχή μελέτης (Temiz and Durduran, 2016). Ευρέως διαδεδομένες σήμερα για την μελέτη του παράκτιου χώρου είναι οι εικόνες που συλλέγουν δεδομένα στο οπτικό τμήμα της ΗΜ ακτινοβολίας (0.4–2.5μm), καθώς είναι αρκετά απλές στην ερμηνεία τους και χωρίς κόστος. Επιπλέον, εικόνες που περιέχουν ορατές και υπέρυθρες ζώνες, αποτελούν ιδανικό εργαλείο για την χαρτογράφηση της ακτογραμμής. Παραδείγματα τέτοιων εικόνων είναι οι Landsat TM (Thematic Mapper) και ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) εικόνες, οι Sentinel, MODIS κ.α (Alesheikh et. al, 2007).

Συνδυάζοντας δεδομένα από αρχειακές πηγές για την θέση μιας ακτογραμμής στο παρελθόν, με σύγχρονες πηγές οι οποίες αποδίδουν την παρούσα θέση της, μπορεί κανείς να εντοπίσει πως εξελίχθηκε η ακτογραμμή κατά την πάροδο των ετών και να κατανοήσει το λόγο που μεταβάλλεται η παράκτια σταθερότητα αλλά και δυνητικά πως μπορούν να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις από την παράκτια διάβρωση και άλλες διεργασίες (εναπόθεση ιζημάτων, ανύψωση στάθμης της θάλασσας λόγω κλιματικής αλλαγής, παλιρροιακά φαινόμενα κ.α).

1.2. Σκοπός εργασίας

Απώτερος σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η αξιοποίηση τεχνολογιών γεωπληροφορικής για την χαρτογράφηση των αλλαγών που σημειώθηκαν στην

ακτογραμμή η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των Δέλτα των ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα στη Βόρεια Ελλάδα, σε διάστημα 25 ετών.

Επιμέρους στόχοι της έρευνας για την ανωτέρω περιοχή μελέτης είναι οι εξής:

- 1) η αξιολόγηση της εφαρμογής μιας μεθόδου επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας που βασίζεται σε μηχανική μάθηση για την εξαγωγή της ακτογραμμής της περιοχής μελέτης, από εικόνες Landsat,
- 2) ο υπολογισμός του ποσοστού μετατόπισης της ακτογραμμής και του ρυθμού διάβρωσης και απόθεσης με την χρήση GIS και
- 3) η ανάπτυξη ενός Web-GIS για την παρουσίαση και διαδραστική απεικόνιση των κύριων αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την παραπάνω ανάλυση.

Συνολικά, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία, επιδιώκει να αποτελέσει ένα υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων προς εμπλεκόμενους φορείς. Περαιτέρω δύναται να αποτελέσει βάση για περαιτέρω επιστημονική έρευνα στην παρακολούθηση των αλλαγών της ακτογραμμής τόσο στην περιοχή μελέτης όσο και σε άλλες περιοχές ενδιαφέροντος.

1.3. Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

Στο εισαγωγικό πρώτο κεφάλαιο έγινε μια σύντομη αναφορά στην σημασία της χαρτογράφησης των μεταβολών των ακτογραμμών αλλά και των εργαλείων Τηλεπισκόπησης και Γεωπληροφορικής που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, ενώ αναφέρεται και ο κύριος στόχος καθώς και οι επιμέρους στόχοι της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια εκτεταμένη επισκόπηση της ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας που έχει δημοσιευτεί σχετικά με τους τύπους και τα αίτια μεταβολής μιας ακτογραμμής αλλά και τους τρόπους αποτύπωσης και παρακολούθησης των αλλαγών της με τη χρήση Τηλεπισκόπησης και GIS.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση της περιοχής μελέτης με βάση γεωγραφικά, υδρογραφικά, γεωλογικά και άλλα περιβαλλοντικά στοιχεία που είναι

διαθέσιμα βιβλιογραφικά. Στο κεφάλαιο αυτό αιτιολογήθηκε επίσης και ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περιοχή ως περιοχή μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε αναλυτική αναφορά στα δεδομένα που ελήφθησαν και στις πηγές αυτών καθώς και στα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Περαιτέρω δε παρουσιάστηκε αναλυτικά όλη η μεθοδολογική προσέγγιση, από την προ-επεξεργασία και επεξεργασία των δεδομένων μέχρι την τελική ανάπτυξη του Web GIS.

Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ενώ στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν κωδικοποιημένα τα βασικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η εργασία καθώς και μελλοντικές κατευθύνσεις για περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1. Ακτογραμμή – Τύποι και αίτια μεταβολής

Ως **ακτογραμμή** νοείται η γραμμή που χωρίζει την ξηρά από την θάλασσα και η οποία μεταβάλλεται συνεχώς χωροχρονικά, αποτελώντας ένα δυναμικό σύστημα. Οι ακτογραμμές σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Γεωγραφικών Δεδομένων (FGDC) των Ηνωμένων Εθνών (Η.Ε) αποτελούν σημαντικό χαρακτηριστικό της περιβαλλοντικής κληρονομιάς της επιφάνειας της γης και ένα από τα πιο μοναδικά χαρακτηριστικά που είναι άξιο αναφοράς και μελέτης (Ιωακειμίδου, 2019).

Η ταξινόμηση των μορφών μεταβολής μιας ακτογραμμής, βάσει γεωμορφολογικών κανόνων, είναι σημαντική για την καλύτερη διαχείριση της παράκτιας ζώνης. Ως **τύπος μεταβολής της ακτογραμμής** καθορίζεται ένα διακριτικό μοτίβο μετακίνησης της ακτογραμμής που αναγνωρίζεται από μία ιδιαίτερη αλλαγή, στον ρυθμό, στο σχήμα ή στην περιοδικότητα. Οι τύποι μεταβολής της ακτογραμμής μπορούν να εμφανισθούν ως **δισδιάστατες (γραμμικές) ή τρισδιάστατες (κατά μήκος της ακτής) μεταβολές** που εξελίσσονται σε διάφορες χωροχρονικές κλίμακες και ταξινομούνται σε (Ζαχαρίου, 2019):

1. Απλή γραμμική υποχώρηση
2. Εναλλασσόμενη διάβρωση- πρόσχωση
3. Διαδοχική διάβρωση κατά μήκος της ακτογραμμής.
4. Επεισοδική διάβρωση
5. Διάβρωση όρμων
6. Κυκλική μεταβολή ακτογραμμής
7. Συμπεριφορά μέσο-παλιρροιακού ύφαλου
8. Αντιληπτή περιστροφή νησιού
9. Ελεγχόμενη Προ-οζαινικά διαμόρφωση
10. Παροδική διαδοχική διάβρωση
11. Χαρακτηριστικά ακρωτηρίου

12. Επέκταση αμμολωρίδας.

Οι μεταβολές των ακτογραμμών μπορεί να οφείλονται σε **μικρής κλίμακας (βραχυπρόθεσμα), μεγάλης κλίμακας (μακροπρόθεσμα) και μεσοπρόθεσμης κλίμακας (δεκαετιών) γεγονότα**. Σε μικρή κλίμακα, οι αλλαγές των ακτογραμμών σχετίζονται κυρίως με την κίνηση των κυμάτων, καταιγίδες και ανέμους. Σε μεγάλη κλίμακα συνδέονται με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής (λιώσιμο πάγων) και τις τεκτονικές κινήσεις. Σε μεσοπρόθεσμη κλίμακα, οι παράγοντες που προκαλούν τις μεταβολές είναι πιο περίπλοκοι. Αποδίδονται κύρια στην ανθρωπογενή δραστηριότητα η οποία την σύγχρονη εποχή έχει εντατικοποιηθεί και μεταβάλλει την φυσική εξέλιξη των παράκτιων ζωνών, προκαλώντας διάβρωση των παράκτιων περιοχών και συνεπώς σημαντικούς κινδύνους για τους κατοίκους της (Gamble et.al, 2015).

Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται εποπτικά τα φυσικά και ανθρωπογενή αίτια που προκαλούν μεταβολή μιας ακτογραμμής σε διάφορες χωροχρονικές κλίμακες.

Πίνακας 2.1: Μεταβολή της ακτογραμμής σε χωρο-χρονική κλίμακα από φυσικά και ανθρωπογενή αίτια. (Ιωακειμίδου, 2019)

Κλίμακα Χρόνου και χώρου	Φυσικά αίτια	Ανθρωπογενή αίτια
Ώρες έως 1 έτος Από 10m έως 1km	• Κυματικές καταιγίδες, παλίρροιες • Εποχιακές κλιματικές αλλαγές	• Κατασκευές στη ζώνη κυματαγωγής • Ανατροφοδότηση παραλιών με άμμο
1 έως 10 έτη Από 1 έως 5km	• Κλιματικές μεταβολές κυμάτων • Ακραία καιρικά φαινόμενα	• Κατασκευές στη ζώνη κυματαγωγής • Ανατροφοδότηση παραλιών με άμμο
Δεκάδες έτη έως μερικούς αιώνες Από 10 έως 100km	• Σχετική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας • Τοπικές κλιματικές μεταβολές • Ακραία καιρικά φαινόμενα	• Μεταβολή στην απορροή μεγάλων ποταμών (φράγματα κτλ.) • Παράκτια τεχνικά έργα • Αναμορφώσεις της παράκτιας ζώνης • Παράκτια (μη) διαχείριση • Υπερεκμετάλλευση φυσικών πόρων

Αιώνες ή χιλιετηρίδες > των 100km	• Διαθεσιμότητα σε ιζήματα • Σχετική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας • Κατακόρυφες κινήσεις του πυθμένα • Γεωλογικό υπόβαθρο • Γεωλογικής κλίμακας κλιματικές αλλαγές • Παλαιομορφολογία	• Κλιματικές αλλαγές προκαλούμενες από ανθρώπινες δραστηριότητες • Μεταβολή στην απορροή μεγάλων ποταμών (φράγματα κτλ.) • Μεγάλες παράκτιες κατασκευές • Αναμορφώσεις της παράκτιας ζώνης σε μεγάλη κλίμακα • (Μη) Διαχείριση παράκτιων ζωνών
---	---	--

Όσον αφορά τον **βαθμό μεταβολής** αυτός εξαρτάται από τοπικούς παράγοντες και συγκεκριμένα από (Ζαχαρίου, 2019):

- Τοποθεσία της ακτής, αν η ακτή δηλαδή βρίσκεται σε κόλπο ή στην ανοιχτή θάλασσα.
- Γεωλογία της ακτής.
- Μορφολογία της ακτής.
- Κλιματικές και κυματικές συνθήκες
- Ένταση των ακραίων καιρικών και κυματικών φαινομένων.
- Συσσώρευση των ιζημάτων

Η Ελλάδα κατέχει υψηλή θέση παγκοσμίως μεταξύ χωρών με τη μεγαλύτερη ακτογραμμή, με μήκος που φτάνει τα 16.200 km (Καρύμπαλης κ.α., 2018). Προκειμένου να μετριάσουν οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι από την υποχώρηση των ακτογραμμών της χώρας μας είναι σημαντικό να εξεταστούν αναλυτικότερα τέτοιες μεταβολές και να αποκτηθεί γνώση. Ήδη έρευνες έχουν δείξει ότι οι ελληνικές ακτογραμμές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες καθώς παρατηρούνται ταχύτατες αυξομειώσεις (επέκταση ή συρρίκνωση). Σημαντικό εύρημα ήταν πως το διάστημα **1995-2020, το 40% της συνολικής ακτογραμμής** που μελετήθηκε, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Space for Shore του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), **τείνει να επεκτείνεται και να αναπτύσσεται προς τη θάλασσα λόγω προοδευτικής συσσώρευσης ιζημάτων**. Φαίνεται μάλιστα πως τα **δέλτα, οι εκβολές ποταμών** και τα ακρωτήρια είναι οι πιο εκτεθειμένες περιοχές, με υποχώρηση που μπορεί να φθάσει τα 30 μέτρα ετησίως.

2.2. Μέθοδοι αποτύπωσης ακτογραμμών με την χρήση Τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ – Σύγχρονες τάσεις

Κατά το παρελθόν, για την αποτύπωση των ακτογραμμών και την ανίχνευση των αλλαγών τους, χρησιμοποιούνταν **παραδοσιακές μέθοδοι** όπως η μελέτη:

- α) αεροφωτογραφιών,
- β) φύλλων τοπογραφικών χαρτών,
- γ) διαγραμμάτων παράκτιων εκτάσεων,
- δ) μετρήσεων πεδίου.

Οι αεροφωτογραφίες κατακόρυφης λήψης (vertical aerial photographs) αποτελούσαν ανέκαθεν πολύτιμα εργαλεία για την ανακατασκευή (reconstruction) της ακτογραμμής για μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες χρονικές κλίμακες (Crowell et al., 1993) παρέχοντας τη δυνατότητα ανίχνευσης στοιχείων για την παράκτια μορφολογία και τις μεταβολές των χρήσεων γης της παράκτιας ζώνης (Anfuso et al., 2007). Ήδη από το 1927 στις ΗΠΑ, χρησιμοποιούνταν ορθοδιορθωμένες αεροφωτογραφίες για να εξαχθούν από αυτές γεωχωρικές πληροφορίες για την παράκτια ζώνη. Η διαδικασία διόρθωσης σαρωμένων αεροφωτογραφιών κατακόρυφης λήψης ήταν μια πολύπλοκη διαδικασία, διότι οι περισσότερες αεροφωτογραφίες, δεν είχαν σαφή σημεία ελέγχου όπως ενδείξεις γεωγραφικού μήκους-πλάτους ή τριγωνομετρικά σημεία.

Τις τελευταίες δεκαετίες φαίνεται πως οι **σύγχρονες μέθοδοι τηλεπισκόπησης** έχουν επικρατήσει στην αποτύπωση των ακτογραμμών, σε συνεργασία πάντα με παραδοσιακές τεχνικές. Οι παρατηρήσεις πεδίου ήταν και θα είναι αναγκαίες και δεν πρόκειται να αντικατασταθούν πλήρως από την Τηλεπισκόπηση. Η συλλογή δεδομένων στο πεδίο απαιτεί άλλωστε πολύ χρόνο και μεγάλο κόστος, ενώ τα δεδομένα της Τηλεπισκόπησης δύναται να καταγράφουν δεδομένα σε σχετικά πολύ μικρό χρόνο. Παράλληλα μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με δυσπρόσιτες περιοχές που δύσκολα μπορούν να προσεγγιστούν (Jeremy T. Kerr et. Al, 2005; Kaushik Shandilya et.al, 2013; Παρχαρίδης, 2015).

Για την αποτύπωση των σύγχρονων ακτογραμμών μπορούν να χρησιμοποιούνται πλέον και:

- α) τοπογραφικές μετρήσεις με DGPS (Differential Global Positioning System - Διαφορικό Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης),
- β) πολυφασματικά και υπερφασματικά δεδομένα τηλεπισκόπησης (multispectral and hyperspectral satellite images),
- γ) δεδομένα τεχνολογίας εναέριας φωτοανίχνευσης και εντοπισμού (Light Detection And Ranging - LIDAR),
- δ) δεδομένα από μικροκυματικούς αισθητήρες (microwave sensors),
- ε) εικόνες από διαδικτυακές κάμερες (web cameras π.χ. Argus snapshot photograph κ.α) (Turki et al., 2013; Ατζουλάτου, 2015).

Η ανάλυση των παραπάνω παραδοσιακών και σύγχρονων δεδομένων για την μελέτη των ακτογραμμών έχει σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα όπως συνοψίζονται στον **Πίνακας 2.2**.

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παραδοσιακών και σύγχρονων δεδομένων ανάκτησης γεωχωρικών πληροφοριών για την μελέτη των ακτογραμμών

Δεδομένα ανάκτησης γεωχωρικών πληροφοριών για την παράκτια ζώνη		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παραδοσιακά	-Ορθοδιορθωμένες αεροφωτογραφίες κατακόρυφης λήψης -Τοπογραφικοί χάρτες -Διαγράμματα παράκτιων εκτάσεων -Μετρήσεις πεδίου	-Δίνουν σαφή εικόνα της περιοχής μελέτης -Βοηθούν στην επιλογή αντιπροσωπευτικών σημείων εκπαίδευσης των αλγορίθμων ταξινόμησης -Δεν μπορούν να αντικατασταθούν πλήρως από τις σύγχρονες τεχνικές.	-Πολύπλοκη η διαδικασία διόρθωσης των αεροφωτογραφιών -Υψηλό κόστος – σημαντικός χρόνος και εξειδικευμένο προσωπικό για συλλογή δεδομένων πεδίου

Σύγχρονα	-Πολυφασματικά και υπερφασματικά δεδομένα τηλεπισκόπησης (multispectral and hyperspectral satellite images), -Δεδομένα τεχνολογίας εναέριας φωτοανίχνευσης και εντοπισμού (Light Detection And Ranging - LIDAR), -Δεδομένα από μικροκυματικούς αισθητήρες (microwave sensors) -Εικόνες από διαδικτυακές κάμερες	-Λήψη δεδομένων σε σχετικά μικρό χρόνο. -Εξοικονόμηση χρόνου και κόστους από εργασίες υπαίθρου. -Πληροφορίες για δυσπρόσιτες - δύσβατες περιοχές. -Δίδουν μια συνοπτική εικόνα του χώρου που αποδίδουν (χιλιάδες km ²) -Συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη μιας μελετώμενης περιοχής επιτρέποντας την παρατήρηση μικρών εποχικών αλλαγών. -Συλλογή δεδομένων σε επιλεγμένα τμήματα του ΗΜ φάσματος . -Απόδοση δεδομένων σε ψηφιακή και αναλογική μορφή. (Παρχαρίδης, 2015)	-Απαραίτητη η «συνεργασία» με παραδοσιακές τεχνικές
----------	--	---	---

Ως επί τω πλείστον, οι **μέθοδοι** που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την εξαγωγή ακτογραμμών από **δεδομένα τηλεπισκόπησης** μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- **χειροκίνητη ψηφιοποίηση** επί της οθόνης μέσω φωτοερμηνείας και
- **ημιαυτόματες και αυτόματες προσεγγίσεις μέσω ταξινόμησης εικόνας.**

Αναλυτικότερα:

Η χειροκίνητη ψηφιοποίηση είναι συχνά χρησιμοποιούμενη λόγω της απλότητάς της και χρησιμοποιεί οπτικές πολυφασματικές εικόνες για την οριοθέτηση της ακτογραμμής. Πιο περίπλοκες προσεγγίσεις εφαρμόζουν δείκτες νερού για να δημιουργήσουν μια ενισχυμένη αντίθεση μεταξύ νερού και γης, βελτιώνοντας έτσι την ευκολία και την ακρίβεια της ψηφιοποίησης. Τέτοιοι δείκτες χρησιμοποιούν κανάλια στα ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος καθώς το νερό εκεί παρουσιάζει χαμηλή ανάκλαση, ενώ η βλάστηση και το έδαφος παρουσιάζουν υψηλή ανάκλαση. Παραδείγματα τέτοιων δεικτών είναι οι:

- **Normalised Difference Water Index (NDWI)**

Ο δείκτης NDWI χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υγρών στοιχείων, περιοχών καλυμμένων με χιόνι καθώς και άλλων περιοχών με αυξημένη παρουσία νερού. Για

την εφαρμογή αυτού του δείκτη χρησιμοποιείται το πράσινο κανάλι 0.5-0.6 μm και το κοντινό υπέρυθρο 0.76-0.96 μm (Παπαδημητρίου, 2017). Η ακτογραμμή εξάγεται δημιουργώντας την εικόνα Normalized difference water index από τον **τύπο 2.1**:

$$NDWI = \frac{(Green - Nir)}{(Green + Nir)} \quad (2.1)$$

όπου Green είναι το κανάλι 3 και NIR το κανάλι 7.

- **Modified Normalised Water Index (MNDWI)**

Ο δείκτης MNDWI ενισχύει τα χαρακτηριστικά του νερού, ενώ ταυτόχρονα καταστέλλει το θόρυβο των κτηρίων, της βλάστηση και του εδάφους. Ο δείκτης MNDWI φαίνεται ότι παράγει καλύτερα αποτελέσματα από ότι ο NDWI για την ενίσχυση και την εξαγωγή του νερού από περιβάλλοντα όπου κυριαρχούν οικισμοί, βλάστηση και χέρσος (Παπαδημητρίου, 2017). Ο δείκτης υπολογίζεται από τον **τύπο 2.2**:

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \quad (2.2)$$

- **Water Ratio Index (WRI)**

Ο Water Ratio Index (WRI) εμφανίστηκε στην βιβλιογραφία το 2006 από τους Ouma Y. και Tateishi R. ως Water Index (WI). Εξελήχθηκε από τους Shen L. και Li C. το 2010 και βασίζεται στην κυρίαρχη φασματική ανάκλαση του νερού στο κόκκινο και στο πράσινο έναντι του βραχυκυματικού και κοντινού υπέρυθρου, NIR και MIR αντίστοιχα (Gautam et al, 2015), (Mustafa et.al, 2017). Ο δείκτης δίνεται από τον **τύπο 2.3**:

$$WRI = \frac{(GREEN+RED)}{(NIR+SWIR)} \quad (2.3)$$

- **Automated Water Extraction Index (AWEI)**

Ο AWEI είναι ένας εμπειρικός δείκτης στον οποίο το νερό έχει θετικές τιμές και χρησιμοποιείται για να βελτιώσει της ακρίβειας ταξινόμησης σε περιοχές που περιλαμβάνουν σκιές και σκοτεινές επιφάνειες που άλλες μέθοδοι ταξινόμησης συχνά αποτυγχάνουν να ταξινομήσουν σωστά (Feyisa et al, 2014), (Mustafa et.al, 2017). Ο δείκτης υπολογίζεται από τον **τύπο 2.4**:

$$AWEI = 4 * \frac{(GREEN-SWIR2)}{(0.25*NIR+2.75*SWIR1)} \quad (2.4)$$

Παρά την απλότητα της, η χειροκίνητη ψηφιοποίηση αντικαθίστανται όλο και περισσότερο από τις ημιαυτόματες και αυτόματες μεθόδους. Αυτές οι προσεγγίσεις εφαρμόζουν μεθόδους επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων για τη διάκριση μεταξύ ξηράς και νερού μέσω της ομαδοποίησης των εικονοστοιχείων με βάση τις διαφορετικές φασματικές ή οπισθοσκέδασης ιδιότητές τους και στη συνέχεια πραγματοποιείται η εξαγωγή της ακτογραμμής που τα διαχωρίζει. Η εξαγωγή της ακτογραμμής με αυτόν τον τρόπο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα λόγω παράλειψης φασματικά παρόμοιων εικονοστοιχείων (Hayward, 2017).

Υπάρχουν διάφορες αυτοματοποιημένες μέθοδοι ταξινόμησης. Όταν η ταξινόμηση πραγματοποιείται με βάση τη φασματική υπογραφή του κάθε εικονοστοιχείου ξεχωριστά, τότε κάνουμε λόγο για πολυφασματική ταξινόμηση (multispectral classification). Οι μέθοδοι πολυφασματικής ταξινόμησης μπορούν να χωριστούν κύρια σε δύο κατηγορίες:

- **επιβλεπόμενη ταξινόμηση** (supervised classification) όπου ο χρήστης καθορίζει πάνω στην εικόνα περιοχές εκπαίδευσης του αλγορίθμου, η κάθε μια από τις οποίες είναι γνωστό σε ποιά τάξη ανήκει. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος αποδίδει κάθε εικονοστοιχείο στην αντίστοιχη περιοχή ομαδοποίησης στο φασματικό χώρο όπου η φασματική υπογραφή του ταιριάζει καλύτερα. Περιλαμβάνει έναν αριθμό αλγορίθμων ταξινόμησης (κανόνα παραλληλεπιπέδου, ελάχιστης απόστασης, με το κριτήριο της μέγιστης πιθανοφάνειας, μηχανικής μάθησης κ.α).
- **μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση** (unsupervised classification) όπου ο ίδιος ο αλγόριθμος προσδιορίζει τις περιοχές ομαδοποίησης και, με βάση αυτές, κατατάσσει τα εικονοστοιχεία στις διάφορες τάξεις. Η όλη διαδικασία διεκπεραιώνεται εντελώς αυτοματοποιημένα, χωρίς πρότερη γνώση της ύπαρξης ή της φύσης των τάξεων και χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Περιλαμβάνει γενικά έναν αριθμό αλγορίθμων ομαδοποίησης. Για παράδειγμα τους αλγόριθμους k-means και ISODATA (Πετρόπουλος, 2021).

Συνολικά, η **επιβλεπόμενη ταξινόμηση οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα**, αν έχουν οριστεί οι κατάλληλες περιοχές εκπαίδευσης με τη βοήθεια συμπληρωματικών δεδομένων όπως μετρήσεις πεδίου, τοπογραφικοί χάρτες κτλ.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανωτέρω μεθόδων ανίχνευσης και εξαγωγής των ακτογραμμών από δεδομένα Τηλεπισκόπησης συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.3**.

Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων ανίχνευσης και εξαγωγής των ακτογραμμών από δεδομένα Τηλεπισκόπησης (Hayward 2017;Πετρόπουλος 2021)

Μέθοδοι ανίχνευσης και εξαγωγής ακτογραμμών από δεδομένα Τηλεπισκόπησης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χειροκίνητη ψηφιοποίηση επί της οθόνης μέσω φωτοερμηνείας (manual digitizing)	-Απλή μέθοδος	-Χρονοβόρα διαδικασία - Η επιτυχία της εξαρτάται από την εμπειρία του χρήστη
Ημιαυτόματες και αυτόματες προσεγγίσεις μέσω ταξινόμησης εικόνας (image classification) • Επιβλεπόμενη ταξινόμηση →	-Εξοικονόμηση χρόνου/ κόστους και κόπου -Ο χρήστης έχει τον έλεγχο ενός επιλεγμένου μενού κατηγοριών πληροφοριών. -Ο χρήστης δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα της αντιστοίχισης φασματικών κατηγοριών στον τελικό χάρτη με τις κατηγορίες πληροφοριών ενδιαφέροντος. -Ο χρήστης μπορεί να ανιχνεύσει σημαντικά σφάλματα κατά την εξέταση των δεδομένων εκπαίδευσης.	-Ενέχουν κίνδυνο για σημαντικά σφάλματα λόγω παράλειψης φασματικά παρόμοιων εικονοστοιχείων. -Ο χρήστης επιβάλλει μια δομή ταξινόμησης στα δεδομένα. -Τα δεδομένα εκπαίδευσης ορίζονται (ίσως όχι αντιπροσωπευτικά) καταρχήν με αναφορά σε κατηγορίες πληροφοριών και δευτερευόντως με αναφορά στις φασματικές ιδιότητες. -Η επιλογή των δεδομένων εκπαίδευσης μπορεί να είναι χρονοβόρα, δαπανηρή και κουραστική -Δεν αναγνωρίζονται μοναδικές κατηγορίες που δεν υπάρχουν στα δεδομένα εκπαίδευσης (πχ. μικρές περιοχές στην εικόνα ή περιοχές άγνωστες στον χρήστη)

• Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση	→ -Δεν χρειάζεται πρότερη γνώση της περιοχής μελέτης. -Δεν απαιτείται εμπλοκή φυσικού προσώπου στο στάδιο της εκπαίδευσης.	-Οι παραγόμενες κλάσεις δεν ανταποκρίνονται πάντα στις κατηγορίες που ενδιαφέρουν τον χρήστη -Ο χρήστης έχει περιορισμένο – καθόλου έλεγχο στο μενού των κλάσεων και στα χαρακτηριστικά τους.
---	--	--

2.3. Αντιπροσωπευτικές μελέτες

Πλήθος ερευνητικών μελετών και επιστημονικών δημοσιεύσεων έχουν εφαρμόσει τις μεθόδους εντοπισμού και εξαγωγής των ακτογραμμών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (**Ενότητα 2.2**). Πιο συγκεκριμένα:

Οι Ali Kourosch Niya et al. (2013) έλαβαν δορυφορικά δεδομένα TM του 1990 και τα σύγκριναν με δορυφορικά δεδομένα ETM+ του 2000 και του 2005 κατά σειρά προκειμένου να εντοπίσουν αλλαγές στην ακτογραμμή τμήματος του Περσικού κόλπου που εντοπίζεσαι στην Επαρχία Μπουσέρ. Διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας πραγματοποιήθηκαν για την ενίσχυση των αλλαγών από το 1990 έως 2005, μεταξύ αυτών οι εξής: Band math, band ratio, επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, post classification, band selection και masking. Στο πλαίσιο αυτό εφαρμόστηκε και μια νέα προσέγγιση για την εξαγωγή ακτών, η μέθοδος κατωφλιού ιστογράμματος (histogram threshold) μαζί με τεχνικές λόγων καναλιών (band ratio). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ακτογραμμή έχει αλλάξει σημαντικά από το 2001-2005. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, αυτά συγκρίθηκαν με επίγειες παρατηρήσεις. Η ακρίβεια των εξαγμένων ακτογραμμών υπολογίστηκε ως 1,2 pixel (μέγεθος ψηφίδας = 30 m). Όμοια τεχνική εφαρμόστηκε και από τους Alesheikh et al. (2008) για την Λίμνη Urmia, αλλά και από τους Pham Thi Lan et al. (2013) για το Δέλτα του κόκκινου ποταμού στο Βιετνάμ. Οι πρώτοι χρησιμοποίησαν δορυφορικά δεδομένα Landsat 7 ETM+, Landsat 5 TM, Landsat 4 TM από το 1989-2001, ενώ οι δεύτεροι δορυφορικές εικόνες του ALOS/AVNIR-2 και του Landsat για την παρακολούθηση των μορφολογικών αλλαγών των ακτών κατά την περίοδο 1975-2009. Οι Alesheikh et al. (2008) αξιολόγησαν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους, ομοίως με τους Ali Kourosch Niya et al. (2013), συγκρίνοντάς τα με επίγειες παρατηρήσεις. Η ακρίβεια των εξαγμένων ακτογραμμών

υπολογίστηκε ως 1,3 pixel (μέγεθος ψηφίδας = 30 m). Συνολικά η μελέτη κατέληξε πως η έκταση της λίμνης μειώθηκε περίπου 1040 km² από τον Αύγουστο 1998 έως τον Αύγουστο 2001. Αυτό το αποτέλεσμα επαληθεύτηκε μάλιστα και μέσω δορυφορικών πληροφοριών TOPEX/Poseidon που υπέδειξαν διακύμανση του ύψους της λίμνης της τάξης των τριών μέτρων.

Οι Louati et.al (2014), πραγματοποίησαν μια αξιολόγηση των αλλαγών της ακτογραμμής στο παράκτιο δέλτα Medjerda στην Βορειανατολική Τυνησία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν οκτώ (8) σκηνές του Landsat Multispectral Scanner, TM, ETM+ που καλύπτουν την περίοδο μεταξύ 1972 και 2013, για την οριοθέτηση της θέσης της ακτογραμμής και την εκτίμηση των ρυθμών μεταβολής της. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε βασίστηκε σε τεχνικές επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιούν το IDRISI λογισμικό και το πρόσθετο Digital Shoreline Analysis System (DSAS), το οποίο παρέχει ένα σύνολο εργαλείων που επιτρέπουν τον υπολογισμό της μετατόπισης της ακτογραμμής βάσει διατομών. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές αλλαγές της ακτογραμμής από 8.6 – 42.6 m/yr., ενώ ορισμένα σημεία της ακτογραμμής παρέμειναν σταθερά κατά τη διάρκεια του χρόνου. Οι εκτιμώμενοι ρυθμοί μεταβολής της ακτογραμμής ήταν ανάλογοι με τις επι τόπιες μετρήσεις που ελήφθησαν για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων στην περιοχή αλλά και με τα αποτελέσματα από την ανάλυση αεροφωτογραφιών πολλαπλών ημερομηνιών και τοπογραφικών φύλλων.

Οι Πετρόπουλος κ.α. (2014) διερεύνησαν τις αλλαγές των δύο μεσογειακών δέλτα που σχηματίζονται από τους ποταμούς Αξιού και Αλιάκμονα στην Βόρεια Ελλάδα (περιοχή μελέτης και της παρούσας εργασία), σε μια περίοδο 25 ετών (1984–2009). Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε άμεση φωτοερμηνεία τεσσάρων εικόνων Landsat TM που ελήφθησαν κατά την περίοδο της μελέτης ενώ εφαρμόστηκε και μια εξελιγμένη, μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας που βασίζεται σε μηχανική μάθηση (SVMs) για τον εξορθολογισμό της διαδικασίας χαρτογράφησης. Η άμεση φωτοερμηνεία έδειξε αξιοσημείωτες αλλαγές στα δέλτα των ακτών και των δύο περιοχών μελέτης, με τη διάβρωση να εμφανίζεται κυρίως στις προηγούμενες περιόδους (1990-2003) και στα δύο δέλτα ποταμών, ακολουθούμενη από εναπόθεση τα πιο πρόσφατα χρόνια (2003-2009). Τα χωρικά μοτίβα των αλλαγών της

ακτογραμμής που προβλέφθηκαν από τα SVMs παρουσίασαν παρόμοιες τάσεις. Οι προβλέψεις του SVMs για τη διάβρωση και την εναπόθεση ιζημάτων στην υπό μελέτη περιοχή ήταν διαφορετικές της τάξης του 5-20% σε σύγκριση με τη φωτοερμηνεία. Αυτό απέδειξε την ενδεχόμενη ικανότητα αυτής της μεθόδου στην παράκτια χαρτογράφηση των αλλαγών της ακτογραμμής καθώς από όσο είναι γνωστό η χρήση αυτής της τεχνικής δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς σε αυτόν τον τομέα εφαρμογής.

Στην μελέτη των Gulcan Sarp και Mehmet Ozcelik (2016), οι χωροχρονικές αλλαγές στη λίμνη Burdur στην Τουρκία από το 1987 έως το 2011 αξιολογήθηκαν με χρήση διαχρονικών εικόνων Landsat TM και ETM+. Για τον διαχωρισμό του νερού από το έδαφος και την εξαγωγή της ακτογραμμής από τις δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιήθηκε η τεχνική επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας που βασίζεται σε μηχανική μάθηση (SVMs) και έπειτα οι φασματικοί δείκτες νερού NDWI, MNDWI και AWEI. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτής της τεχνικής έδειξαν μια έντονη καθοδική τάση της επιφάνειας μεταξύ του 1987 και του 2011, και συγκεκριμένα από το 1987 ως το 2000, όπου η λίμνη έχασε περίπου το ένα πέμπτο της επιφάνειάς της συγκριτικά με το 1987. Συνολικά η τεχνική αυτή έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα μεταξύ όλων των τεχνικών όσον αφορά τη φασματική και χωρική τους ποιότητα.

Οι Naila Matin και Jahid Hasan (2021) ανέλυσαν στην δημοσίευσή τους τη δυναμική της ακτογραμμής του Μπαγκλαντές τα τελευταία τριάντα χρόνια, προκειμένου να προσδιοριστούν οι αλλαγές θέσης λόγω διάβρωσης και απόθεσης. Διαχρονικά δεδομένα Landsat (30 m) και συγκρίσιμες παλιρροϊκές συνθήκες, συλλέχθηκαν **ανά πέντε έτη** για την περίοδο 1989–2019. Στη συνέχεια, οι ακτογραμμές ψηφιοποιήθηκαν χειροκίνητα και πραγματοποιήθηκε ανάλυση βασισμένη σε διατομές χρησιμοποιώντας το πρόσθετο DSAS του λογισμικού ArcGIS. Ρυθμοί αλλαγής της ακτογραμμής και καθαρή κίνηση κατά μήκος των διατομών προσδιορίστηκαν για τις τρεις διαφορετικές παράκτιες ζώνες της χώρας, με την μεταβλητότητα της κεντρικής ζώνης να είναι υψηλότερη σε σχέση με τις άλλες δύο (διάβρωση πάνω από 120 m/χρόνο και απόθεση πάνω από 230 m/χρόνο). Η δυτική ζώνη παρέμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια των χρόνων και η ανατολική ζώνη παρουσίαζε σημαντικές αλλαγές σε ορισμένα σημεία τοπικά.

2.4. Σύνδεση με τους στόχους της εργασίας

Βάσει της βιβλιογραφικής επισκόπησης των προηγούμενων ενοτήτων είναι κατανοητό πως οι **σύγχρονες τεχνικές Τηλεπισκόπησης** δίδουν τη δυνατότητα **συνεχούς, οικονομικής και με συνοπτικό τρόπο παρακολούθησης των ακτών** σε μια σειρά χωρικών, φασματικών και χρονικών κλιμάκων έχοντας πολλά πλεονεκτήματα έναντι παραδοσιακών μεθόδων (Hayward, 2017). Σημαντικότερα εξ' αυτών είναι η εξοικονόμηση σημαντικού χρόνου και κόστους από εργασίες υπαίθρου, η συνοπτική εικόνα της περιοχής μελέτης που αποδίδουν τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης και η συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη της περιοχής επιτρέποντας την παρατήρηση μικρών εποχικών αλλαγών (Παρχαρίδης, 2015). Η **ανάλυση ψηφιακών πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων υψηλής διακριτικής ικανότητας**, μπορεί να αποτελέσει μάλιστα ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση του ρυθμού της μεταβολής μιας ακτογραμμής και ιδιαίτερα της ταχύτητας διάβρωσής της (Τσώκος κ.α). Έχοντας τα ανωτέρω υπόψη, επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη να αναλυθούν πολυφασματικές εικόνες του δορυφόρου Landsat (4-5 TM και 8-9 OLI/TIRS) για μια περίοδο 25 ετών (από το 1995-2020) και να εφαρμοστεί μια **ημιαυτόματη μέθοδος ταξινόμησης εικόνας (SVM)** και όχι άλλες παραδοσιακές μέθοδοι για την αποτύπωση των ακτογραμμών. Άλλωστε, η ημιαυτόματη μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης που επιλέχθηκε θεωρήθηκε η κατάλληλη καθώς δίδει τη δυνατότητα στον χρήστη να έχει τον έλεγχο των τάξεων και να μπορεί να ανιχνεύσει σημαντικά σφάλματα κατά την εξέταση των δεδομένων εκπαίδευσης (Πετρόπουλος, 2021). Από τις αντιπροσωπευτικές μελέτες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (2.3) γίνεται σαφές ότι η **αξιοποίηση επίγειων μετρήσεων** για την αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αυτόματες και ημιαυτόματες τεχνικές ανίχνευσης των ακτογραμμών, αποτελεί ακόμα **κοινή προσέγγιση** των περισσότερων ερευνητών (Alesheikh et al., 2008; Ali Kourosh Niya et al., 2013; Louati et.al, 2014). Ωστόσο, η λήψη επίγειων μετρήσεων δεν είναι πάντα εφικτή, ιδίως στο πλαίσιο ερευνών που βασίζονται αποκλειστικά σε εργασία γραφείου, όπως η παρούσα. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε να υλοποιηθεί συμπληρωματικά η τεχνική της κλασσικής ψηφιοποίησης για της αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την

ημιαυτόματη μέθοδος ταξινόμησης εικόνας (SVM). Περαιτέρω, ως προς τα εργαλεία γεωπληροφορικής, στα οποία γίνεται λόγος στην πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία, το πρόσθετο **DSAS** του λογισμικού ArcGIS αποτελεί μια **συχνή προσέγγιση από πολλούς ερευνητές, για την μελέτη φαινομένων διάβρωσης και συσσώρευσης κατά μήκος των ακτογραμμών** (Louati et.al, 2014; Sutikno et.al, 2016; Naila Matin & Jahid Hasan, 2021), για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να αξιοποιηθεί και στην παρούσα μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. Επιλογή περιοχής μελέτης

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή των Δέλτα των ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα στη Βόρεια Ελλάδα για ποικίλους λόγους. Πρώτον, η περιοχή μελέτης δεν έχει μελετηθεί επαρκώς από την επιστημονική κοινότητα και οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί αναφορικά με την μεταβλητότητα της ακτογραμμής είναι περιορισμένες (Petrooulos et.al, 2015; Demertzi et.al, 2022). Δεύτερον, είναι χαρακτηριστικό πως η περιοχή αυτή αποτελεί ένα δυναμικό συσσωρευτικό παράκτιο περιβάλλον λόγω της δραστηριότητας των δύο ποταμών, οι οποίοι διακρίνονται για την απόρριψη μεγάλης ποσότητας υδάτων και ιζηματογενούς φορτίου. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα συνεχείς μεταβολές της ακτογραμμής που χρήζουν παρακολούθησης (Bedini E., 2007). Τρίτον, επιλέχθηκε η εν λόγω περιοχή ως περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος μιας και αποτελεί ένα σημαντικό υδροτοπικό σύστημα για την Ελλάδα που φιλοξενεί πλήθος άγριων ζώων και πουλιών, συνεπώς είναι χρήσιμο να παρακολουθούνται συστηματικά οι αλλαγές κατά μήκος της ακτογραμμής για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του τόπου.

3.2. Γεωγραφική τοποθέτηση περιοχής μελέτης

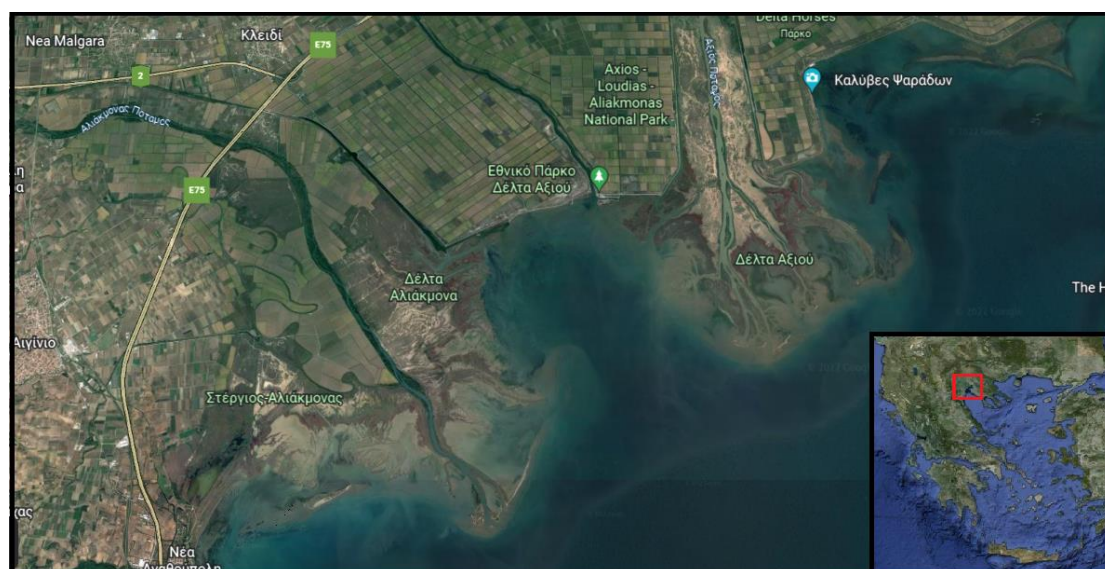
Τα δέλτα του Αξιού και του Αλιάκμονα εντοπίζονται στο βορειοδυτικό τμήμα του Αιγαίου πελάγους ανήκουν στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Μακεδονίας.

Ο ποταμός Αξιός αποτελεί τον μεγαλύτερο ποταμό της Μακεδονίας και τον δεύτερο μεγαλύτερο ποταμό των Βαλκανίων έχοντας συνολικό μήκος 380 km, εκ των οποίων μόνο ένα μέρος (76 km) διατρέχει ελληνικά εδάφη. Πηγάζει από την Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας, και από το όρος Βαρνούντα στον νομό Φλώρινας και εκβάλλει στον Θερμαϊκό κόλπο τροφοδοτώντας τον με γλυκό νερό και ιζήματα¹.

Ο ποταμός Αλιάκμονας είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Ελλάδας με συνολικό μήκος 322 km. Διασχίζει τις ελληνικές περιοχές της Δυτικής Μακεδονίας (Περιφερειακές

¹ www.axiosdelta.gr (Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)

Ενότητες Καστοριάς, Γρεβενών και Κοζάνης) και Κεντρικής Μακεδονίας (Περιφερειακές Ενότητες Ημαθίας και Πιερίας). Πηγάζει από τον Γράμμο και το Βόιο και εκβάλλει στον Θερμαϊκό κόλπο δυτικά του δέλτα του Αξιού (Petropoulos et.al., 2014).



Εικόνα 3.1: Γεωγραφική τοποθέτηση περιοχής μελέτης (Google Earth)

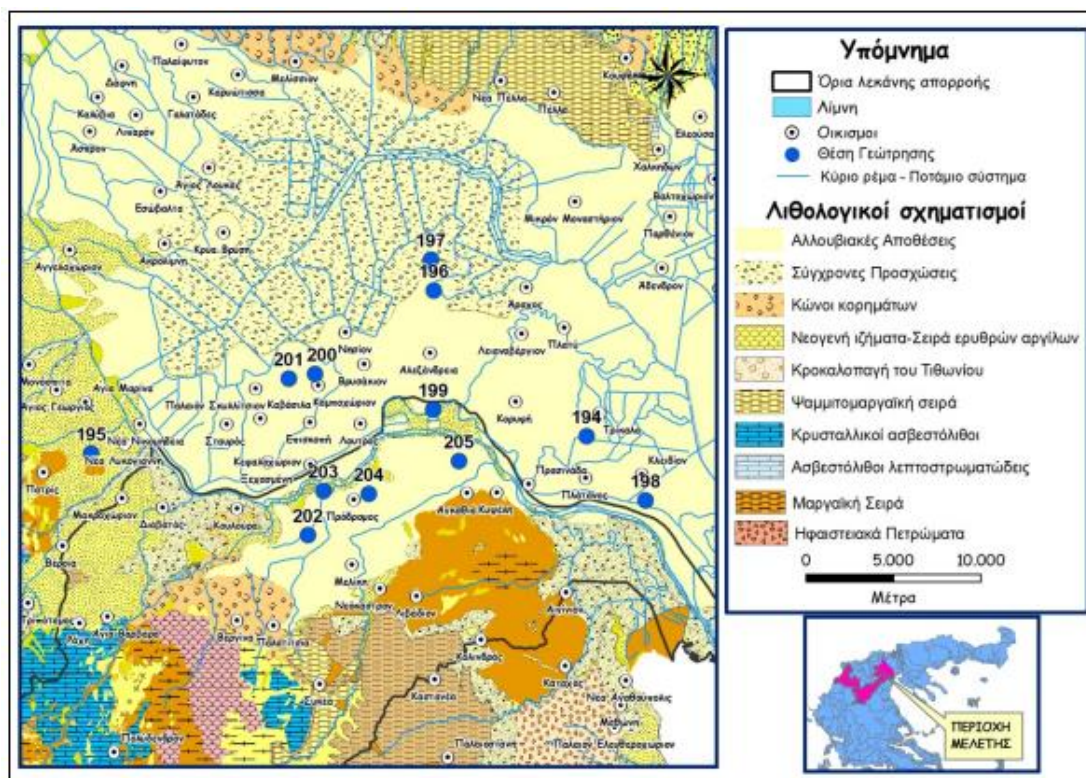
3.3. Υδρογραφικό δίκτυο και Λεκάνες απορροής

Η λεκάνη απορροής του Αλιάκμονα ποταμού αναμφίβολα αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες σε έκταση λεκάνες της Ελλάδας με συνολική έκταση 6,500 km². Η εν λόγω λεκάνη διαχωρίζεται σε επιμέρους υπο-λεκάνες: άνω ρου (τμήμα αυτής είναι και η υπολεκάνη Καστοριάς) και κάτω ρου (στην οποία συμπεριλαμβάνεται και το ανατολικό Βέρμιο). Η υδρολογική λεκάνη κάτω ρου του Αλιάκμονα έχει εμβαδό 435,88 km² και χαρακτηρίζεται από χαμηλό υψόμετρο και ήπιο ανάγλυφο (Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013). Αναφορικά με την λεκάνη απορροής του Αξιού ποταμού, αυτή βρίσκεται στο κέντρο της Βαλκανικής Χερσονήσου, έχει συνολική έκταση 24.615 km² εκ των οποίων τα 2.925 km² ανήκουν στην Ελλάδα και οριοθετείται από τους λοφώδεις σχηματισμούς βόρεια του Πευκοδάσους και της αρχαίας Αταλάντης. Ο Αξίος είναι ένας ποταμός που χαρακτηρίζεται από μικρή κλίση της κοίτης του, μαιανδρισμούς καθώς και από τον σχηματισμό ποτάμιων αναβαθμίδων λόγω της πλευρικής δράσης του (Μέργου, 2011). Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό, δενδριτικής μορφής και η μορφή του σύνθετη, αφού οι μορφές των επί μέρους

υδρορεμάτων είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Επιγραμματικά τα κύρια υδρορεύματα - κλάδοι του ποταμού Αξιού είναι τα εξής: Αγιάκ, Μπαγιαλτζά, Ρέμα Λεβεντοχωρίου – Γυναικοκάστρου, Κοτζά ρέμα, Ρέμα Γοργόπης, Πλατανόρεμα, Ρέμα Ομαλού, Ρέμα Σκρά – Χαμηλού (Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013).

3.4. Γεωλογία – Υδρογεωλογία

Το πεδινό τμήμα της λεκάνης απορροής του Αλιάκμονα ποταμού είναι πληρωμένο με Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα. Τα Τεταρτογενή ιζήματα, Ολοκαινικής ηλικίας, αποτελούνται από αποθέσεις λεπτόκοκκων άμμων, αργιλούχων πηλών, πηλών, κροκαλολατύπες, και από υλικά χειμαρρωδών αναβαθμίδων μικρού πάχους. Στην λεκάνη εντοπίζονται και Πλειστοκαινικά Τεταρτογενή ιζήματα πάχους άνω των 100 m, τα οποία εκτός από την πεδινή και λοφώδη περιοχή του δυτικού τμήματος της λεκάνης εντοπίζονται και στο βόρειο τμήμα της (πρόποδες Πάϊκου) και διακρίνονται σε κώνους κορημάτων, ασβεστολιθικό λατυποπαγές, ογκόλιθους, κώνους χειμαρρωδών αποθέσεων, κολλουβιακές αποθέσεις και αποθέσεις ποταμοχειμαρρώδους προέλευσης. Όσον αφορά τις Άνω Μειοκαινικής-Κάτω Πλειοκαινικής ηλικίας αποθέσεις που εντοπίζονται στην λεκάνη, κυρίως στη λοφώδη περιοχή μεταξύ Άνυδρου – Μάνδαλου καθώς και δυτικά- βόρεια της Σκύδρας, αυτές διακρίνονται σε τόφφους, τοφφίτες και λασπορροές ενώ στην περιοχή Βεροίας εμφανίζονται ασβεστιτικοί τόφφοι με πορώδη υφή και ψαμμιτικές παρεμβολές (Υ.Α.Α.Τ/ ΠΑΑ 2007-2013).



Εικόνα 3.2: Γεωλογικός χάρτης υπολεκάνης (κάτω ρου) Αλιάκμονα ποταμού (Πηγή: Υ.Α.Α.Τ/ ΠΑΑ 2007-2013: σελ. 13-6)

Αναφορικά με την λεκάνη του Αξιού αυτή ανήκει γεωτεκτονικά στην ενότητα του Αξιού, η οποία διακρίνεται σε τρεις επιμέρους υποενότητες, το ανατολικό μέτωπο «Αύλακα Παιονίας», το κεντρικό τμήμα «Υβωμα Πάικου» και το δυτικό περιθώριο «Αύλακα Αλμωπίας». Το ελληνικό τμήμα της Λεκάνης Αξιού εντοπίζεται στις δυο πρώτες υποενότητες. Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από μεταμορφωμένα κυρίως πετρώματα που ανήκουν στις παραπάνω δυο υποζώνες, τα οποία καλύπτονται από τριτογενή και τεταρτογενή ιζήματα.

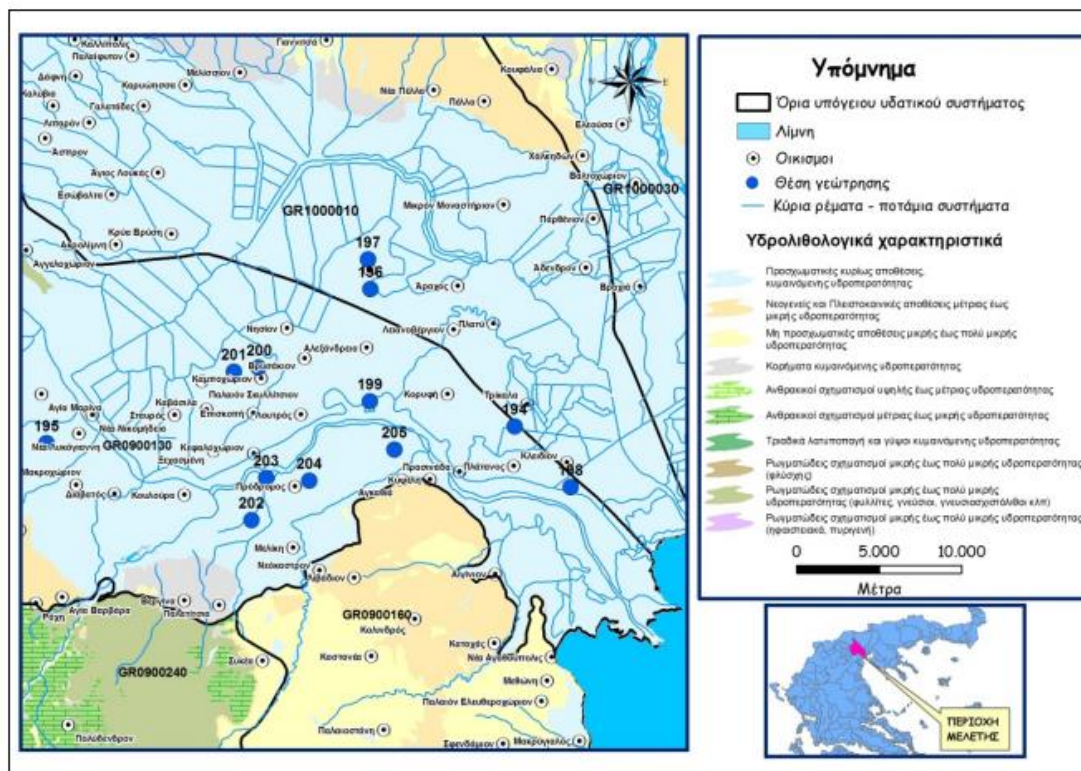
Από **υδρογεωλογικής άποψης, στη λεκάνη απορροής του Αλιάκμονα ποταμού υπάρχουν δύο υπόγεια υδατικά συστήματα**, το GR1000010 – Κοκκώδες σύστημα Λουδία και το GR0900130 - Κοκκώδες Σύστημα Κάτω ρου Αλιάκμονα. Οι τρεις βασικές υπόγειες υδροφορίες εντοπίζονται στην περιοχή του κάτω ρου του Αλιάκμονα και συγκεκριμένα:

- Ελεύθεροι υδροφορείς με επιφάνεια μέχρι του βάθους των 10 μέτρων.

- Υπό πίεση έως μερικώς υπό πίεση υδροφορείς με διακύμανση του βάθους της πιεζομετρικής επιφάνειας από 40 έως 60 μέτρα.
- Υπό πίεση υδροφορείς βάθους από 100 έως 200 μέτρα (Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013).

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αναπτύσσονται σε αλλουβιακές αποθέσεις βάθους ως 100 m και η τρίτη κατηγορία σε λιμνοθαλάσσια ιζήματα μεγάλου πάχους. Οι υδροφορείς αυτοί αποτελούνται από λιθολογικής άποψης, από χάλικες, κροκάλες, άμμους θαλάσσιας και χερσοποτάμιας προέλευσης. Το δυναμικό των υδροφορέων θεωρείται αξιόλογο ενώ η τροφοδοσία τους επιτελείται κύρια από τον Αξίο ποταμό, τον Αλιάκμονα αλλά και με πλευρικές μεταγίσεις από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του μετώπου Χαλκηδόνας-Ν. Πέλλας (Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013).

Αντίστοιχα, **στην λεκάνη απορροής του Αξίου εντοπίζονται τρία υπόγεια υδατικά συστήματα** που σχετίζονται με επιφανειακά ύδατα, το GR1000030 - Κοκκώδες Σύστημα Αξίου, το GR100F250 - Κοκκώδες Σύστημα Ποντοηράκλειας και το GR0900130 - Κοκκώδες Σύστημα Ασπρόλακκα.

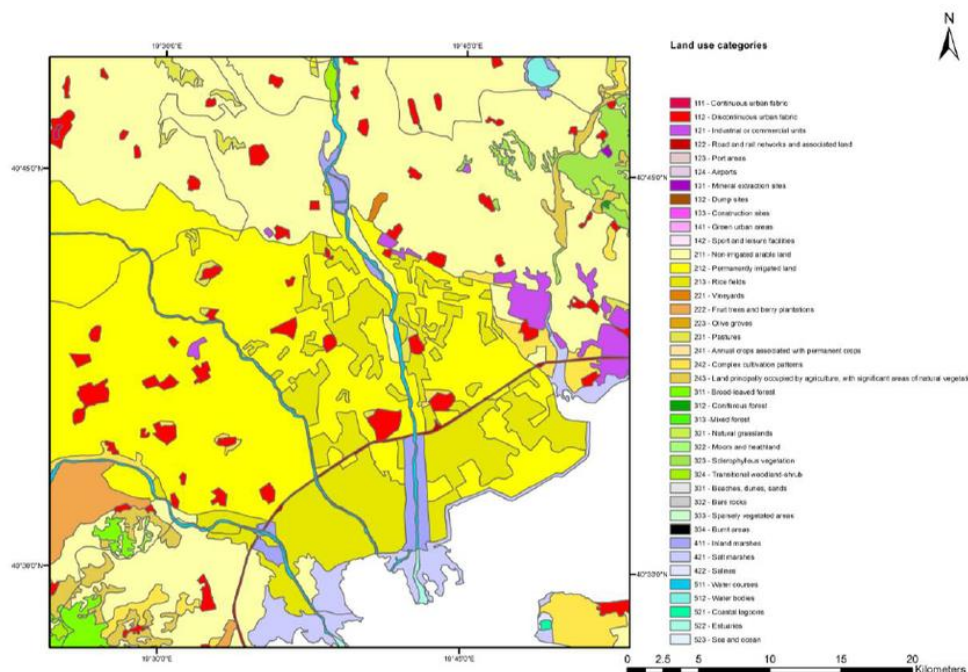


Εικόνα 3.3: Υδρολιθολογικός χάρτης μέρους της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πηγή: Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013: σελ. 13-8)

Συνοπτικά τα υπόγεια υδατικά συστήματα που εντοπίζονται συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης είναι τα εξής: GR1000010, GR0900130 και GR1000030. Αξιοσημείωτο είναι πως στα συστήματα υπόγειων υδροφοριών GR1000010 και GR0900130, διακινούνται υπόγεια ποσότητες νερού της τάξης των $229 \times 106 \text{ m}^3$ σε ετήσια βάση (Υ.Α.Α.Τ/ΠΑΑ 2007-2013).

3.5. Χρήσεις γης

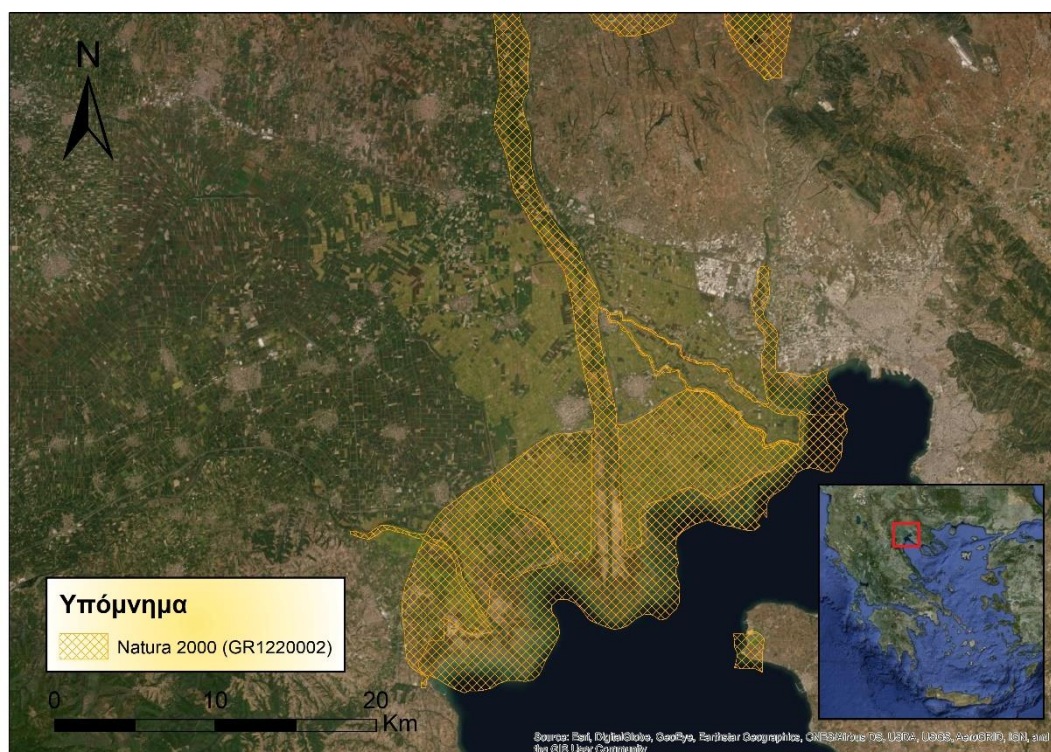
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από την **ύπαρξη έντονης γεωργικής δραστηριότητας** η οποία αποτελεί σημαντικό οικονομικό τομέα αλλά και κύριο παράγοντα ρύπανσης των υδάτων. Το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνεται από καλλιέργειες ρυζιού ενώ σε μικρότερο ποσοστό εντοπίζονται καλλιέργειες σιτηρών, βαμβάκι, δενδρώδεις καλλιέργειες, αμπελώνες και άλλες πολυετείς φυτείες. Η κτηνοτροφία, λόγω της απόδοσης μεγάλων εκτάσεων στη γεωργία, χαρακτηρίζεται από σημαντική μείωση του αριθμού των εκμεταλλεύσεων, τόσο στη βοοτροφία, όσο και στην αιγοπροβατοτροφία. Ο περιορισμός των βοσκοτόπων έχει ως αποτέλεσμα η κτηνοτροφία να ασκείται σε μία στενή λωρίδα κατά μήκος της κοίτης και στην παραλιακή ζώνη δημιουργώντας προβλήματα υπερβόσκησης. Ως προς την δραστηριοποίηση της βιομηχανίας, αυτή είναι λιγότερο ανεπτυγμένη στο ελληνικό κομμάτι, αφορώντας κυρίως βιοτεχνίες κατά μήκος του ποταμού και ιδιαίτερα στις εκβολές αυτού, μεταξύ του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης και της περιοχής του δέλτα Αξιού-Λουδία-Αλιάκμονα (Μέργου, 2011).



Εικόνα 3.4: Καλύψεις γης ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πηγή: Papoutsis et.al, 2015: σελ. 5)

3.6. Οικότοποι – θέσεις οικολογικού ενδιαφέροντος

Η περιοχή μελέτης δηλαδή τα δύο μελετώμενα Δέλτα Αξιού και Αλιάκμονα, ανήκουν στην προστατευόμενη περιοχή Natura 2000 με κωδικό GR1220002 και ονομασία Δέλτα Αξιού – Λουδία – Αλιάκμονα – Ευρύτερη περιοχή – Αξιούπολη. Η περιοχή GR1220002 περιλαμβάνει εκτός από το Δέλτα του ποταμού Αξιού και Αλιάκμονα, τα Δέλτα των ποταμών Λουδία και Γαλλικού καθώς και την κοίτη του Αξιού η οποία χαρακτηρίζεται από δάση ιτιάς και σχηματισμούς με αρμυρίκια, ενώ στα Δέλτα των ποταμών εμφανίζεται πληθώρα τύπων βλάστησης υφάλμυρων υγροτόπων. Συνολικά όλη η προστατευόμενη περιοχή έχει έκταση 41.495,69 ha, αποτελεί Τόπο Κοινοτικής Σημασίας (SCI) και για την προστασία της υπεύθυνος είναι ο Εθνικός Φορέας Διαχείρισης Δέλτα Αξιού – Λουδία – Αλιάκμονα (Φραγκάκης, 2019).



Εικόνα 3.5: GR1220002 - Δέλτα Αλιάκμονα και Αξιού. Προετοιμασία σε ArcGIS 10.5. Δεδομένα από geodata.gov.gr, Υπόβαθρο: ESRI, 2021

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά τα δεδομένα που ελήφθησαν και οι πηγές αυτών καθώς και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Περαιτέρω δε παρουσιάζεται όλη η μεθοδολογική προσέγγιση, από την προ-επεξεργασία και επεξεργασία των δεδομένων μέχρι την τελική ανάπτυξη του Web GIS.

4.1. Δεδομένα Τηλεπισκόπησης

Πρωτογενή δεδομένα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσαν έξι (6) δορυφορικές **εικόνες Landsat 4-5 TM και Landsat 8-9 OLI/TIRS** οι οποίες ανακτήθηκαν από την ανοικτή βάση δεδομένων [Earth Explorer](https://earthexplorer.usgs.gov/) του USGS. Συγκεκριμένα, οι εικόνες με τους παρακάτω κωδικούς:

LT05_L2SP_184032_19950623_20200913_02_T1 (Ημερομηνία: 23/06/1995)

LT05_L2SP_184032_20000706_20200907_02_T1 (Ημερομηνία: 06/07/2000)

LT05_L2SP_184032_20050720_20200902_02_T1 (Ημερομηνία: 20/07/2005)

LT05_L2SP_184032_20100819_20200824_02_T1 (Ημερομηνία: 19/08/2010)

LC08_L2SP_184032_20150801_20200909_02_T1 (Ημερομηνία: 01/08/2015)

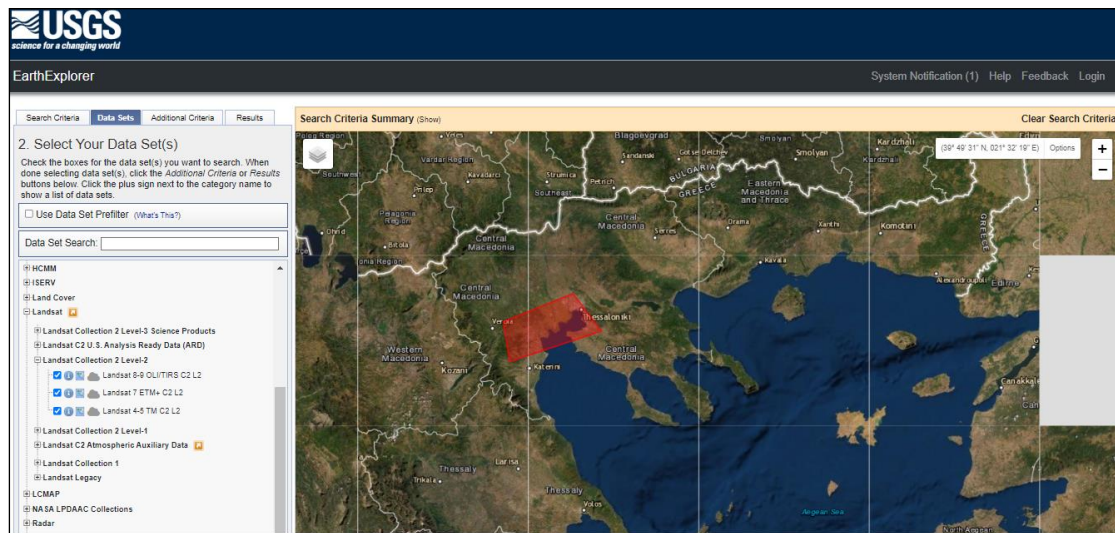
LC08_L2SP_184032_20200830_20200906_02_T1 (Ημερομηνία: 30/08/2020)

Όλες οι εικόνες ανακτήθηκαν από την 2^η συλλογή Landsat – προϊόντα Level 2 (**Landsat Collection 2 – Level 2 products**) η οποία σηματοδοτεί τη δεύτερη σημαντική επανεπεξεργασία του αρχείου Landsat του USGS. Η Landsat Collection 2 παρουσιάζει βελτιώσεις, σε σχέση με την 1^η συλλογή (Landsat Collection 1), αξιοποιώντας τις πρόσφατες εξελίξεις στην επεξεργασία δεδομένων, την ανάπτυξη αλγορίθμων, την πρόσβαση στα δεδομένα και τις δυνατότητες διανομής. Παράλληλα τα προϊόντα Level 2 παράγονται από προϊόντα L1GT² και L1TP³ Level 1 που πληρούν τον περιορισμό γωνίας ηλιακού ζενίθ <76° και περιλαμβάνουν τις απαιτούμενες βοηθητικές εισροές δεδομένων για τη δημιουργία ενός επιστημονικά βιώσιμου προϊόντος. Τα προϊόντα level 2 που δημιουργούνται μπορεί να είναι L2SP ή L2SR. Εν

² L1TP - Level 1 Systematic Terrain (Corrected) (L1GT) products

³ Level 1 Precision Terrain (Corrected) (L1T) products

τω προκειμένων και οι 6 εικόνες που ανακτήθηκαν ήταν προϊόντα L2SP - Level 2 Science Products (USGS, 2021).



Εικόνα 4.6: Ανοικτή βάση δεδομένων Earth Explorer του USGS – Επιλογή δεδομένων Landsat Collection 2 – Level 2 για την περιοχή μελέτης

Τα δεδομένα Landsat είναι άλλωστε τα μόνα πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα τα οποία διατίθεται χωρίς κόστος, παρέχοντας συνοπτική κάλυψη της Γης από το 1972. Γι' αυτό το λόγο η χρήση τους έχει διερευνηθεί εκτενώς για διάφορους σκοπούς περιβαλλοντικής παρακολούθησης, μεταξύ των οποίων και οι αλλαγές της ακτογραμμής (Petrooulos et al, 2015). Στην παρούσα μελέτη οι 6 εικόνες επιλέχθηκαν για την περίοδο **1995 – 2020**, ήτοι για διάστημα 25 ετών, και συγκεκριμένα για τα έτη 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 και 2020, ενώ κριτήρια επιλογής αυτών ήταν η:

- ☞ **περίοδος λήψης** τους. Συγκεκριμένα οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων περιορίστηκαν μεταξύ των μηνών Ιούνιο – Αύγουστο (anniversary dates) για κάθε έτος, προκειμένου να επιτευχθούν δεδομένα με πολύ μικρή ως μηδενική νεφοκάλυψη (cloud free images) στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Lillesand and Kiefer, 2004; Wu, 2007).
- ☞ **ύπαρξη ατμοσφαιρικής διόρθωσης των προϊόντων** (Level 2 products).

4.2. Λογισμικά

Για την προεπεξεργασία – επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, τον υπολογισμό του ποσοστού μετατόπισης της ακτογραμμής καθώς και την τελική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά τα λογισμικά **SNAP 7.0**, **ENVI 5.3** και **ArcMap 10.5** και **ArcGIS Online**.

Αναλυτικότερα:

Το [**SNAP**](#) (**Sentinel Application Platform**) είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από τους Brockmann Consult, SkyWatch και C-S. Η αρχιτεκτονική SNAP είναι ιδανική για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων παρατήρησης γης (όπως δεδομένων Sentinel, **Landsat**, PROBA-V) και επιλέχθηκε καθώς αποτελεί ένα ελεύθερο και φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό διαθέσιμο από την ESA.

Το λογισμικό [**ENVI**](#) είναι ένα λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων τηλεπισκόπησης και γεωπληροφορικής. Χρησιμοποιείται από τους επιστήμονες για την εξαγωγή έγκαιρων, αξιόπιστων και ακριβών πληροφοριών από δεδομένα παρατήρησης γης/δορυφορικές εικόνες. Είναι επιστημονικά αποδεδειγμένο, εύκολο στη χρήση και συνδέεται στενά με το λογισμικό ArcGIS της Esri (L3Harris Geospatial Solutions, Inc, 2022). Περιέχει πολλά εύχρηστα εργαλεία που δεν απαιτούν προηγμένη εκπαίδευση και εξειδίκευση στην Τηλεπισκόπηση γι' αυτό το λόγο και επιλέχθηκε για την κυρίως επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων αναφοράς.

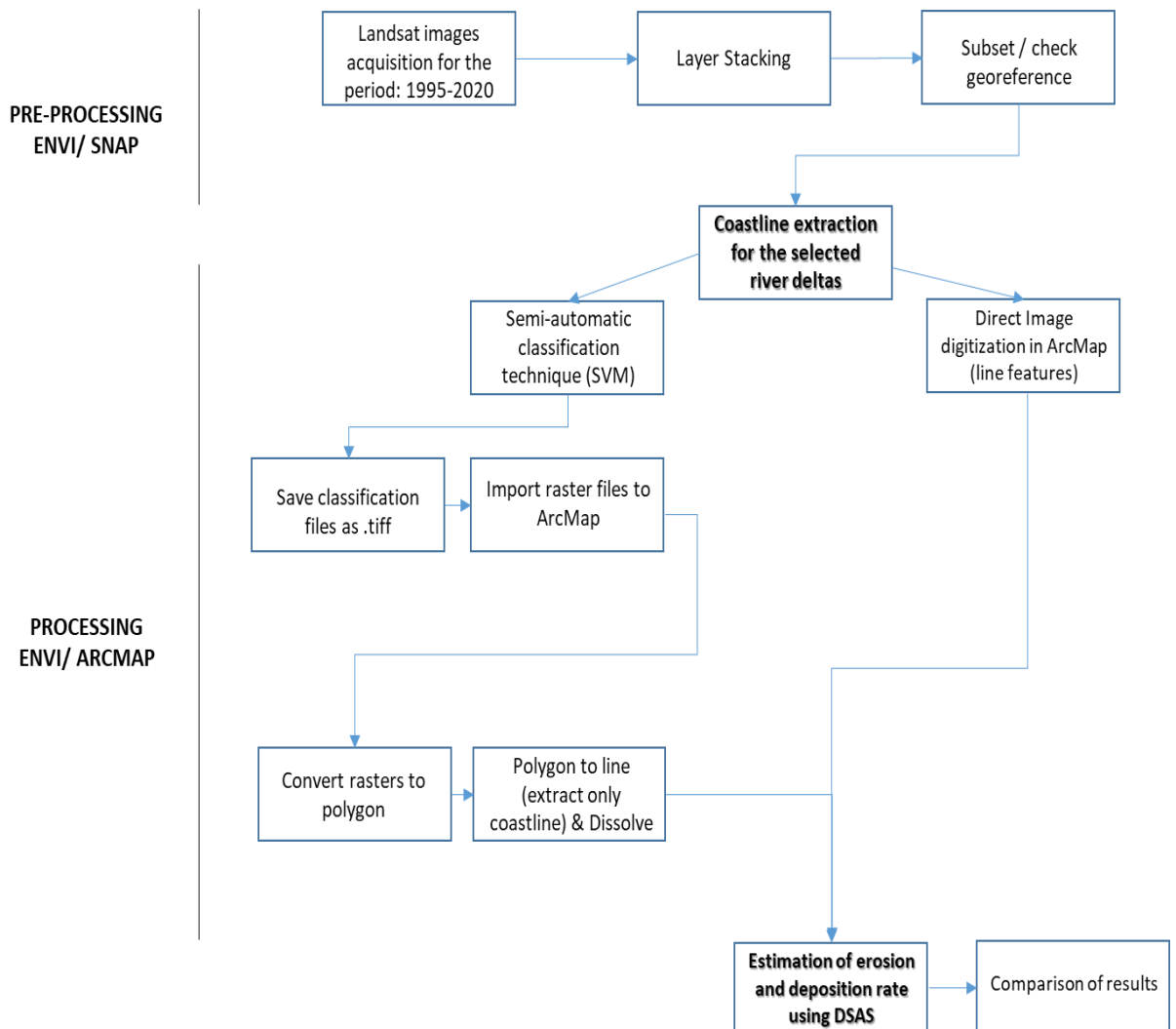
Το **ArcMap** αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο προβολής, επεξεργασίας, δημιουργίας και ανάλυσης γεωχωρικών δεδομένων και κύριο συστατικό της σουίτας προγραμμάτων γεωχωρικής επεξεργασίας ArcGIS της Esri. Το [**ArcMap 10.5**](#) επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία καθώς υποστηρίζει το πρόσθετο DSAS v.5 το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης και απόθεσης των μελετώμενων Δέλτα.

Τέλος, δεδομένου ότι οι σύγχρονες τάσεις δείχνουν μια σταδιακή κατάργηση του ArcMap, για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την δημιουργία του Web-GIS επιλέχθηκε το [**ArcGIS Online**](#). Το ArcGIS Online είναι μια λύση χαρτογράφησης και

ανάλυσης στο cloud, δωρεάν για μη εμπορική χρήση. Οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε περιεχόμενο που κοινοποιεί η ESRI αλλά και άλλοι χρήστες ανά τον κόσμο.

4.3. Μεθοδολογία

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (**Εικόνα 4.7**) παρουσιάζεται βήμα - βήμα η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προεπεξεργασία και κυρίως επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής διαδικασιών (Flow chart)

Τα παραπάνω βήματα περιγράφονται αναλυτικά στα ακόλουθα υποκεφάλαια.

4.3.1. Προ-επεξεργασία εικόνων

Για την διαδικασία της προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά SNAP 7.0 και ENVI 5.3. Το SNAP 7.0 επιλέχθηκε στο στάδιο αυτό δεδομένου ότι αποτελεί ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό και παράλληλα ο χρόνος προ-επεξεργασίας ήταν αρκετά μικρός γεγονός που διευκόλυνε την όλη διαδικασία.

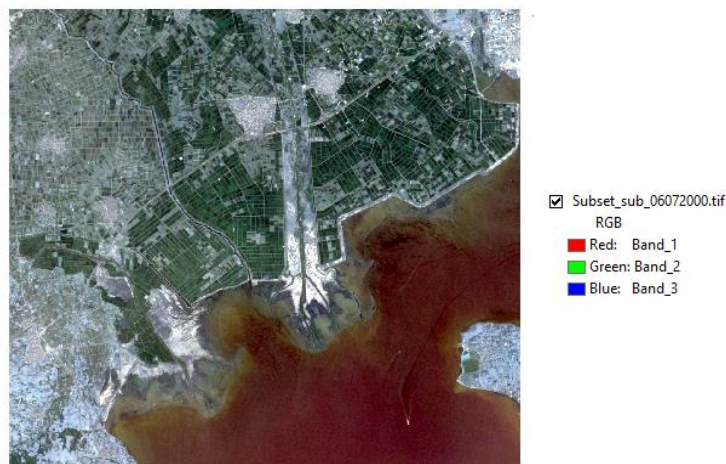
Συγκεκριμένα για κάθε εικόνα ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα προεπεξεργασίας:

- ☞ **Layer stacking μέσω του ENVI 5.3:** όλες οι φασματικές ζώνες εκτός από τη θερμική υπέρυθρη ζώνη (δηλαδή τη ζώνη 6) στοιβάχτηκαν για να σχηματίσουν ένα ενιαίο αρχείο εικόνας που αντιστοιχεί στην ημερομηνία απόκτησης του συνόλου δεδομένων.
- ☞ **Subset μέσω του SNAP 7.0:** για οριοθέτηση της περιοχής μελέτης στις δορυφορικές εικόνες προκειμένου να βελτιωθεί η υπολογιστική απόδοση της επεξεργασίας που θα ακολουθήσει.

Για διευκόλυνση της διαδικασίας οριοθέτησης της μελετώμενης περιοχής χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Graph Builder, το οποίο πραγματοποίησε το Subset με 1 διαδικασία και το Batch processing, το οποίο χρησιμοποίησε το Graph Builder για να τρέξει την επεξεργασία για παραπάνω από 1 δορυφορικές εικόνες ταυτόχρονα (6 εικόνες στην περίπτωση μας).

- ☞ **Έλεγχος γεωαναφοράς** μέσω του εργαλείου Cursor value/ Crosshairs του ENVI 5.3. Συγκεκριμένα ελέγχθηκαν οι συντεταγμένες Χ/Υ στις τέσσερις γωνίες της κάθε εικόνας. Από την διαδικασία αυτή προέκυψε ότι κάθε εικόνα έχει τις ίδιες ακριβώς συντεταγμένες (πάνω δεξιά γωνία: 40°39'55.68"N, 22°31'39.09"E, πάνω αριστερή γωνία: 40°39'38.19"N, 22°51'34.39"E, κάτω δεξιά γωνία: 40°26'21.65"N, 22°31'20.54"E και κάτω αριστερή γωνία: 40°26'4.32"N, 22°51'11.84"E) και τα pixel των εικόνων ταυτίζονται. Να σημειωθεί ότι οι εικόνες Landsat είναι ήδη γεωαναφερμένες και κατά τη διάρκεια του subset προσέξαμε ώστε όλες οι εικόνες να οριοθετηθούν με συγκεκριμένες συντεταγμένες αναφοράς.

Ατμοσφαιρική διόρθωση δεν απαιτήθηκε αφού τα δεδομένα ήταν ήδη ατμοσφαιρικά διορθωμένα (Level 2 products). Ωστόσο, μια εμπειρική γραμμική κανονικοποίηση (empirical line normalization) εφαρμόστηκε σε όλες τις εικόνες, χρησιμοποιώντας την εικόνα του 1995 ως βάση, προκειμένου να διορθωθούν οι διακυμάνσεις ανακλαστικότητας εξαιτίας των ηλιακών συνθηκών και της υποβάθμισης της απόδοσης του ανιχνευτή, όπως άλλωστε έχει εφαρμοστεί και σε άλλες δημοσιευμένες μελέτες όπως αυτή των Petropoulos et. al (2015).

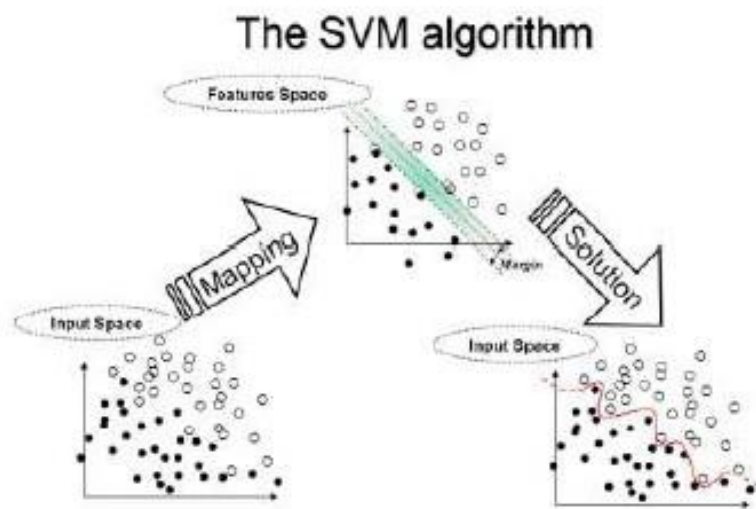


Εικόνα 4.8: RGB εικόνα για το έτος 2000 σε μορφή .tif μετά από προ-επεξεργασία της αρχικής εικόνας.

4.3.2. Εξαγωγή των ακτογραμμών με την μέθοδο επιβλεπόμενης ταξινόμησης SVM

Η τεχνική επιβλεπόμενης ταξινόμησης Support Vector Machine είναι μια τεχνική βασισμένη στην θεωρία της μηχανικής μάθησης και διατυπώθηκε αρχικά από τους Cortes και Vapnik (1995). Είναι μια δυαδική μέθοδος ταξινόμησης που παρέχει διαχωρισμό των τάξεων του δείγματος εκπαίδευσης αναζητώντας το γραμμικό εκείνο όριο (βέλτιστο διαχωριστικό υπερ-επίπεδο) που παρέχει την καλύτερη γενίκευση σε πολυδιάστατο χώρο. Η προσέγγιση ταξινόμησης με SVM στηρίζεται στη δυνατότητα μοντελοποίησης πολύπλοκων, μη- γραμμικών ορίων τάξεων σε πολυδιάστατους χώρους χαρακτηριστικών μέσω της έννοιας των συναρτήσεων kernel. Χαρακτηριστικές τέτοιες συναρτήσεις είναι οι Polynomial-based και Radial Basis Function (RBF) με την δεύτερη να είναι η πιο διαδεδομένη και να χρησιμοποιείται σε

διάφορες μελέτες. Ο αλγόριθμος SVM προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το περιθώριο διαχωρισμού, ήτοι την απόσταση ανάμεσα στα πλησιέστερα δείγματα εκπαίδευσης (Support vectors) και του ίδιου του υπερ-επίπεδου. Αυτά τα διανύσματα (support vectors) προβάλλονται από τον αλγόριθμο στον πολυδιάστατο χώρο ενώ στην συνέχεια εφαρμόζουν το βέλτιστο υπερ-επίπεδο που διαχωρίζει τις τάξεις χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη συνάρτηση kernel (Βατίτση, 2016). Η ανωτέρω διαδικασία αποτυπώνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας SVM (Πηγή: Βατίτση, 2016: σελ.22)

Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου επιβλεπόμενης ταξινόμησης SVM είναι ότι αν και χρησιμοποιεί λίγα σημεία εκπαίδευσης παρέχει υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα, είναι εύκολα υλοποιήσιμη, αποτελεσματική στην διαχείριση δεδομένων μεγάλων διαστάσεων και μπορεί πολύ εύκολα να προσαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων και δομές εισόδου (Πετρόπουλος, 2021).

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κοινώς από τους ερευνητές για την εξαγωγή υδάτινων σωμάτων και ακτογραμμών καθώς μειώνει αποτελεσματικά τα σφάλματα και μεγιστοποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά στις ακμές ενώ παράλληλα απαιτείται πολύ μικρή εκπαίδευση (Sarpa και Ozcelik, 2016).

Βάσει των ανωτέρω, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος ως κύρια μέθοδος για την ανίχνευση των ακτογραμμών των δύο μελετώμενων Δέλτα, ενώ συμπληρωματικά, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο, έγινε και χειροκίνητη ψηφιοποίηση των ακτογραμμών με σκοπό την επαλήθευση και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πρώτης τεχνικής. Οι εικόνες επεξεργάστηκαν στο λογισμικό ENVI. Τα **φασματικά κανάλια 7,4,2** επιλέχθηκαν για την παρουσίαση των εικόνων καθώς δίνουν έναν πιο αποτελεσματικό διαχωρισμό μεταξύ ξηράς και θάλασσας (Petroopoulos et.al, 2015).

Για τον καθορισμό των training data regions χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Region of Interest (ROI). Επιλέχθηκαν δύο κατηγορίες (“land” και “water”) και για κάθε μία λήφθηκε ένας σημαντικός αριθμός αντιπροσωπευτικών ROIs. Τα ROIs για κάθε κατηγορία επιλέχθηκαν έχοντας κατανοήσει οπτικά την περιοχή μελέτης μέσω Google Earth και λαμβάνοντας υπόψη τις φασματικές υπογραφές που προέκυψαν σε διάφορα τυχαία σημεία με την λειτουργία Z-profile. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικές περιοχές ενδιαφέροντος για τμήμα της μελετώμενης περιοχής για την εικόνα του έτους 2020 (**Εικόνα 4.10**).



Εικόνα 4.10: Περιοχές εκπαίδευσης αλγορίθμου ταξινόμησης (training ROIs) στο Δέλτα του Αξιού ποταμού (έτος αναφοράς 2020)

Αξίζει να σημειωθεί πως στο στάδιο αυτό η φασματική διαχωριστικότητα (spectral seperability) εξετάστηκε για κάθε εικόνα, μέσω του εργαλείου **ROI tools → Options → Compute ROIs seperability** και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Εν συνεχεία για τα επιλεγμένα training data regions εφαρμόστηκε η τεχνική επιβλεπόμενης ταξινόμησης SVM. Στις επιλογές του εργαλείου ορίστηκαν τα εξής:

- ☞ **Kernel Type:** Radial Basis Function. Επιλέχθηκε αυτός ο τύπος δεδομένου ότι απαιτείται ο καθορισμός ελάχιστων παραμέτρων για την εκτέλεσή του και έχει αποδειχθεί άλλωστε ότι σε γενικές γραμμές παράγει πολύ καλά αποτελέσματα σε ένα μεγάλο φάσμα μελετών ταξινόμησης (Petroopoulos et.al, 2014)
- ☞ **Παράμετρος γ :** βάσει θεωρίας η παράμετρος γ ορίζεται από τον χρήστη και είναι ίση με το αντίστροφο του αριθμού των φασματικών καναλιών της κάθε εικόνας, οπότε στις περιπτώσεις των 6 εικόνων που μελετήθηκαν ορίστηκε η τιμή 0,167 (Petroopoulos et.al, 2014).
- ☞ **Παράμετρος C** (Penalty parameter): εκφράζει τον όρο του σφάλματος και μπορεί να θεωρηθεί ως ο βαθμός σωστής ταξινόμησης ή ο βαθμός βελτιστοποίησης που πρέπει να πληροί ο αλγόριθμος. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η παράμετρος τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ο βελτιστοποιητής SVM να ταξινομήσει εσφαλμένα οποιοδήποτε σημείο. Στην περίπτωση μας ορίστηκε η τιμή 100 (η μέγιστη τιμή που μπορούσε να δοθεί) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σφάλματος.
- ☞ **Pyramid Parameter:** Ορίστηκε η τιμή 0. Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικόνα υπέστη επεξεργασία στην πλήρη ανάλυσή της, ταυτόχρονα όμως ο χρόνος υπολογισμού αυξήθηκε.

Έπειτα από την ταξινόμηση των εικόνων σε δύο κατηγορίες (binary classification), το αποτέλεσμα που προέκυψε για καθεμία από αυτές αποθηκεύτηκε σε μορφή tiff και εισήχθη στο ArcMap προκειμένου να εξαχθούν οι ακτογραμμές για κάθε έτος

αναφοράς σε vector μορφή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **Raster to Polygon**, ενώ με την εντολή **Polygon to Line**, τα πολύγωνα μετατράπηκαν σε γραμμές, αφαιρέθηκαν τα περιττά στοιχεία και απομονώθηκε μόνο η ακτογραμμή γύρω από τα μελετώμενα δέλτα. Έπειτα με την εντολή **Dissolve** ενοποιήθηκαν τα διάφορα γραμμικά μέρη σε μια ενιαία γραμμή που αποτελεί και την ακτογραμμή για κάθε έτος αναφοράς. Ενδεικτικά στην **Εικόνα 4.11** αποτυπώνεται η ακτογραμμή σε μορφή SHP για τα έτη 2000 και 2010 όπως προέκυψε από τις παραπάνω διαδικασίες.



Εικόνα 4.11: Ακτογραμμή που προέκυψε έπειτα από την εκτέλεση του αλγορίθμου επιβλεπόμενης ταξινόμησης (SVM) και την μετατροπή σε vector για τα έτη 2000 και 2010 (κόκκινη γραμμή)

4.3.3. Αξιολόγηση ακρίβειας ταξινόμησης

Η αξιολόγηση της επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι ένα από τα σημαντικότερα στάδια στην εκπόνηση την παρούσας μελέτης. Από το αποτέλεσμα του σταδίου αυτού κρίνεται κατά πόσο καλά «εκπαιδεύτηκε» ο αλγόριθμος για την εκτέλεση της ταξινόμησης, και αναλόγως, είτε αποφασίζεται η βελτίωση της υπάρχουσας ταξινόμησης είτε η διεξαγωγή μιας νέας με μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας (Αργιαλάς Δ., 1994).

Ο πίνακας σφαλμάτων (confusion/error matrix) είναι ο πίνακας που παράγεται από τη διαδικασία της εκτίμησης της ακρίβειας της ταξινόμησης και στον οποίο δίνονται πληροφορίες σχετικά με (Congalton and Green, 2009):

- ☞ την συνολική ακρίβεια (Overall Accuracy),
- ☞ την ακρίβεια του χρήστη (User Accuracy),
- ☞ την ακρίβεια του παραγωγού (Producer Accuracy) και
- ☞ το Kappa ή στατιστικό K.

Η **συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης (overall accuracy)** δείχνει ουσιαστικά το ποσοστό των σωστά ταξινομημένων pixels.

Ο **συντελεστής K (kappa coefficient)** καθορίζει αν τα αποτελέσματα του πίνακα σφαλμάτων είναι σημαντικά καλύτερα από την τυχαία ταξινόμηση. Με άλλα λόγια εκφράζει την αναλογική μείωση του παραγόμενου λάθους από τη διαδικασία της ταξινόμησης με το λάθος της τυχαίας ταξινόμησης. Ο συντελεστής K δίδεται από την **εξίσωση 2.5**.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (2.5)$$

Όπου:

r = αριθμός γραμμών στον πίνακα σφαλμάτων

x_{ii} = αριθμός παρατηρήσεων στην σειρά i στήλη i (στην μεγάλη διαγώνιο)

x_{i+} = σύνολο παρατηρήσεων στην σειρά i (εμφανίζεται ως οριακό σύνολο στα δεξιά του πίνακα)

x_{+i} = σύνολο παρατηρήσεων στην στήλη i (εμφανίζεται ως οριακό σύνολο στο κάτω μέρος του πίνακα)

N = συνολικός αριθμός παρατηρήσεων που περιλαμβάνονται στον πίνακα.

Οι Landis & Coch (1977) χαρακτήρισαν τον συντελεστή K ως εξής:

- ☞ 0.8 (>80%) – υψηλή συμφωνία (strong agreement)
- ☞ 0.4-0.8 – μέτρια συμφωνία (moderate agreement)
- ☞ < 0.4 – μικρή συμφωνία (poor agreement)

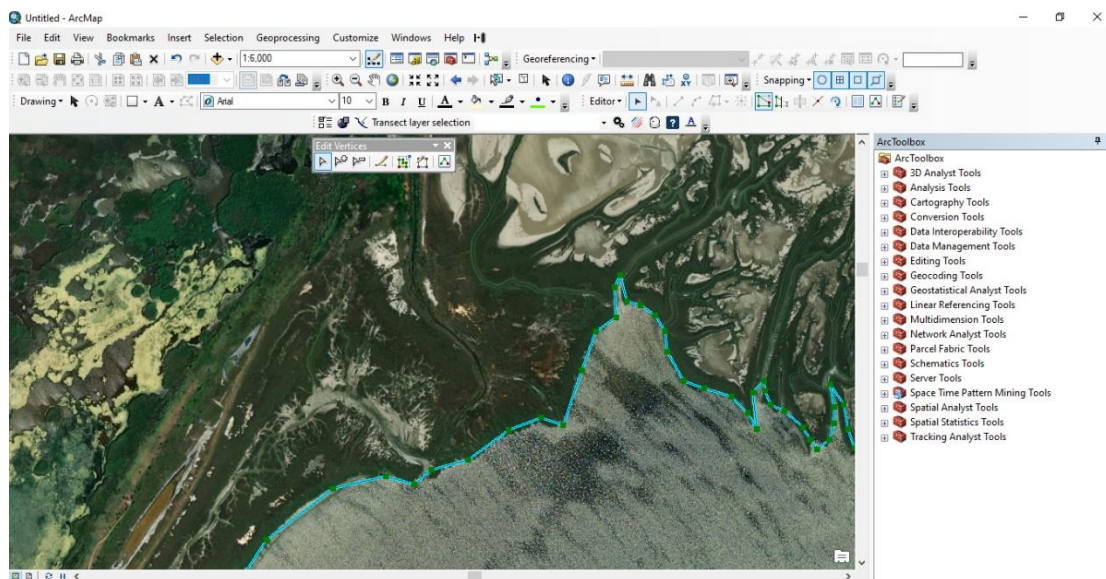
Όσον αφορά την **ακρίβεια του χρήστη (User Accuracy)** αυτή υποδηλώνει την πιθανότητα ένα pixel που έχει ταξινομηθεί σε μία δεδομένη κατηγορία στην πραγματικότητα να αντιπροσωπεύει αυτή την κατηγορία στο έδαφος (Congalton and Green, 2009; Stehman and Foody, 2009).

Τέλος, η **ακρίβεια του παραγωγού (Producer Accuracy)** αντιπροσωπεύει το πόσο καλά έχουν ταξινομηθεί τα δεδομένα αναφοράς (training pixels) για δεδομένο τύπο κάλυψης (Πετρόπουλος Γ., 2021).

Για κάθε ταξινομημένη εικόνα, προέκυψε μια έκθεση αξιολόγησης (Accuracy Assessment Report) με την λειτουργία «**Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs**», τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

4.3.4. Εξαγωγή των ακτογραμμών με χειροκίνητη ψηφιοποίηση επί της οθόνης μέσω φωτοερμηνείας

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πρώτης τεχνικής αποφασίστηκε να υλοποιηθεί και μια δεύτερη τεχνική, εκείνη της χειροκίνητης ψηφιοποίησης. Η χειροκίνητη ψηφιοποίηση είναι μια χρονοβόρα διαδικασία επομένως περιοριστήκαμε στην εξαγωγή των ακτογραμμών με αυτή τη μέθοδο μόνο για τα έτη 1995, 2005 και 2020. Τα φασματικά κανάλια 7,4,2 επιλέχθηκαν για την παρουσίαση των 3 (τριών) δορυφορικών εικόνων τα οποία όπως είναι ήδη γνωστό δίνουν έναν πιο αποτελεσματικό διαχωρισμό μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Η ψηφιοποίηση έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.5 με το εργαλείο Editor → Start editing (**Εικόνα 4.12**).



Εικόνα 4.12: Ενδεικτικό στιγμιότυπο από την ψηφιοποίηση της ακτογραμμής σε περιβάλλον ArcMap 10.5

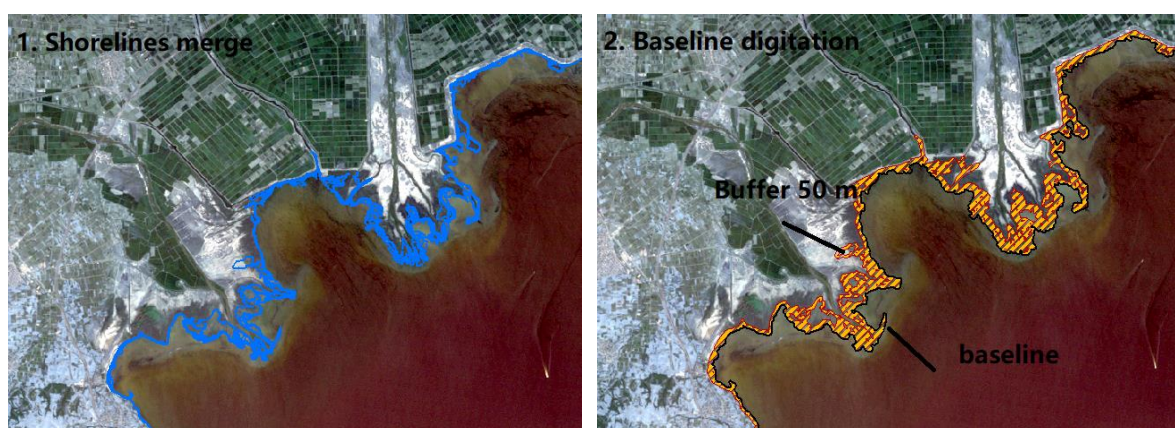
4.3.5. Υπολογισμός μετατόπισης ακτογραμμής και διάβρωσης – απόθεσης με την χρήση του πρόσθετου DSAS

Το εργαλείο DSAS είναι ένα πρόσθετο του Esri ArcGIS (10.4-10.7+) το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο αρκετών δημοσιευμένων εργασιών με σκοπό τη μέτρηση, τον ποσοτικό προσδιορισμό, τον υπολογισμό και την παρακολούθηση στατιστικών ρυθμών μεταβολής ακτογραμμών από πολλαπλές ιστορικές θέσεις και πηγές (Hayward, 2017; Valderrama-Landeros and Flores-de-Santiago, 2019; Abou Samra and Ali, 2020; Naila Matin and Jahid Hasan, 2021).

Συγκεκριμένα, το πρόσθετο αυτό επιτρέπει την δημιουργία διατομών οι οποίες είναι τοποθετημένες κάθετα σε μια γραμμή βάσης σε καθορισμένη απόσταση χρήστη κατά μήκος της ακτής. Λειτουργεί με μοντελοποίηση των διατομών από μια θεωρητική γραμμή βάσης σε απόσταση από την τελευταία ακτογραμμή της μελέτης και στη συνέχεια υπολογίζει τη σύγκλιση κάθε ακτογραμμής με κάθε διατομή (Abou Samra and Ali, 2020).

Το εργαλείο αυτό είναι φιλικό προς τον χρήστη και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη φαινομένων διάβρωσης και συσσώρευσης κατά μήκος των ακτογραμμών και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί και για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συγκεκριμένα και οι έξι ακτογραμμές, οι οποίες προέκυψαν από την υλοποίηση της 1^{ης} τεχνικής, για κάθε έτος αναφοράς, εισήχθησαν σε περιβάλλον ArcGIS σε μορφή shapefile. Οι έξι ακτογραμμές συγχωνεύτηκαν σε ένα shape file με την εντολή **merge**, το οποίο πήρε το όνομα «**shorelines**». Η γραμμή βάσης (**baseline**) προέκυψε δημιουργώντας ένα buffer 50 μ. γύρω από τις ακτογραμμές και ψηφιοποιώντας την γραμμή που ορίζει το buffer όπως αποτυπώνεται και στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 4.13**). Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις τρεις ακτογραμμές που προέκυψαν από την υλοποίηση της 2^{ης} τεχνικής (χειροκίνητη ψηφιοποίηση).



Εικόνα 4.13: Ενδεικτικά στιγμιότυπα από την προεπεξεργασία που απαιτήθηκε για την παραμετροποίηση του DSAS (συγχώνευση ακτογραμμών όλων των ετών και δημιουργία γραμμής βάσης)

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε οι ακτογραμμές για κάθε έτος να βρίσκονται σε μια γεωβάση (personal geodatabase), το σύστημα συντεταγμένων να είναι σε μέτρα, κάθε μεμονωμένη ημερομηνία ακτογραμμής να αποτελείται από μία μόνο γραμμή ή να είναι μια συλλογή τμημάτων, τα δεδομένα ακτογραμμής να είναι μορφοποιημένα με τα κατάλληλα πεδία για χρήση στο DSAS (DSAS_date, DSAS_unsy, DSAS_type) όπως επίσης και η γραμμή βάσης να αποτελείται από τα ακόλουθα πεδία: DSAS_ID, DSAS_group, DSAS_search. Τα παραπάνω πεδία προστέθηκαν χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Attribute Automator**.

Εν συνεχεία, ρυθμίστηκαν οι παράμετροι για την ακτογραμμή και την γραμμή βάσης και καθορίστηκε η μέγιστη απόσταση (search distance) από τη γραμμή βάσης και η

μέγιστη απόσταση μεταξύ των κάθετων διατομών (**Εικόνα 4.14**). Σημειώνεται ότι μια τιμή εξομάλυνσης (smoothing distance) 500 μέτρων θεωρήθηκε ιδανική για την παραγωγή ορθογώνιων διατομών ως προς την ακτή σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης και επομένως για τη μέτρηση της κατάλληλης μεταβολής της ακτογραμμής (U.S. Geological Survey, 2021).

The image shows a 'Set Default Parameters' dialog box with two tabs: 'Baseline Settings' and 'Shoreline Settings'. The 'Baseline Settings' tab is active, showing parameters for baseline layer, ID field, group field, search distance field, and land orientation. The 'Shoreline Settings' tab is also visible, showing parameters for shoreline layer, date field, uncertainty field, and intersection parameters. Below these are options for baseline placement and log file output. At the bottom, there is a 'Casting' section with a diagram showing the maximum search distance, transect spacing, smoothing distance, and a map of the study area with a scale bar.

Baseline Settings

- Baseline Layer:
- Baseline ID Field:
- Optional Parameters:
 - Baseline Group Field:
 - Baseline Search Distance Field:
- Location of Land Relative to Baseline Orientation:
 - ☐ Show Baseline Orientation
 - ☒ Left
 - ☐ Right
- Baseline placement:
 - ☐ Midshore (or combination)
 - ☐ Onshore
 - ☒ Offshore
- Log File Output:
 - ☐ Regular
 - ☒ Extended
 - ☐ None
 - Show Log Location

Shoreline Settings

- Shoreline Layer:
- Shoreline Date Field:
- Shoreline Uncertainty Field:
- Default Data Uncertainty: +/- meters
- Intersection Parameters:
 - ☒ Seaward Intersection
 - ☐ Landward Intersection

Casting

- Maximum Search Distance From Baseline:
- Transect Spacing:
- Smoothing Distance:
- Smoothing: 0
- All Distance Measurements are in Meters
- ☐ Clip transects to shoreline extent

Εικόνα 4.14: Καθορισμών παραμέτρων ακτογραμμής και γραμμής βάσης για την δημιουργία των κάθετων διατομών

Αφού δημιουργήθηκαν οι κάθετες διατομές υπολογίστηκε ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (διάβρωση/ απόθεση), σε όλη τη μελετώμενη περιοχή, με την χρήση του εργαλείου **Calculate rates** και επιλέγοντας την στατιστική μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης (**LRR - Linear Regression Rate**). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο (**Κεφάλαιο 5**).

4.3.5. Δημιουργία WebGIS

Ένα WebGIS επιτρέπει την κοινή χρήση χαρτών, χωρικών δεδομένων και λειτουργιών γεωγραφικής επεξεργασίας σε τοπικό δίκτυο αλλά και πέρα από αυτό, χρησιμοποιώντας κοινά πρωτόκολλα διαδικτυακής επικοινωνίας όπως το HTTP (Dragičević, 2004) και τα WebSockets. Οι διαδραστικοί χάρτες, που προσφέρει το WebGIS, μπορούν να απεικονίζουν δεδομένα από διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Η διαδραστικότητα των χαρτών επιτρέπει τον καθορισμό φίλτρων ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε χρήστη, την αλλαγή κλίμακας, την εμφάνιση ή απόκρυψη δεδομένων και την εκτύπωση μιας επιλεγμένης περιοχής (UIZ GmbH, 2019).

Για την ανάπτυξη του WebGIS με τα κύρια αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκε το cloud-based λογισμικό ArcGIS Online. Το AGOL υποστηρίζει τη σειρά προτύπων WMS⁴ και WFS⁵, του οργανισμού Open Geospatial Consortium (OGC)⁶. Το πρότυπο WMS μάλιστα μπορεί να παρέχει, μέσω μίας ασφαλούς διαδικτυακής σύνδεσης HTTP, χάρτες και γεωχωρικά δεδομένα σε οποιοδήποτε φυλλομετρητή ιστοσελίδων (browser). Παράλληλα, το πρότυπο WFS χρησιμοποιεί τη γλώσσα GML⁷, η οποία βασίζεται στην γλώσσα XML⁸.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ArcGIS online, δύναται να προστεθούν ως επίπεδα ανοιχτά δεδομένα από πλατφόρμες διαδικτύου (Living Atlas) καθώς και δεδομένα που έχουν δημιουργηθεί τοπικά από τον χρήστη σε μορφή shapefile

⁴ Web Map Services

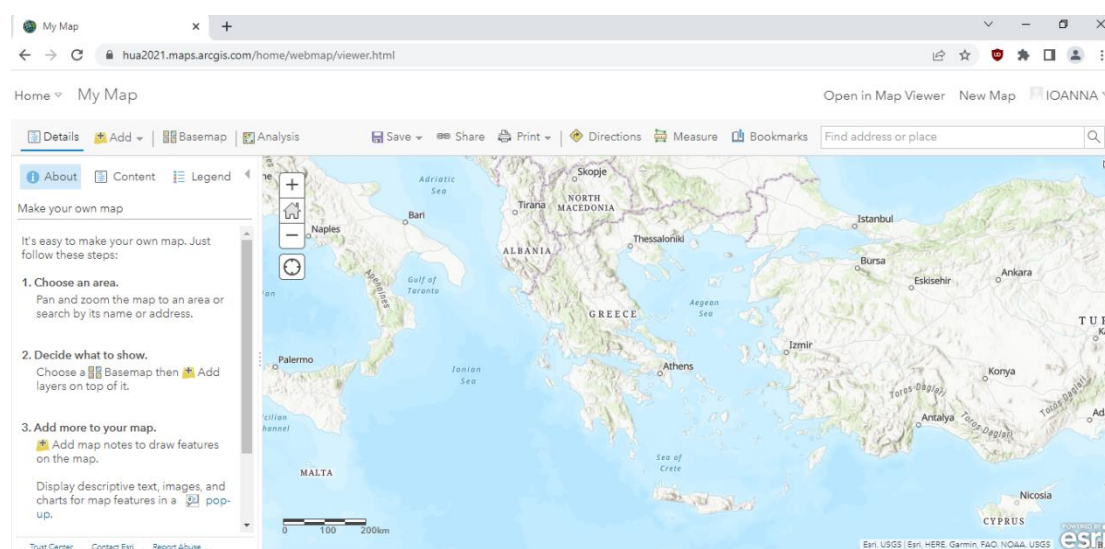
⁵ Web Feature Services

⁶ <https://www.ogc.org/> (Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)

⁷ Geography Markup Language

⁸ eXtensible Markup Language

(αρχείο zip με όλα τα shapefile που θα περιέχει ο διαδραστικός χάρτης), CSV, GPX⁹ ή GeoJSON¹⁰. Από το ArcMap 10.5 εξήχθησαν επομένως κάθετες διατομές (transect) που αντιπροσωπεύουν τον ρυθμό μετατόπισης της ακτογραμμής, σε μορφή **shapefile**, όπως υπολογίστηκαν και με τις δύο μεθόδους. Κάθε παραγόμενο επίπεδο συμπίεστηκε ένα αρχείο συμπίεσης (.zip) και εισήχθησε στο ArcGIS Online. Στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 4.15**) παρουσιάζεται το περιβάλλον στο οποίο δημιουργήθηκε ο διαδικτυακός χάρτης (Map Viewer Classic).



Εικόνα 4.15: Περιβάλλον διαμόρφωσης διαδικτυακού χάρτη και οπτικοποίησης αποτελεσμάτων (ArcGIS Online)

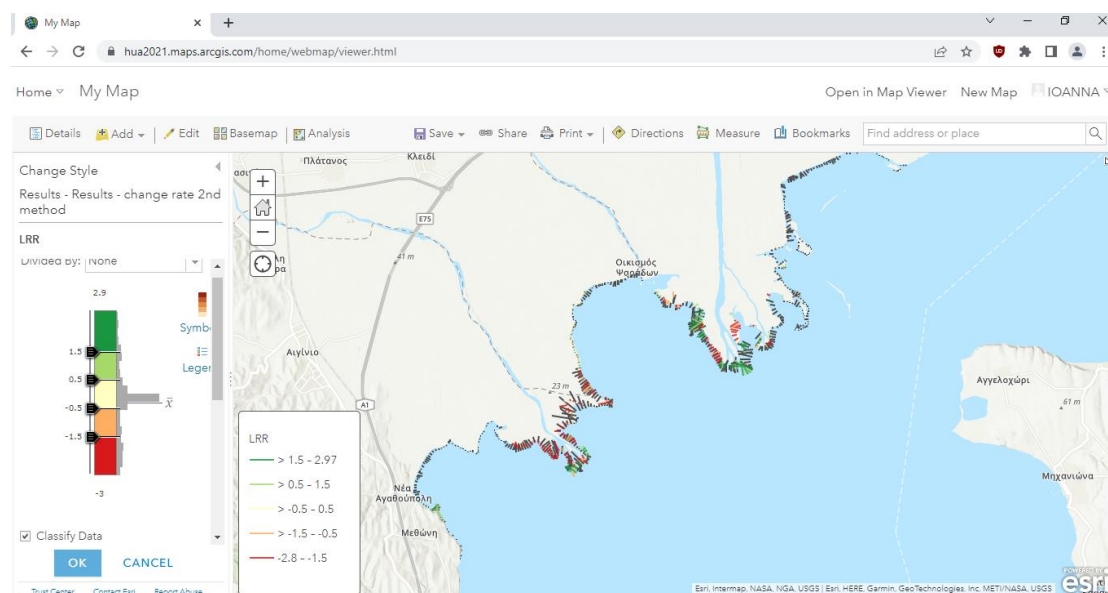
Μέσω της λειτουργίας **Add → Add Layer from file** εισήχθησαν τα αποτελέσματα (κάθετες διατομές που υποδηλώνουν την παράκτια απόθεση/διάβρωση). Το προβολικό σύστημα των πεδίων που εισήχθησαν αναγνωρίστηκε αυτόματα από το λογισμικό και έγινε ορθώς η προβολή τους χωρίς να απαιτηθεί κάποια περαιτέρω ενέργεια.

Εν συνεχεία, κάθε θεματικό επίπεδο μορφοποιήθηκε ως προς το συμβολισμό και το χρωματισμό του όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 4.16**). Από τον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών του κάθε shapefile επιλέχθηκε η στήλη LRR για να οπτικοποιηθεί. Επιλέχθηκαν 5 κλάσεις για την ταξινόμηση των δεδομένων και

⁹ GPS Exchange Format

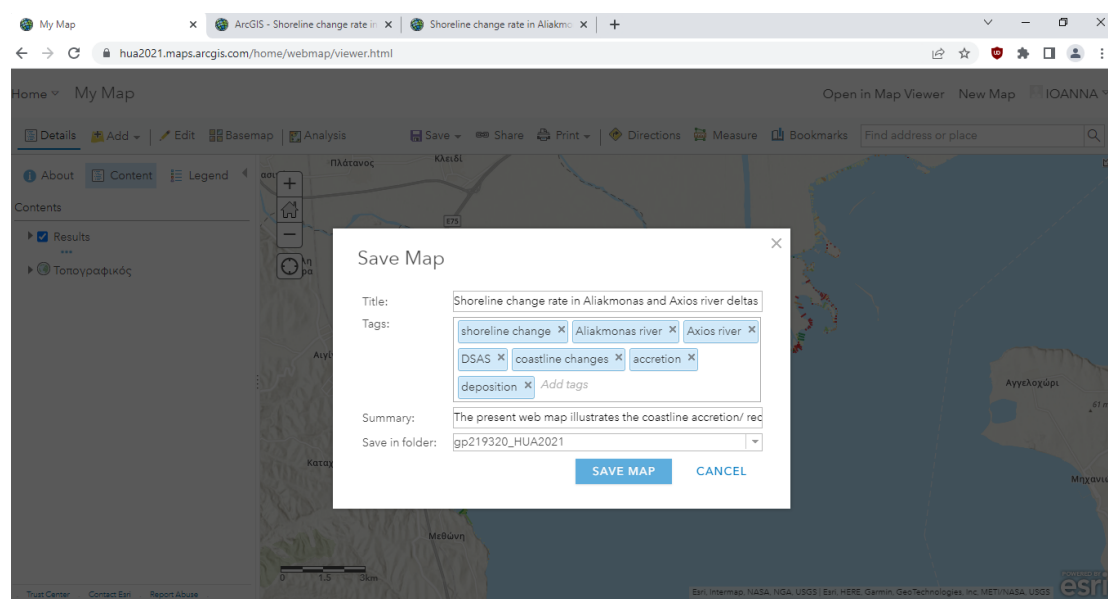
¹⁰ Open standard format for simple geographical features

η χρωματική κλίμακα από το πράσινο ως το κόκκινο, όπου οι κόκκινες περιοχές απεικονίζουν τις περιοχές υψηλής διάβρωσης και οι πράσινες τις περιοχές υψηλής απόθεσης.



Εικόνα 4.16: Ταξινόμηση αποτελεσμάτων και διαμόρφωση χρωματικής κλίμακας στο AGOL

Ακολούθησε αποθήκευση του χάρτη, δημιουργία τίτλου, λέξεων κλειδιών (tags) και μια σύντομη περίληψη (**Εικόνα 4.17**). Σημειώνεται ότι το υπόβαθρο που επιλέχθηκε ήταν το απλό τοπογραφικό υπόβαθρο που δίνεται by default από το λογισμικό (World Topographic Map).



Εικόνα 4.17: Αποθήκευση διαδικτυακού χάρτη στο AGOL

Να σημειωθεί ότι ο διαδικτυακός χάρτης κοινοποιήθηκε δημόσια και είναι πλέον προσβάσιμος στον παγκόσμιο ιστό από τον παρακάτω σύνδεσμο: <https://arcg.is/0HmCvu>. Σε αυτόν προστέθηκαν μάλιστα εργαλεία τα οποία δίνουν στον χρήστη διάφορες δυνατότητες διαδραστικότητας όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο (**Κεφάλαιο 5**).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρέχονται τα βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των περιγραφόμενων στην μεθοδολογία βημάτων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εξέταση της φασματικής διαχωρισιμότητας (ROI Seperability Reports) για κάθε εικόνα. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης των 6 δορυφορικών εικόνων στις δύο κλάσεις (νερό και ξηρά) καθώς και η ακρίβεια του χρήστη και του παραγωγού για κάθε εικόνα. Τέλος, παρουσιάζεται ο ρυθμός διάβρωσης και απόθεσης σε όλη την μελετώμενη περιοχή όπως προέκυψε από τις δυο διαφορετικές τεχνικές που υλοποιήθηκαν καθώς και το Web-GIS που αναπτύχθηκε.

5.1. Φασματική διαχωρισιμότητα:

Δύο μετρήσεις φασματικής διαχωρισιμότητας υπολογίζονται στο ENVI: η απόσταση Jeffries-Matusita και η Μετασχηματισμένη Απόκλιση (Transformed Divergence). Οι τιμές τους κυμαίνονται από **0,0** έως **2,0**. Για **καλά διαχωρισμένα** ROIs, οι τιμές υπερβαίνουν το **1,9**. Εάν η τιμή διαχωρισμού σε μια κατηγορία είναι μικρότερη από 1,0, τότε πολύ πιθανόν έχουμε να κάνουμε με ROI που επισημαίνονται στην ίδια κατηγορία επιφάνειας (Ukrainski,2016). Οι τιμές φασματικής διαχωρισιμότητας που προέκυψαν για κάθε ταξινομημένη εικόνα σύμφωνα με τα ROI Seperability Reports κυμαίνονται μεταξύ 1,99-2,00.

5.2. Αξιολόγηση ακρίβειας ταξινόμησης:

Συνολικά, η ταξινόμηση των 6 μελετώμενων εικόνων ήταν αρκετά καλή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αρκετά ικανοποιητικά αφού για όλες τις εικόνες το ποσοστό της συνολικής ακρίβειας ταξινόμησης ήταν πάνω από 99% και ο συντελεστής K μεγαλύτερος από 0,997.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα ποσοστά συνολικής ακρίβειας και συντελεστή K (**Πίνακας 5.4**) καθώς και η ακρίβεια του χρήστη (User Accuracy) και η ακρίβεια του παραγωγού (Producer Accuracy) για κάθε κλάση (**Πίνακας 5.5**).

Πίνακας 5.4: Ποσοστά συνολικής ακρίβειας και συντελεστή K για κάθε ταξινομημένη εικόνα

Image	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
23/06/1995	100%	1
06/07/2000	99.87%	0.997
20/07/2005	99.93%	0.998
19/08/2010	100%	1
01/08/2015	99.88%	0.997
30/08/2020	99.93%	0.998

Πίνακας 5.5: Ποσοστά ακρίβειας του χρήστη (User Accuracy) και ακρίβειας του παραγωγού (Producer Accuracy) για κάθε ταξινομημένη εικόνα

Image	Class	User Accuracy	Producer Accuracy
23/06/1995	land	100	100
	water	100	100
06/07/2000	land	100	99.77
	water	99.74	100
20/07/2005	land	100	99.88
	water	99.85	100
19/08/2010	land	100	100
	water	100	100
01/08/2015	land	99.93	99.90
	water	99.78	99.86
30/08/2020	land	99.95	99.89
	water	99.92	99.97

5.3. Υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης και απόθεσης:

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις ακτογραμμές που εξήχθησαν από την 1^η τεχνική (Επιβλεπόμενη ταξινόμηση SVM), και υλοποιώντας βήμα – βήμα την μεθοδολογία όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψαν **618 διατομές** τοποθετημένες κάθετα στην γραμμή βάσης οι οποίες αποτυπώνουν τον ρυθμό

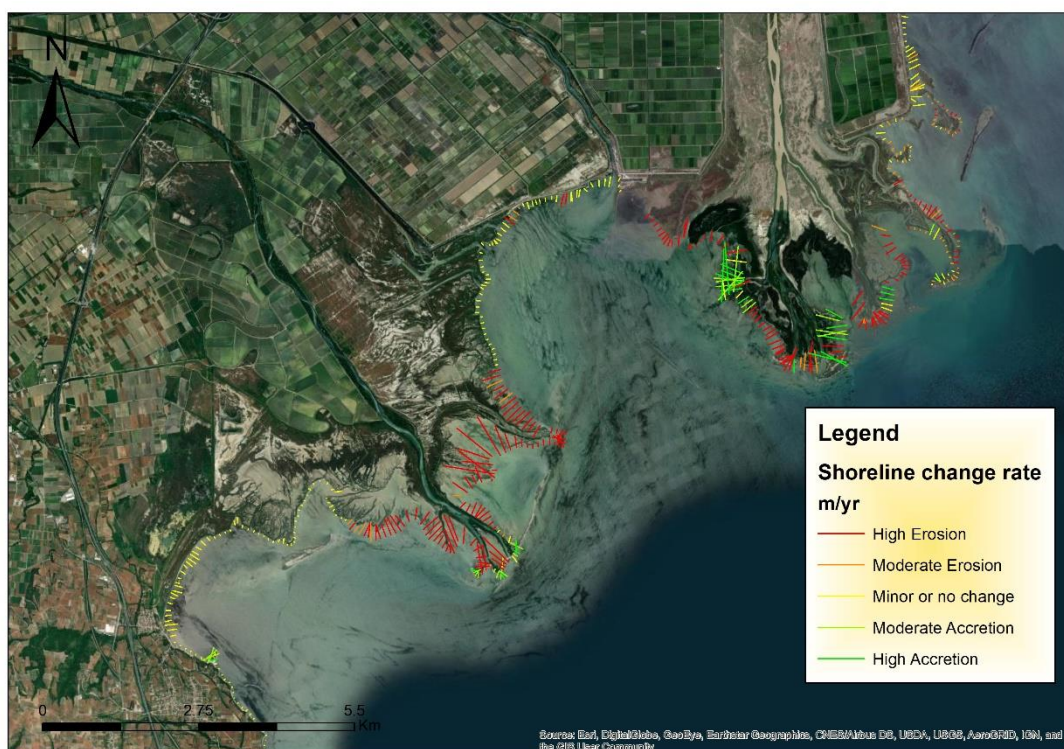
μεταβολής της ακτογραμμής σε κάθε σημείο. Από τις 618 διατομές, αφαιρέθηκαν οι 60 καθώς αντιπροσώπευαν ακραίες τιμές διάβρωσης και απόθεσης που οφείλονταν σε σφάλματα του DSAS αλλά και σε ενδεχόμενα σφάλματα χρήστη κατά την ταξινόμηση και εξαγωγή των ακτογραμμών τα οποία δεν ανιχνευτήκαν σε πρότερο στάδιο. Οι αφαίρεση αυτών των τιμών ήταν απαραίτητη προκειμένου να μη δημιουργηθούν προβλήματα στο σύνολο των αποτελεσμάτων. Άλλωστε το ποσοστό των τιμών αυτών ήταν μικρό (<10% του συνόλου) γεγονός που είναι αποδεκτό. Από τις 558 διατομές, οι 87 υποδηλώνουν σημεία απόθεσης (θετικές τιμές), οι 458 σημεία διάβρωσης (αρνητικές τιμές) ενώ σε 13 διατομές δεν παρατηρείται καμία αλλαγή (μηδενικές τιμές). Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάστηκαν με χρωματική κλίμακα. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώθηκαν οι περιοχές που παρατηρήθηκε υψηλή διάβρωση και με πράσινο χρώμα οι περιοχές με υψηλή απόθεση. Οι ακραίες τιμές του ρυθμού μεταβολής της ακτογραμμής που παρατηρήθηκαν ήταν -3,00 m (διάβρωση) και +2,94 m (απόθεση) για όλο το διάστημα αναφοράς. Χρήσιμες πληροφορίες δόθηκαν και από τα στατιστικά των διατομών (statistics of transect). Ο μέσος ρυθμός απόθεσης σε όλη την περιοχή μελέτης για το διάστημα αναφοράς (25 έτη) υπολογίστηκε ότι είναι **1,01 m/yr** ενώ ο μέσος ρυθμός διάβρωσης **1,23 m/yr**.

Πίνακας 5.6: Ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (αποτελέσματα 1^{ης} τεχνικής)

Ρυθμός απόθεσης / διάβρωσης (m/yr.)	Χαρακτηρισμός/ Χρωματική διαβάθμιση
-3,00 - -1,50	Υψηλή διάβρωση
-1,49- -0,50	Μέτρια διάβρωση
-0,49 – 0,50	Αμελητέα μετατόπιση
0,51 – 1,50	Μέτρια απόθεση
1,51 – 2,94	Υψηλή απόθεση

Στον παρακάτω χάρτη (**Εικόνα 5.18**) αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα οι περιοχές που παρατηρήθηκε υψηλή διάβρωση και με πράσινο χρώμα οι περιοχές με υψηλή απόθεση. Αξίζει να σημειωθεί πως στις περιοχές με κίτρινο χρώμα ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής ήταν πολύ μικρός επομένως θεωρήθηκε πως στις

περιοχές αυτές δεν συνέβη ούτε απόθεση ούτε διάβρωση, πρακτικά δηλαδή δεν παρατηρήθηκε κάποια μεταβολή.



Εικόνα 5.18: Χάρτης περιοχής μελέτης όπου αποτυπώνεται ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (1995-2020) δεδομένων των ακτογραμμών που εξήχθησαν από την 1^η τεχνική (SVM)

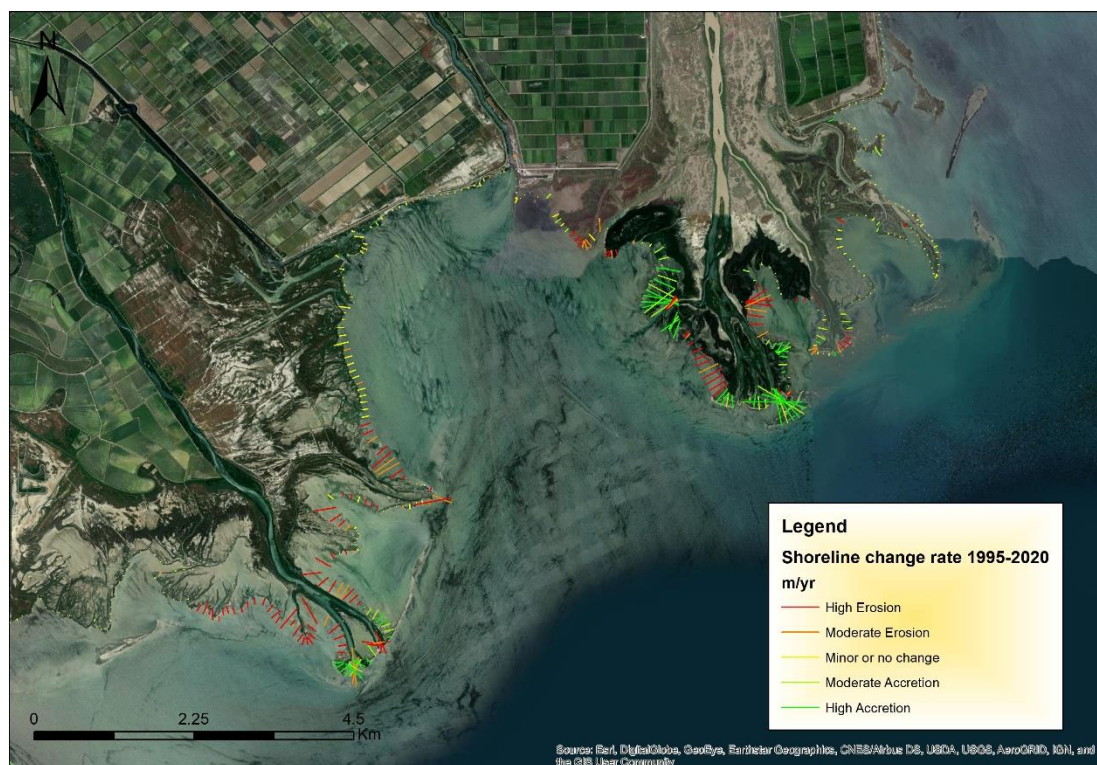
Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις ακτογραμμές που εξήχθησαν από την 2^η τεχνική (χειροκίνητη ψηφιοποίηση), και υλοποιώντας βήμα – βήμα την μεθοδολογία όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψαν **550 διατομές** εκ των οποίων κρατήσαμε τις 498 και αφαιρέσαμε τις 52. Οι τιμές αυτές αποφασίστηκε να αφαιρεθούν γιατί σε αυτά τα σημεία το LRR που υπολογίστηκε ήταν μηδενικό (NULL). Οι 52 αυτές διατομές αποτελούσαν <10% του συνόλου των τιμών και συγκεκριμένα 9,45% γεγονός που είναι αποδεκτό. Από τις 498 διατομές, οι 180 υποδηλώνουν σημεία απόθεσης (θετικές τιμές), οι 267 σημεία διάβρωσης (αρνητικές τιμές) ενώ σε 51 διατομές δεν παρατηρείται καμία αλλαγή (μηδενικές τιμές). Οι ακραίες τιμές του ρυθμού μεταβολής της ακτογραμμής που παρατηρήθηκαν σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσίασαν μεγάλη απόκλιση από την πρώτη τεχνική και συγκεκριμένα η υψηλότερη τιμή διάβρωσης ήταν -2,8 m και +2,98

η υψηλότερη τιμή απόθεσης για όλο το διάστημα αναφοράς. Χρήσιμες πληροφορίες δόθηκαν και από τα στατιστικά των διατομών (statistics of transect). Ο μέσος ρυθμός απόθεσης σε όλη την περιοχή μελέτης για το διάστημα αναφοράς (25 έτη) υπολογίστηκε ότι είναι **0,81 m/yr** ενώ ο μέσος ρυθμός διάβρωσης περίπου **1 m/yr**.

Πίνακας 5.7: Ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (αποτελέσματα 2^{ης} τεχνικής)

Ρυθμός απόθεσης / διάβρωσης (m/yr.)	Χαρακτηρισμός/ Χρωματική διαβάθμιση
-2,80 - -1,50	Υψηλή διάβρωση
-1,49- -0,50	Μέτρια διάβρωση
-0,49 – 0,50	Αμελητέα μετατόπιση
0,51 – 1,50	Μέτρια απόθεση
1,51 – 2,98	Υψηλή διάβρωση

Οι τιμές του ανωτέρω πίνακα οπτικοποιήθηκαν σε χάρτη όπως απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 5.19)



Εικόνα 5.19: Χάρτης περιοχής μελέτης όπου αποτυπώνεται ο ρυθμός μετατόπισης της ακτογραμμής (1995-2020) δεδομένων των ακτογραμμών που εξήχθησαν από την 2^η τεχνική (manual digitization)

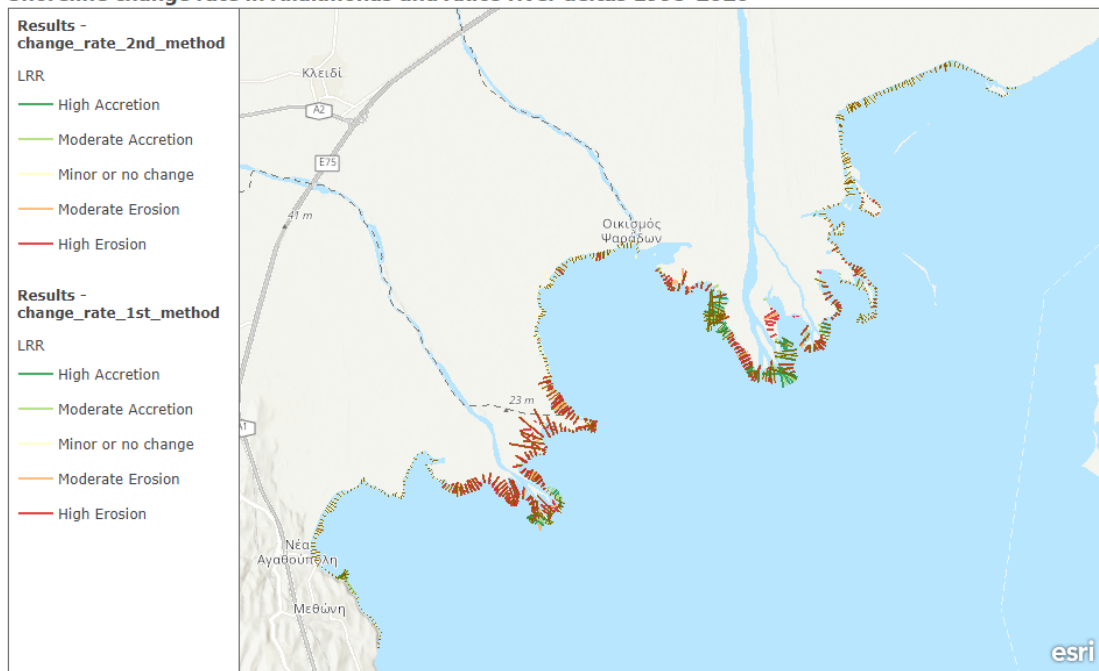
5.4.Web-GIS:

Τα αποτελέσματα από την μελέτη παρουσιάστηκαν σε έναν διαδικτυακό χάρτη ο οποίος είναι διαθέσιμος προς κάθε χρήστη στον παρακάτω σύνδεσμο: <https://arcg.is/0HmCvu>. Ο χρήστης έχει δυνατότητα:

- να αλλάξει το υπόβαθρο από μια λίστα υποβάθρων (Imagery Hybrid, Open street Map, Satellite images κτλ.),
- να αλλάξει την κλίμακα (zoom in / zoom out),
- να επιλέξει ή να από-επιλέξει κάποιο επίπεδο ή ακόμα και να τα παρατηρήσει παράλληλα προκειμένου να συγκρίνει τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών,
- να κάνει μετρήσεις εμβαδού, μήκους και εύρεση τοποθεσίας (γεωγραφικό μήκος/ πλάτος ενός σημείου)
- να εκτυπώσει τον χάρτη.

Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 5.20**) αποτυπώνει το WebGIS που αναπτύχθηκε σε εκτυπώσιμη μορφή.

Shoreline change rate in Aliakmonas and Axios river deltas 1995-2020



The present web map illustrates the coastline accretion/ recession occurring in the study area during the period of 1995-2020 as it was calculated by two different techniques. The 1st method was a supervised image classification using SVM algorithm and the 2nd method the direct digitisation.

Εικόνα 5.20: Διαδικτυακός χάρτης αποτελεσμάτων σε εκτυπώσιμη μορφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθώντας αναλυτικά την ανωτέρω μεθοδολογία, ολοκληρώθηκε με επιτυχία η χαρτογράφηση των μεταβολών της ακτογραμμής γρήγορα και με αμελητέα σφάλματα όπως έδειξαν άλλωστε τα αποτελέσματα από την εξέταση της φασματικής διαχωρισιμότητας και την αξιολόγηση της ακρίβειας της ταξινόμησης.

Συγκεκριμένα, οι **περιοχές εκπαίδευσης του αλγορίθμου** (training ROIs) σε κάθε κατηγορία (ξηρά, νερό) ήταν **πολύ καλά διαχωρισμένες σύμφωνα με τις τιμές φασματικής διαχωρισιμότητας** που προέκυψαν (τιμές πολύ κοντά στο 2,00). Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς ο διαχωρισμός μεταξύ ξηράς και θάλασσας κατά την επεξεργασία των εικόνων ήταν αρκετά αποτελεσματικός και το περιθώριο λάθους κατά την επιλογή των training ROIs μικρό.

Σε σχέση με την **αξιολόγηση της ακρίβειας ταξινόμησης, τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά**. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά που προέκυψαν ήταν πολύ καλά, **πολύ κοντά στο 100%** γεγονός το οποίο οφείλεται στην λήψη πολλών και αντιπροσωπευτικών για κάθε τάξη ROIs. Η πολύ μικρή απόκλιση της τάξης του 0,1-0,2%, από το 100%, σε κάποιες εικόνες είναι λογική και οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος λανθασμένα αναγνώρισε κάποιες περιοχές της κατηγορίας «νερό»/ «water» ως «έδαφος»/ «land» και αντίστροφα, δεδομένου ότι κάποιες περιοχές εμφανίζουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με άλλες περιοχές στα διαθέσιμα φασματικά κανάλια. Παρόλα αυτά η απόκλιση αυτή θεωρήθηκε αμελητέα και δεν κρίθηκε απαραίτητη η αλλαγή της μεθόδου ταξινόμησης ή η υλοποίηση της ταξινόμησης εκ νέου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση των 2 τεχνικών (επιβλεπόμενη ταξινόμηση SVM και ψηφιοποίηση επί της οθόνης) έδειξαν ότι τα δέλτα των ποταμών Αλιάκμονα και Αξιού παρουσιάζουν γεωμορφολογικές αλλαγές κατά το μελετώμενο διάστημα (1995-2020), σε κάποια σημεία ενώ σε κάποια άλλα παρατηρείται μια σχετική σταθερότητα, το οποίο είναι λογικό και σύμφωνο με την εικόνα της περιοχής μελέτης.

Από τα αποτελέσματα της 1^{ης} τεχνικής (επιβλεπόμενη ταξινόμηση SVM), φαίνεται πώς στον **Αξιό ποταμό υπάρχουν περισσότερα σημεία υψηλής απόθεσης** ενώ στον ποταμό **Αλιάκμονα η διάβρωση είναι μεγαλύτερη από την απόθεση**. Μάλιστα, η **απόθεση στον ποταμό Αλιάκμονα συμβαίνει μόνο στο νότιο τμήμα (εκβολές)** του κύριου ρέματος του ποταμού (ως και 2,7 m/yr). Οι **μεγαλύτερες τιμές απόθεσης** (2,74-2,94 m/yr) παρατηρήθηκαν σε **δύο σημεία στο δέλτα του ποταμού Αξιού** ενώ η **υψηλότερη τιμή διάβρωσης** (3 m/yr) στο **δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα**.

Σε αντίθεση με την πρώτη τεχνική, στην περίπτωση της 2^{ης} τεχνικής (χειροκίνητη ψηφιοποίηση) δεν υπήρχαν ακραίες τιμές (>3 m/yr) επομένως τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την δεύτερη συμπεραίνεται ότι εμπεριέχουν μικρότερο σφάλμα. Η απόθεση στον ποταμό Αλιάκμονα εντοπίζεται μόνο στο νότιο τμήμα (εκβολές) του κύριου ρέματος του ποταμού (ως και 2,05 m/yr). Η **μεγαλύτερη τιμή απόθεσης** (2,98 m/yr) παρατηρήθηκε στο **δέλτα του ποταμού Αξιού** ενώ η **υψηλότερη τιμή διάβρωσης** (2,8 m/yr) στο **δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα**.

Συγκριτικά οι δύο τεχνικές παρουσίασαν παρόμοια αποτελέσματα ως προς τις τιμές διάβρωσης και απόθεσης. Η τεχνική της χειροκίνητης ψηφιοποίησης μέσω φωτοερμηνείας αν και χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πρώτη τεχνική (τεχνική επιβλεπόμενης SVM), δίνει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα και πιο κοντά στην πραγματικότητα σε σχέση με την πρώτη τεχνική η οποία αν και δίνει ένα σαφή διαχωρισμό μεταξύ ξηράς – θάλασσας εμπεριέχει περισσότερα σφάλματα λόγω της ημι-αυτοματοποίησής της. Στις **κύριες πηγές σφαλμάτων** της 1^{ης} τεχνικής συγκαταλέγονται τα πιθανά σφάλματα κατά την επιλογή των περιοχών εκπαίδευσης αλλά και τα σφάλματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του εργαλείου DSAS. Οι περιοχές εκπαίδευσης μπορεί να μην είναι αρκετά αντιπροσωπευτικές καθώς ορίζονται καταρχήν με βάση τις κατηγορίες (στην προκειμένη περίπτωση νερό και έδαφος) και δευτερευόντως με βάση τις φασματικές ιδιότητες. Επομένως είναι δυνατόν κάποιες περιοχές να εμφανίζουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με άλλες περιοχές στα διαθέσιμα φασματικά κανάλια και ως εκ τούτου ο αλγόριθμος λανθασμένα να αναγνωρίζει κάποιες περιοχές της κατηγορίας «νερό»/ «water» ως «έδαφος»/ «land» και αντίστροφα. Επιπλέον, μοναδικές κατηγορίες που μπορεί να

κατέχουν πολύ μικρή έκταση στην περιοχή μελέτης και οι οποίες πολλές φορές μπορεί να είναι απαρατήρητες ή άγνωστες στον αναλυτή είναι δύσκολο να αναγνωριστούν με αποτέλεσμα να παραλείπονται. Το περιθώριο βέβαια ενός τέτοιου σφάλματος περιορίζεται αρκετά έχοντας να κάνουμε με ταξινόμηση σε 2 κατηγορίες.

Συνολικά, η διάβρωση είναι η κύρια διεργασία που επικρατεί στα δέλτα και των δύο ποταμών, ενώ η απόθεση αν και εμφανής, ιδίως στο δέλτα του ποταμού Αξιού είναι πιο περιορισμένη και εντοπισμένη σε συγκεκριμένα σημεία. Η μέση τιμή διάβρωσης που υπολογίστηκε για την περιοχή μελέτης υποδηλώνει σημαντική βραχυχρόνια διάβρωση (διάστημα μικρότερο των 30 ετών) που οφείλεται σε ανθρώπινες κατασκευές σχετιζόμενες με δομές προστασίας των ακτών αλλά και σε κάποιο βαθμό και στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής (Morton et.al., 2004). Δεδομένου μάλιστα ότι τα δύο δέλτα βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο αναμένεται η κλιματική αλλαγή να αυξήσει τους ρυθμούς διάβρωσης με δυσμενέστερο τρόπο στο μέλλον. Η απόθεση από την άλλη οφείλεται κυρίως στην μεγάλη στερεοπαροχή (ποσότητα μεταφερόμενου ιζήματος) σε συνδυασμό με τις κυματικές διεργασίες (επιμήκη ρεύματα) που ενεργούν στην περιοχή. Και τα δύο δέλτα άλλωστε αποτελούν δέλτα με κυρίαρχο παράγοντα διαμόρφωσης τις ποτάμιες διεργασίες γεγονός που αιτιολογεί την μεγάλη ποσότητα μεταφερόμενου ιζήματος και κατ' επέκταση τις μεγάλες τιμές απόθεσης (Καρύμπαλης. Θ.,2010). Από τα ευρήματα της μελέτης της Σ. Τούντα (2021) για το δέλτα του Αξιού για το έτος 2020, προκύπτει ότι η συγκέντρωση φερτών υλικών ήταν αξιοσημείωτα υψηλή (ως και 40-50 g/m³) λίγες βδομάδες πριν την λήψη της δορυφορικής εικόνας της 30^{ης} Αυγούστου 2020 από την οποία εξήχθη η 6^η κατά σειρά ακτογραμμή. Ωστόσο μεταξύ 26-31/8/2020 όπου έγινε και η λήψη της εικόνας αναφοράς η συγκέντρωση των φερτών υλικών παρουσίασε κατά μέσο όρο σημαντική μείωση (1.08 – 1.11 g/m³) με εντοπισμένα όμως υψηλή συγκέντρωση στα ΒΔ γεγονός που συνάδει με τα αποτελέσματά υψηλής απόθεσης που υπολογίστηκαν στην περιοχή αυτή. Στην περίπτωση του Αλιάκμονα συνολικά η στερεοπαροχή είναι μικρότερη σε σχέση με τον Αξιό (Μήτσιος, 2011: σελ. 35, διάγραμμα 6) επομένως η μικρότερη απόθεση είναι αναμενόμενη.

Αν και η περιοχή μελέτης έχει μελετηθεί και από άλλους ερευνητές, οι οποίοι έχουν εκτιμήσει ποσοτικά το ρυθμό διάβρωσης και απόθεσης, δεν ήταν εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών (Petrooulos et.al, 2015; Demertzi et al., 2022). Αυτό συμβαίνει καταρχήν λόγω της διαφορετικής περιόδου αναφοράς αλλά και λόγω του διαφορετικού είδους αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα η παρούσα διπλωματική παραθέτει το ρυθμό μεταβολής της ακτογραμμής στην περιοχή μελέτης (σε m/yr) για το διάστημα 1995-2020 ενώ η έρευνα των Petrooulos et.al παρουσιάζει το μέγεθος της διάβρωσης και απόθεσης (έκταση σε km²) για τα διαστήματα 1984-1990, 1990-2003, 2003-2009 και συνολικά για το διάστημα 1984-2009. Αντίστοιχα η μελέτη των Demertzi et al. εκτίμησε το μέγεθος της διάβρωσης και απόθεσης (έκταση σε km²) για τα διαστήματα 1986-2000, 2000-2014 και 2014-2022. Σε γενικές γραμμές όμως τα αποτελέσματα των μελετών αυτών παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα σε σχέση με την παρούσα μελέτη ως προς τα σημεία στα οποία επικρατεί η διάβρωση και η απόθεση. Συγκεκριμένα στο δέλτα του Αξιού ποταμιού οι τιμές απόθεσης είναι μεγαλύτερες από τις τιμές διάβρωσης που επικρατούν κυρίως στο βορειοδυτικό και νότιο τμήμα του δέλτα ενώ στο δέλτα του Αλιάκμονα επικρατεί κατά κύριο λόγο διάβρωση με απόθεση να εντοπίζεται μόνο στο νότιο τμήμα (εκβολές) του κύριου ρέματος του ποταμού. Σε κάθε περίπτωση, ασυμφωνίες στα αποτελέσματα είναι σαφές ότι θα υπάρχουν από μελέτη σε μελέτη λόγω των διαφορετικών δεδομένων αναφοράς, των διαφορών στις περιόδους παρατήρησης, την διαφορετική ανάλυση των εικόνων αλλά και λόγω των διαφορετικών τεχνικών και εργαλείων που υλοποιήθηκαν / χρησιμοποιήθηκαν (Petrooulos et.al, 2015; Demertzi et al., 2022).

Τέλος, αξίζει να τονιστεί πως οι μεγάλοι ρυθμοί διάβρωσης και απόθεσης στην περιοχή μελέτης μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Ενδεικτικά η υψηλή απόθεση στην περιοχή δημιουργεί προσχωματικές νησίδες ιζήματος οι οποίες αποτελούν εμπόδιο στην ομαλή ροή του νερού προς τη θάλασσα και μπορεί να αποτελέσουν αιτία πλημμυρικών γεγονότων σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων (Καρύμπαλης. Θ.,2010). Παράλληλα από την διάβρωση μπορεί να προκληθούν:

- επιπτώσεις στον παράκτιο τουρισμό, ο οποίος αποτελεί σημαντική οικονομική δραστηριότητα στην Ελλάδα και συνεπώς στην εθνική και τοπική οικονομία,
- απώλεια γης οικολογικής αξίας - απειλή υγροτοπικών συστημάτων που φιλοξενούν πλήθος σπάνιων ειδών χλωρίδας και πανίδας,
- κίνδυνος απώλειας περιουσιών και ανθρωπίνων ζώων.

Απαραίτητη επομένως είναι η λήψη μέτρων για την καλύτερη διαχείριση της περιοχής. Η ρύθμιση της παράκτιας διάβρωσης μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους (ήπιες / σκληρές). Στις ήπιες συγκαταλέγεται η τροφοδοσία της παράκτιας ζώνης περιοχής με ίζημα ενώ στις σκληρές μεθόδους περιλαμβάνεται κάθε τεχνική κατασκευή για την σταθεροποίηση της ακτογραμμής όπως βραχίονες, τοίχοι προστασίας, κυματοθραύστες, ζεύγη προβολών. Σε κάθε περίπτωση η λήψη οποιοδήποτε τεχνητού προστατευτικού μέτρου θα πρέπει να μελετηθεί καλά στην περιοχή προτού εφαρμοστεί καθώς κάθε τεχνικό έργο αλληλοεπιδρώντας με την παράκτια μεταφορά των ιζημάτων μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα φαινόμενα απόθεσης ιζήματος τα οποία δύναται να οδηγήσουν σε επιπλέον προβλήματα όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα:

Ανακεφαλαιώνοντας, στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η αξιοποίηση των τεχνολογιών Γεωπληροφορικής για την χαρτογράφηση των αλλαγών της ακτογραμμής, δύο σημαντικών δέλτα του Ελλαδικού χώρου (Αξιού και Αλιάκμονα), σε διάστημα 25 ετών.

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας, προκύπτουν στα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Η **τεχνική της χειροκίνητης ψηφιοποίησης** μέσω φωτοερμηνείας χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πρώτη τεχνική (τεχνική επιβλεπόμενης SVM), δίνοντας σαφώς **καλύτερα αποτελέσματα** και πιο κοντά στην πραγματικότητα σε σχέση με την πρώτη τεχνική, η οποία εμπεριείχε περισσότερα σφάλματα. Κύρια πηγή σφάλματος θεωρήθηκε η επιλογή των περιοχών εκπαίδευσης καθώς κάποιες περιοχές εμφανίζουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με άλλες περιοχές στα διαθέσιμα φασματικά κανάλια με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να ταξινομήσει εσφαλμένα υδάτινες περιοχές ως έδαφος και αντίστροφα.
- Η περιοχή μελέτης αποτελεί ένα δυναμικό συσσωρευτικό παράκτιο περιβάλλον λόγω της δραστηριότητας των δύο ποταμών. Οι δύο ποταμοί απορρίπτουν μεγάλες ποσότητες ιζηματογενούς φορτίου με αποτέλεσμα η απόθεση στα δέλτα να είναι μεγάλη. Στο **δέλτα του Αξιού ποταμού** μάλιστα η **συγκέντρωση φερτών υλικών** κατά το μελετώμενο διάστημα είναι **υψηλή** γεγονός που συνάδει με τα αποτελέσματα απόθεσης που προέκυψαν και η οποία δύναται να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα (πχ πλημμυρικά φαινόμενα κ.α) τα οποία χρήζουν αντιμετώπισης και παρακολούθησης.

- Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται επιπλέον και ως περιοχή ιδιαίτερου οικολογικού ενδιαφέροντος αποτελώντας σημαντικό υδροτοπικό σύστημα για την Ελλάδα και η διασφάλιση της βιωσιμότητάς του είναι απαραίτητη. Στους σημαντικότερους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσει αυτή η προστατευόμενη περιοχή συγκαταλέγεται και η διάβρωση. Η διάβρωση είναι η κύρια διεργασία που επικρατεί στα δέλτα και των δύο ποταμών, ενώ η απόθεση αν και εμφανής, ιδίως στο δέλτα του ποταμού Αξιού είναι πιο περιορισμένη και εντοπισμένη σε συγκεκριμένα σημεία. Ο **ρυθμός διάβρωσης** που εκτιμήθηκε για το μελετώμενο διάστημα ιδίως στο δέλτα του **ποταμού Αλιάκμονα ήταν σημαντικά υψηλός** και αιτιολογείται κυρίως από την ανθρωπογενή δραστηριότητα αλλά και από την άνοδο της θάλασσας στάθμης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Τα κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από την διάβρωση της παρακείμενης περιοχής είναι ποικίλα και χρήζουν αντιμετώπισης και παρακολούθησης.
- Το εύρος τιμών διάβρωσης και απόθεσης που υπολογίστηκε με την χειροκίνητη ψηφιοποίηση κυμαινόταν μεταξύ $-2,8 - +2,98 \text{ m/yr}$, το οποίο δεν αποκλίνει πολύ από τις τιμές διάβρωσης και απόθεσης που υπολογίστηκαν από την υλοποίηση της πρώτης τεχνικής SVM ($-3,0 - +2,94 \text{ m/yr}$ μη συμπεριλαμβανομένου των εσφαλμένων τιμών που αφαιρέθηκαν από το σύνολο των αποτελεσμάτων) γεγονός που υποδηλώνει ότι και οι δύο τεχνικές έδωσαν με **σχετική ακρίβεια την θέση της ακτογραμμής**.

7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις:

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για περεταίρω έρευνα και εμβάθυνση. Παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ημιαυτόματη μέθοδο ταξινόμησης εικόνας (SVM) που εφαρμόστηκε, η άμεση φωτοερμηνεία αν και αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία έδωσε ασφαλέστερα και πιο ακριβή αποτελέσματα συνολικά. Δεδομένου του σαφούς διαχωρισμού μεταξύ ξηράς και θάλασσας, θα είχε ενδιαφέρον να υλοποιηθεί και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση για την περιοχή μελέτης. Σε αυτή την

περίπτωση ο ίδιος ο αλγόριθμος θα έκανε την ταξινόμηση αυτοματοποιημένα, χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από τον χρήστη. Περαιτέρω, οι σύγχρονες τάσεις δείχνουν μια ανοδική προτίμηση των ερευνητών προς την υλοποίηση ταξινόμησης σε περιβάλλον Google Earth Engine, με δυνατότητες ανάλυσης πλανητικής κλίμακας. Το Earth Engine δύναται να ανιχνεύσει αλλαγές, να χαρτογραφήσει τάσεις και να ποσοτικοποιήσει διαφορές στην επιφάνεια της Γης οπότε θεωρείται ένα ιδανικό και καινοτόμο εργαλείο για την ανίχνευση και χαρτογράφηση των μεταβολών των ακτογραμμών. Η υλοποίηση επομένως μιας διαφορετικής ή ακόμα και μιας τρίτης τεχνικής θα οδηγούσε ενδεχόμενα σε ακόμα πιο ασφαλή αποτελέσματα.

Παράλληλα θα ήταν χρήσιμο να εξεταστούν οι ρυθμοί μεταβολής της μελετώμενης ακτογραμμής ανά πενταετία, εκτός από το συνολικό ρυθμό για όλη την περίοδο αναφοράς. Αυτό θα μας έδινε την δυνατότητα να συγκρίνουμε μεταξύ των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων την διάβρωση και την απόθεση της περιοχής και να συνδέσουμε τα αποτελέσματα με φυσικά ή ανθρωπογενή φαινόμενα που συνέβησαν, κατά την εκάστοτε περίοδο.

Περαιτέρω, προτείνεται ο συνεχής εμπλουτισμός του διαδικτυακού χάρτη που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με νεότερα δεδομένα από άλλους ερευνητές ώστε να αποτελέσει ένα επικαιροποιημένο εργαλείο παρακολούθησης της περιοχής μελέτης και ένα χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων προς εμπλεκόμενους φορείς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική:

Αγαπίου Α., κ.α, 2020. *Μελέτη Χαρτογράφησης και συγκριτικής αξιολόγησης τεχνολογιών και συστημάτων διεθνώς*. Παραδοτέο στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου «Αιγίς» του προγράμματος Interreg Ελλάδα – Κύπρος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός.

Ατζουλάτου Α., 2015. *Διάβρωση ακτών και χρήσεις γης της παράκτιας ζώνης της Αχαΐας*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον, Κατεύθυνση Περιβαλλοντική Ωκεανογραφία.

Βατίτση Α., 2016, *Αξιολόγηση Διαφορετικών Αλγορίθμων και Μεγέθους Δειγμάτων Εκπαίδευσης για την Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων RapidEye*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ.

Ζαχαρίου Ρ., 2019. *Εκτίμηση της διάβρωσης ακτής στην παράκτια ζώνη της Οροκλινής*. Λεμεσός: Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Σχολή Μηχανικής και Τεχνολογίας.

Ηλιάδου Ε., *Ανάλυση και αξιολόγηση εθνικού πάρκου Αξιού – Λουδία – Αλιάκμονα. Η περίπτωση του Αξιού*. Τμήμα Αρχιτεκτονικής Τοπίου – ΤΕΙ Καβάλας. Ανακτήθηκε από: http://www.george.vassilopoulos.info/greece/drone_videos/media-1/154.pdf

Ιωακειμίδου Μ, 2019, *Διαχρονική μετατόπιση της ακτογραμμής μεταξύ Κυλλήνης και Αράξου (βορειοδυτική Πελοπόννησος)*. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.

Δανδουλάκη, Μ., Καρύμπαλης, Ε., Σκορδίλη, Σ., 2018. *Σύγχρονα θέματα φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών*. Εκδόσεις ΚΨΜ, Αθήνα. 131 – 161 σελ.

Καρύμπαλης. Θ., 2010, *Παράκτια Γεωμορφολογία*, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα. 199-218 σελ.

Μέργου Φ., 2011. *Επίδραση των φραγμάτων στην “Οικολογική Συνέχεια (Continuum)” των ποταμών*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, ΔΠΜΣ «Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής».

Μήτσιος Κ., 2011, *Υπολογισμός στερεοπαροχής του Μελισσουργιώτικου ρεύματος*. Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Παπαδημητρίου Χ., 2017. *Εκτίμηση μετατόπισης ακτογραμμής με τη χρήση απεικονίσεων Υψηλής Χωρικής Ανάλυσης*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Σχολή Περιβάλλοντος – Τμήμα Επιστήμων της Θάλασσας, Μυτιλήνη.

Παρχαρίδης, Ι., 2015. *Αρχές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Θεωρία και εφαρμογές*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, www.kallipros.gr, Αθήνα

Πετρόπουλος Γ., 2021, «Image Classification Techniques», Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών (Σημειώσεις Μαθήματος Ειδικά Θέματα Εφαρμοσμένης Γεωπληροφορικής στο Γεωπεριβάλλον)

Πετρόπουλος Γ., 2021, «Assessing Classification Accuracy», Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών (Σημειώσεις Μαθήματος Ειδικά Θέματα Εφαρμοσμένης Γεωπληροφορικής στο Γεωπεριβάλλον)

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπογείων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας – Αποτελέσματα Λεκάνης Αλιάκμονα, Τεύχος Α: μελέτη κατηγορίας 20 (Υδρογεωλογικές εργασίες), ΠΑΑ 2007-2013 Ανακτήθηκε από: www.ardeftika.decentral.minagric.gr/

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπογείων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας – Αποτελέσματα Λεκάνης Αξιού, Τεύχος Α: μελέτη κατηγορίας 20 (Υδρογεωλογικές εργασίες), ΠΑΑ 2007-2013 Ανακτήθηκε από: www.ardeftika.decentral.minagric.gr/

Τσώκος Α, Κώτση Ε, Βασιλάκης Ε. Ψηφιακή επεξεργασία χρονοσειράς από δεδομένα Τηλεπισκόπησης υψηλής χωρικής διακριτικής ικανοτάτας με στόχο τη διαχρονική παρατήρηση της μετατόπισης των ακτογραμμών. Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.) ΕΜΠ, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ, Αθήνα.

Τούντα Σ, 2021, Ανίχνευση και χαρτογράφηση φερτών υλικών σε εκβολές διασυνοριακών ποταμών με χρήση διαστημικών δεδομένων παρατήρησης της γης *Copernicus*. Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Φωτείνης Σ., 2014. Η διάβρωση των ακτογραμμών της Ελλάδας. Αξιολόγηση, τρόποι αντιμετώπισης. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Ξενόγλωσση:

Alesheikh A., Ghorbanali A., Nouri N., 2007. *Coastline change detection using remote sensing*. Tehran, Iran, Int. J. Environ. Sci. Tech., 4 (1): 61-66, 2007, DOI: 10.1007/BF03325962

Bedini E., 2007, *Use of GIS and Remote Sensing to detect change along the coastline segment between Shkumbini and Semani rivers, Central Albania*, Geological Survey of Albania, Blloku 'Vasil Shanto, Vol. 40, <https://doi.org/10.12681/bgsg.17218>

Demertzi, I. I., Detsikas, S. E., Tselka, I., Tzanavari, I., Triantakostas, D., Karymbalis, E., and Petropoulos, G. P.: *Monitoring morphological changes in river deltas exploiting GEE and the full Landsat archive*, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-11722, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11722> , 2022.

Petropoulos G., Kalivas D., Griffiths H., Dimou P., 2014. Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 35 (2015) 217–228, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.004>.

TEMİZ F. and DURDURAN S., 2016. *Monitoring Coastline Change Using Remote Sensing and GIS Technology: A case study of Acıgöl Lake, Turkey*. Turkey, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 44 (2016) 042033, doi: 10.1088/1755-1315/44/4/042033.

Hayward T., 2017. *Quantifying 25 Years of Coastal Change in North-eastern Vietnam: A remote sensing and GIS approach*. Aberystwyth University, Department of Geography and Earth Sciences.

R.M. Abou Samra and R.R. Ali, 2020. *Applying DSAS tool to detect coastal changes along Nile Delta, Egypt*, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.11.002>

Raju Aedla et.al, 2015. *Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-Gurpur Rivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques*. Aquatic Procedia 4 (2015) 563 – 570, DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.073

Ali Kourosh Niya, Ali Asghar Alesheikh, Mohsen Soltanpor, Mir Masoud Kheirkhahzarkesh, 2013. *Shoreline Change Mapping Using Remote Sensing and GIS*. International Journal of Remote Sensing Applications Volume 3 Issue 3, September 2013, www.ijrsa.org

Pham Thi Lan, Tong Si Son, Kavinda Gunasekara, Nguyen Thi Nhan, La Phu Hien, 2013. *Application of Remote Sensing and GIS technology for monitoring coastal changes in estuary area of the Red river system, Vietnam*. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 31, No. 6-2, 529-538, 2013, <http://dx.doi.org/10.7848/ksgpc.2013.31.6-2.529>.

Papoutsis I., Kontoes Ch. Loupasakis C., Kiratzi A., 2015. *Geo-Hazard Monitoring in Northern Greece Using InSAR Techniques: The Case Study of Thessaloniki*. Fringe 2015 Workshop, Italy, <https://www.researchgate.net/publication/278026755>

Mourad Louati, Hanen Saïdi, Fouad Zargouni, 2014. *Shoreline change assessment using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Medjerda delta coast, Tunisia*. Arabian Journal of Geosciences, DOI 10.1007/s12517-014-1472-1.

Mustafa et. al.,2017. *Using Water Indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply Remote Sensing and GIS Techniques*. International Journal of Research - GRANTHAALAYAH Vol.5 (Iss.10), DOI: <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v5.i10.2017.2289>.

Naila Matin, G. M. Jahid Hasan, 2021. *A quantitative analysis of shoreline changes along the coast of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques*. Dhaka, Bangladesh: Catena - Elsevier B.V, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105185>.

Gulcan Sarpa, Mehmet Ozcelik, 2016. *Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey*. Journal of Taibah University for Science 11 (2017) 381–391, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.04.005>.

Gamble D, Halls J et.al, 2015. *Nile Delta exhibited a spatial reversal in the rates of shoreline retreat on the Rosetta promontory comparing pre- and post-beach protection*. Geomorphology 228 (2015) p. 1-14 <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.021>

Kaushik Shandilya et.al, 2013. *Applications of Remote Sensing*. Horizons in Earth Science Research, Edition: 1, Chapter: 7, https://www.researchgate.net/publication/286241215_Applications_of_Remote_Sensing

Gudina L.Feyisa et. al, 2014. *Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery*. Remote Sensing of Environment, Volume 140, Pages 23-35, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.

U.S. Geological Survey, 2021. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide*. Reston, Virginia, <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>

Ukrainski Pavel, 2016. *Supervised Classification Help: Roi Separability*. <http://www.50northspatial.org/supervised-classification-help-roi-separability/>

Umwelt und Informationstechnologie Zentrum, UIZ GmbH, 2019. *WebGIS Functions*. Berlin, Germany, <https://uizentrum.de/webgis-functions/?lang=en>

Ηλεκτρονικές πηγές:

- www.axiosdelta.gr/εθνικό-πάрко/προστατευόμενη-περιοχή/οι-ποταμοί/
(Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)
- www.dimosdelta.gr/δημοτικά-διαμερίσματα/
(Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)
- el.wikipedia.org/wiki/Δήμος_Αλεξάνδρειας
(Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)
- el.wikipedia.org/wiki/Δήμος_Πύδνας_-_Κολινδρού
(Ημερομηνία πρόσβασης: 10.06.2022)
- www.hnms.gr
(Ημερομηνία πρόσβασης: 18.05.2022)
- <http://votaniki.gr/prostasia/diktio-natura-2000/stena-rentinas-eyryteri-periochi-spilaio-drakotrypa-spilaio-lakkia-kai-rema-neromana-gr1220002/>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 25.01.2022)
- eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php/FP137/Θεματική%20Ενότητα%2010/REMOTE_SENSING%20NOTES2015-73-77.pdf
(Ημερομηνία πρόσβασης: 25.01.2022)
- <https://www.usgs.gov/centers/whcms/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 12.06.2022)
- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 10.11.2021)
- <https://astro.planitario.gr/paratirontas-tis-metavoles-tis-ellinikis-aktogrammis/>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 03.02.2022)
- <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 08.04.2022)
- <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
(Ημερομηνία πρόσβασης: 08.04.2022)
- <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/landsat-8-collection-2-european-coverage>

(Ημερομηνία πρόσβασης: 12.06.2022)

- <https://www.ogc.org/standards>

(Ημερομηνία πρόσβασης: 12.06.2022)