



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Ειδικευση Γ: Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης & Λιμένων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

*Ανάπτυξη μεθοδολογίας ανίχνευσης ρωγμών λιμενικών  
υποδομών από σκυρόδεμα μέσω ανάλυσης εικόνων με  
γεωχωρική πληροφορία*



***Καγκέλης Δημήτριος-Γεώργιος***

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Χριστίνα Τσάιμου, Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούλιος 2023





# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Ειδικευση Γ: Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης & Λιμένων

*Ανάπτυξη μεθοδολογίας ανίχνευσης ρωγμών λιμενικών υποδομών από  
σκυρόδεμα μέσω ανάλυσης εικόνων με γεωχωρική πληροφορία*

***Διπλωματική Εργασία***

*Καγκέλης Δημήτριος-Γεώργιος*

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Χριστίνα Τσάιμου, Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ

Εργαστήριο Λιμενικών Έργων

Αθήνα, Ιούλιος 2023





# National Technical University of Athens

School of Civil Engineering

INTERDEPARTMENTAL PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES

WATER RESOURCES SCIENCE & TECHNOLOGY

Specialization C: Coastal Zone & Port Management

*Crack detection in port concrete infrastructure by analyzing geospatial  
images*

*Diploma Thesis*

*Kagkelis Dimitrios-Georgios*

Supervisor: Vasiliki Tsoukala, Professor NTUA

Co-Supervisor: Christina Tsaimou, PhD Candidate NTUA

Laboratory of Harbour Works

Athens, July 2023



Copyright © Καγκέλης Δημήτριος-Γεώργιος, 2023  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Kagkelis Dimitrios-Georgios, 2023  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).





# Ευχαριστίες

---

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία μου, με την οποία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στο Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια και σύμβουλο σπουδών μου και επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Τσουκαλά Βασιλική για την ευκαιρία που μου προσέφερε να υλοποιήσω τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Χωρίς τις πολύτιμες συμβουλές της, το ενδιαφέρον και την εμπιστοσύνη της θα ήταν αδύνατο να επιτύχω το στόχο μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στη Συνεπιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Υποψήφια Διδάκτορα του ΕΜΠ, κ. Τσάμου Χριστίνα για τη γενναιόδωρη και ακούραστη υποστήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ο πολύτιμος χρόνος που μου διέθεσε ανιδιοτελώς και η προθυμία της για επεξηγήσεις επάνω στο θέμα της έρευνας ήταν καταλυτικοί παράγοντες επιτυχίας για την επίλυση όλων των εμποδίων και των προβληματισμών.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να παραλείψω και τον Καθηγητή κ. Καράντζαλο Κωνσταντίνο. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του, όπως επίσης και για τις συζητήσεις μας μέσω των οποίων μου μεταλαμπάδευσε γνώσεις και εμπειρίες στα θέματα που αφορούσαν στο πρακτικό σκέλος της εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω, την πιστοποιημένη με άδεια πτητικής λειτουργίας UAS εταιρεία NIREAS ENGINEERING ([www.nireaseng.com](http://www.nireaseng.com)) και ιδιαιτέρως τον κ. Παναγιώτη Σαρταμπάκο για την πολύτιμη συνεισφορά του στη συλλογή δεδομένων για τη μελέτη περίπτωσης που εξετάζεται με χρήση μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (UAV).

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην οικογένειά μου για τη στήριξη, τις θυσίες, την υπομονή και τη συμπαράσταση τους. Τους ευχαριστώ ολόψυχα για την αγάπη που μου δίνουν απλόχερα καθημερινά, την εμπιστοσύνη τους και τις αξίες που μου δίδαξαν.



# Περίληψη

---

Οι λιμένες αποτελούν κρίσιμα περιουσιακά στοιχεία υποδομής που ενισχύουν τις οικονομίες καθώς λειτουργούν ως κόμβοι για το διεθνές εμπόριο και τη διαμετακόμιση. Η συνεχής λειτουργία τους επηρεάζει τη λειτουργική και δομική ακεραιότητα των λιμενικών υποδομών, οι οποίες δέχονται πολυάριθμες καταπονήσεις. Στο πλαίσιο της ορθής διαχείρισης των λιμένων, είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός συστήματος παρακολούθησης της δομικής υγείας (Structural Health Monitoring, SHM), των λιμενικών υποδομών με στόχο την καταγραφή των φθορών και των αστοχιών, την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και τη λήψη σχετικών αποφάσεων για συντήρηση ή αποκατάσταση. Ειδικότερα, όσον αφορά στην ανωδομή ενός λιμένα και στις αντίστοιχες υποδομές από σκυρόδεμα, η παρακολούθηση της δομικής υγείας συχνά συνδέεται με την ανίχνευση ρωγμών. Ο συμβατικός τρόπος ανίχνευσης των ρωγμών σε πλάκες σκυροδέματος περιλαμβάνει επιτόπιες οπτικές επιθεωρήσεις, οι οποίες, ωστόσο, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην υποκειμενικότητα των επιθεωρητών ενώ παράλληλα ενδέχεται να είναι χρονοβόρες στις περιπτώσεις όπου απαιτείται λεπτομερής καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης. Στη σύγχρονη εποχή, παρατηρείται μια αυξανόμενη τάση προς τη χρήση εικόνων που λαμβάνονται από Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) για τον εντοπισμό ρωγμών σε επιφάνειες σκυροδέματος, με σκοπό να ξεπεραστούν ορισμένα μειονεκτήματα της οπτικής επιθεώρησης και να δημιουργηθεί η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας του εντοπισμού, της καταγραφής και της ποσοτικοποίησης των ρωγμών. Τα ΣμηΕΑ παρέχουν την δυνατότητα λήψης διαφόρων τύπων εικόνων μέσω των καμερών που είτε είναι ενσωματωμένες είτε τοποθετούνται πρόσθετα σ' αυτά. Οι εικόνες αυτές μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω με όλα τα είδη μεθόδων της Μηχανικής της Εικόνας για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις ρωγμές. Με τη διερεύνηση των υφιστάμενων μεθόδων Ανάλυσης Εικόνας με τεχνικές που καθιστούν δυνατή την επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων, η παρούσα εργασία επιδιώκει την εξέλιξη των πρακτικών ανίχνευσης ρωγμών σε λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τη χρήση διαφόρων ενοτήτων και βιβλιοθηκών της γλώσσας προγραμματισμού Python για την ανάγνωση, ανάλυση και εξαγωγή εικόνων με όλες τις διαθέσιμες γεωχωρικές πληροφορίες, ενώ η πρόσθετη ανάλυση και οπτικοποίηση πραγματοποιείται με εργαλεία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Για να επαληθευτεί η δυναμική της μεθοδολογίας επιλέγεται η εφαρμογή της στη μελέτη περίπτωσης του Λιμένα Λαυρίου, ο οποίος βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της

Αττικής. Η συνολική ανάλυση έδειξε πως η διαδικασία επεξεργασίας εικόνας ενισχυμένη με εργαλεία που βοηθούν στη διατήρηση της γεωχωρικής πληροφορίας επιτρέπει τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό των ρωγμών με υψηλά ποσοστά ακρίβειας στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα.

## Λέξεις Κλειδιά

Λιμενικές Υποδομές, Παρακολούθηση Δομικής Υγείας, Αξιολόγηση Κατάστασης, Επιθεώρηση, Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος, Μηχανική της Εικόνας, Ανάλυση Εικόνας, Ανίχνευση Ρωγμών, Γεωχωρική Πληροφορία, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

# Abstract

---

Ports are critical infrastructure assets that strengthen economies since they act as hubs for international trade and transit. Their continuous operation affects the functional and structural integrity of port infrastructure, which is subject to numerous stresses and strains. In light of efficient port management, it is necessary to implement a Structural Health Monitoring (SHM) system for port infrastructure to identify distresses and failures, assess the existing condition and make decisions on maintenance or rehabilitation. Within the framework of assessing the performance of port concrete infrastructure, structural health monitoring is often associated with crack detection. The traditional way of detecting cracks in concrete slabs involves in-situ visual inspections, which, however, rely heavily on the subjectivity of the inspectors and may be time-consuming in cases where a detailed identification of the existing condition is required. Nowadays, there is an increasing trend towards the use of images captured by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to detect cracks in concrete surfaces aiming at overcoming certain disadvantages of visual inspection while enabling automating the overall process of detection, mapping, visualization, and quantification. UAVs offer the opportunity to capture different types of images through cameras that are either built-in or mounted on them. These images can be further analyzed using Image Engineering to extract information about the cracks. By exploring current Image Analysis methods with techniques that enable geospatial processing, this research seeks to advance the practice of crack detection in port concrete infrastructure. The proposed methodology involves the use of various Python programming language modules and libraries to read, analyze and extract images with all available geospatial information, while additional analysis and visualization steps are performed using Geographic Information Systems (GIS) tools. To verify the robustness of the methodology, the case study of the Port of Lavrio located at the southeastern tip of Attica, was selected. The overall analysis shown that image processing enhanced with tools that help to retain geospatial information allows for the identification and localization of cracks with high accuracy rates.

## Key Words

Port Infrastructure, Structural Health Monitoring, Condition Assessment, Inspection, Unmanned Aerial Vehicles, Image Engineering, Image Analysis, Crack Detection, Geospatial Information, Geographical Information Systems

# Περιεχόμενα

---

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη .....	ii
Λέξεις Κλειδιά .....	iii
<b>Abstract.....</b>	<b>iv</b>
Key Words .....	v
<b>Περιεχόμενα .....</b>	<b>vi</b>
Ευρετήριο Εικόνων .....	x
Ευρετήριο Πινάκων .....	xiv
Ευρετήριο Σχημάτων .....	xvi
Συνομογραφίες – Ακρωνύμια .....	xx
<b>1 Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο .....	2
1.3 Δομή .....	3
<b>2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....</b>	<b>5</b>
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Παρακολούθηση Λιμενικών Υποδομών .....	6
2.2.1 Υποβάθμιση Λιμενικών Υποδομών .....	7
2.2.2 Σημαντικότητα Παρακολούθησης Λιμενικών Υποδομών.....	14
2.2.3 Παρακολούθηση Δομικής Υγείας Λιμενικών Υποδομών .....	15
2.3 Ανάλυση Εικόνας .....	27
2.4 Εντοπισμός Ρωγμών σε Υποδομές από Σκυρόδεμα με Χρήση Εικόνων ....	35
2.5 Μέθοδοι Ανάλυσης και Επεξεργασίας Εικόνας .....	37
2.5.1 Βελτίωση και Αποκατάσταση Εικόνας .....	39
2.5.2 Κατάτμηση Εικόνας .....	41

2.5.3	Ανίχνευση και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών .....	44
2.5.4	Μορφολογική Επεξεργασία .....	46
2.5.5	Υφιστάμενη Έρευνα Ανίχνευσης Ρωγμών .....	47
<b>3</b>	<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>53</b>
3.1	Περιγραφή Διαδικασίας Απόκτησης Δεδομένων .....	54
3.1.1	Επίγεια Προετοιμασία και Προγραμματισμός Πτήσης.....	54
3.1.2	Μέθοδος Φωτογραμμετρίας.....	55
3.2	Περιγραφή Διαδικασίας Ανάλυσης Εικόνας.....	62
3.2.1	Μέσα Υλοποίησης .....	62
3.2.2	Βήματα Ανάλυσης.....	66
<b>4</b>	<b>Μελέτη Περίπτωσης – Λιμένας Λαυρίου.....</b>	<b>91</b>
4.1	Περιγραφή Περιοχής Μελέτης.....	91
4.1.1	Λιμένας Λαυρίου .....	93
4.1.2	Υφιστάμενες Υποδομές .....	96
4.2	Συλλογή Δεδομένων Λαυρίου για Ανάλυση Εικόνας.....	100
4.2.1	Έρευνα Πεδίου και Περιγραφή Εξοπλισμού.....	100
4.2.2	Δεδομένα Φωτογραμμετρίας .....	104
4.2.3	Δεδομένα Οπτικής Επισκόπησης .....	109
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα .....</b>	<b>113</b>
5.1	Ορισμός Περιοχής Μελέτης και Πλάκας Σκυροδέματος .....	113
5.2	Μετατροπή RGB Εικόνας σε Κλίμακα του Γκρι.....	117
5.3	Εφαρμογή Διάμεσου Φίλτρου.....	118
5.4	Οπτικός Εντοπισμός και Ψηφιοποίηση Ρωγμών.....	119
5.5	Οριοθέτηση Ζώνης Ρωγμών .....	121
5.6	Εφαρμογή Κατάτμησης με Τοπική Κατωφλίωση.....	122
5.7	Διόρθωση Οπτικών Σφαλμάτων Εικόνας – Αφαίρεση Θορύβου .....	126
5.8	Εφαρμογή Μορφολογικών Τελεστών .....	129
5.9	Μετατροπή Ψηφιδωτών Δεδομένων σε Διανυσματικά ως Πολύγωνα ....	141
5.10	Μετατροπή μέσω Σκελετοποίησης και Ομαλοποίησης των Πολυγώνων σε Γραμμές.....	143
5.11	Διαδικασία Παρουσίασης, Οπτικοποίησης, Επικύρωσης Αποτελεσμάτων και Εξαγωγής Στατιστικών Στοιχείων .....	146
5.12	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα .....	162



<b>6 Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα .....</b>	<b>165</b>
<b>7 Βιβλιογραφία .....</b>	<b>169</b>
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>181</b>
1. Διεργασία 1.....	181
2. Διεργασία 2.....	182
3. Διεργασία 3.....	183
4. Διεργασία 4.....	185
5. Διεργασία 5.....	187
6. Διεργασία 6.....	189



# Ευρετήριο Εικόνων

---

Εικόνα 1 – Τμήματα λιμένα που υπέστησαν ζημιές μετά από σεισμό (α) στο Port-au-Prince Πηγή: (Berkeley Seismology Lab, 2010), (β) στο Kobe Πηγή: (UCDAVIS Civil and Environmental Engineering) .....	12
Εικόνα 2 – Τμήματα λιμένα που υπέστησαν ζημιές μετά από τσουνάμι στην Ιαπωνία (α) στην Soma Πηγή: (Sugano et al., 2014), (β) στην Kamaishi Πηγή: (Sugano et al., 2014) .....	12
Εικόνα 3 - Παράδειγμα εξοπλισμού UAV Πηγή: (Xiang et al., 2019) και Παραδείγματα αισθητήρων που ενσωματώνονται σε ένα UAV Πηγή: (De Fazio et al., 2021).....	26
Εικόνα 4 - Θέση του Δήμου Λαυρεωτικής και του Λιμένα Λαυρίου στην Αττική Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	92
Εικόνα 5 - Μεταφορικές Υποδομές σύνδεσης του Λιμένα Λαυρίου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	92
Εικόνα 6 - Λιμένας Λαυρίου (ανατολική λήψη) Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023) .....	93
Εικόνα 7 - Λιμένας Λαυρίου (δυτική λήψη) Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023) .....	94
Εικόνα 8 - Χρήσεις Λιμένα Λαυρίου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	95
Εικόνα 9 - Γενικό Προγραμματικό Σχέδιο (Master Plan) λιμένα Λαυρίου Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023).....	97
Εικόνα 10 - Άποψη τομέα ακτοπλοΐας (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020).....	98
Εικόνα 11 - Άποψη του τομέα ακτοπλοΐας, με κατειλημμένη τη μια θέση για Ro-Ro δυτικά, έτος αναφοράς 2014 Πηγή: Google Earth.....	99
Εικόνα 12 - Άποψη finger piers του λιμένα από εικόνα που ελήφθησε κατά την πτήση του UAV Πηγή:(Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022) .....	99
Εικόνα 13 – Άποψη θωράχισης ανατολικά της τελευταίας ράμπας Ε/Γ-Ο/Γ από εικόνα που ελήφθησε κατά την πτήση του UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022) .....	99

Εικόνα 14 – (α) Η τεχνολογία ανίχνευσης εμποδίων (αισθητήρες) του MAVIC 2 Pro Πηγή: (Corrigan, 2020) (β) UAV MAVIC 2 στο πεδίο Pro Πηγή: Εργαστήριο Λιμενικών ‘Εργων ΕΜΠ.....	101
Εικόνα 15 - Στιγμιότυπα κατά την απογείωση και την προσγείωση του UAV Πηγή: Εργαστήριο Λιμενικών ‘Εργων ΕΜΠ.....	102
Εικόνα 16 - Σημεία Ελέγχου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	103
Εικόνα 17 - Θέσεις λήψεων και κατηγοριοποίηση ανάλογα με την κάλυψη της περιοχής από αριθμό αεροφωτογραφιών Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) .....	104
Εικόνα 18 - Θέσεις Σημείων Ελέγχου και εκτιμώμενο σφάλμα των συντεταγμένων Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) .....	105
Εικόνα 19 - Ορθοφωτοχάρτες περιοχής μελέτης Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) .....	107
Εικόνα 20 - Παράδειγμα (1) εντοπισμού τεχνητής φθοράς από την οπτική επισκόπηση στον Ορθοφωτοχάρτη στην πλάκα σκυροδέματος από την πτήση UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022) .....	108
Εικόνα 21 - Παράδειγμα (2) εντοπισμού φυσικής φθοράς από την οπτική επισκόπηση στον Ορθοφωτοχάρτη στην πλάκα σκυροδέματος από την πτήση UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022) .....	109
Εικόνα 22 - Παράδειγμα εντοπισμού φθορών από την οπτική επισκόπηση που δεν σχετίζονται με την εμφάνιση ρωγμών (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020).....	110
Εικόνα 23 - Παράδειγμα εντοπισμού ρωγμών από την οπτική επισκόπηση (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020) .....	110
Εικόνα 24 - Παραδείγματα ρωγμών (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020).....	111
Εικόνα 25 – Περιοχή μελέτης (Τομέας Ακτοπλοΐας).....	113
Εικόνα 26 – Οριοθέτησης πλακών σκυροδέματος της περιοχής μελέτης.....	115
Εικόνα 27 – Παραδείγματα αιτιολόγησης επιλογής πλάκας σκυροδέματος μελέτης.....	115
Εικόνα 28 - Αποτύπωση ολόκληρης πλάκας σκυροδέματος μελέτης.....	116
Εικόνα 29 – Αποτελέσματα μετατροπής σε κλίμακα του γκρι.....	117
Εικόνα 30 - Αποτελέσματα εφαρμογής διαμέσου φίλτρου.....	118
Εικόνα 31 – Παράδειγμα εξομάλυνσης/μείωσης του θορύβου (α) εικόνα κλίμακας του γκρι, (β) εικόνα με εφαρμογή διάμεσου φίλτρου.....	119
Εικόνα 32 – Παράδειγμα χρήσης εργαλείων οπτικής απόδοσης (α) εικόνα με εφαρμογή διάμεσου φίλτρου, (β) εικόνα με χρήση εργαλείων οπτικής απόδοσης .....	120

Εικόνα 33 – Ψηφιοποίηση ρωγμών .....	121
Εικόνα 34 - Οριοθέτηση ζώνης ρωγμών για δημιουργία νέων εικόνων εισόδου .....	121
Εικόνα 35 – Αιτιολόγηση αποκλεισμού ISI 3 από τη συνέχεια της μεθοδολογίας ανίχνευσης.....	122
Εικόνα 36 – Αποτελέσματα αλγορίθμου Local Otsu για τις 3 εικόνες/λήψεις.....	123
Εικόνα 37 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος από Local Otsu.....	124
Εικόνα 38 - Αποτελέσματα αλγορίθμου Local Threshold για τις 3 εικόνες/λήψεις ....	125
Εικόνα 39 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος από Local Threshold.....	126
Εικόνα 40 - Αποτελέσματα αποθορυβοποίησης για τις 3 εικόνες/λήψεις.....	127
Εικόνα 41 - Αποτελέσματα ζώνης απομόνωσης ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις .....	129
Εικόνα 42 - Αποτελέσματα διαστολής ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις .....	131
Εικόνα 43 - Αποτελέσματα συστολής ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις.....	132
Εικόνα 44 – Παράδειγμα αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικού τελεστή διαστολής για τις 3 εικόνες/λήψεις (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) εικόνα με διαστολή.....	133
Εικόνα 45 - Παράδειγμα αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικού τελεστή συστολής για τις 3 εικόνες/λήψεις (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) εικόνα με συστολή.....	134
Εικόνα 46 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικών τελεστών (α) διαστολή (β) συστολή.....	135
Εικόνα 47 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αποτελέσματος κατωφλίωσης Local Threshold και (β) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών.....	136
Εικόνα 48 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος κατωφλίωσης Local Threshold και (γ) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών (παράδειγμα 1) .....	137
Εικόνα 49 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος κατωφλίωσης Local Threshold και (γ) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών (παράδειγμα 1) .....	138
Εικόνα 50 – Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών με χρώμα σε κάθε εικόνα/λήψη....	139
Εικόνα 51 - Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη και (β) εντοπισμένες ρωγμές με χρώμα.....	140
Εικόνα 52 - Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη και (β) εντοπισμένες ρωγμές με χρώμα.....	141
Εικόνα 53 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής εικόνας σε πολύγωνα (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή εικόνας σε πολύγωνο και (γ) ομαλοποίηση ορίων πολυγώνου .....	142

Εικόνα 54 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής εικόνας σε πολύγωνα (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή εικόνας σε πολύγωνο και (γ) ομαλοποίηση ορίων πολυγώνου .....	143
Εικόνα 55 – Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολύγωνων σε γραμμές.....	144
Εικόνα 56 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολύγωνων σε γραμμές (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή πολυγώνου σε γραμμή και (γ) ομαλοποίηση γραμμών .....	145
Εικόνα 57 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολύγωνων σε γραμμές (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή πολυγώνου σε γραμμή και (γ) ομαλοποίηση γραμμών .....	146
Εικόνα 58 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ψηφιοποίησης ρωγμών .....	147
Εικόνα 59 – Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανίχνευσης ρωγμών μεθοδολογίας και καταγεγραμμένων ρωγμών (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψης, (β) πραγματικές ρωγμές και (γ) ρωγμές εντοπισμένες από μεθοδολογία.....	149
Εικόνα 60 - Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανίχνευσης ρωγμών μεθοδολογίας και καταγεγραμμένων ρωγμών (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψης, (β) πραγματικές ρωγμές και (γ) ρωγμές εντοπισμένες από μεθοδολογία.....	151
Εικόνα 61 - Παράδειγμα διαδικασίας υπολογισμού πλάτους ρωγμών.....	152
Εικόνα 62 – Διαδικασία επικύρωσης αποτελεσμάτων (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) ψηφιοποίηση ορίων ρωγμών, (γ) μετατροπή ορίων σε εικόνα και (δ) αποτέλεσμα μεθοδολογίας .....	154
Εικόνα 63 - Διαδικασία επικύρωσης αποτελεσμάτων (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) ψηφιοποίηση ορίων ρωγμών, (γ) μετατροπή ορίων σε εικόνα και (δ) αποτέλεσμα μεθοδολογίας .....	155
Εικόνα 64 – Πίνακες σύγκρισης (α) παραδείγματος 1 και (β) παραδείγματος 2 .....	157

# Ευρετήριο Πινάκων

---

Πίνακας 1 - Κοινές μορφές εικόνας και οι σχετικές ιδιότητές τους Πηγή: (Solomon & Breckon, 2011).....	33
Πίνακας 2 - Χαρακτηριστικά κάμερας για τη συλλογή στοιχείων κατά την πτήση του UAV Πηγή: (DJI, 2020).....	101
Πίνακας 3 – Βασικά χαρακτηριστικά διαδικασίας πτήσεων όπως αυτά καταγράφηκαν στην Αναφορά Επεξεργασίας Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) .....	103
Πίνακας 4 - Πίνακας συντεταγμένων Σημείων Ελέγχου – Εκτιμώμενα σφάλματα Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) .....	105
Πίνακας 5 – Πίνακας σύγκρισης ακραίων τιμών .....	119
Πίνακας 6 – Πίνακας εξαγωγής υπολογισμών μήκους και πλάτους .....	153
Πίνακας 7 – Πίνακας αποτελεσμάτων μετρικών μεθοδολογίας.....	157
Πίνακας 8 – Πίνακας αποτελεσμάτων f-score μεθοδολογίας .....	158
Πίνακας 9 – Πίνακας παραμέτρων μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας .....	163
Πίνακας 10 - Πίνακας επικύρωσης αποτελεσμάτων μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας ..	163





# Ευρετήριο Σχημάτων

---

Σχήμα 1 - Διάρκεια Ζωής Μεταφορικών Υποδομών Πηγή: (Rodrigue, 2020) .....	7
Σχήμα 2 - Άμεσες και Έμμεσες επιπτώσεις από την Υποβάθμιση των Υποδομών Πηγή: (Collins & Blin, 2018).....	8
Σχήμα 3 - Σύνοψη όλων των μηχανισμών φθοράς και διάβρωσης του σκυροδέματος Πηγή: (Bertolini et al., 2013) .....	9
Σχήμα 4 - Μηχανισμοί γήρανσης Πηγή: (Collins & Blin, 2018).....	10
Σχήμα 5 - Παράγοντες φθοράς λιμενικών υποδομών σύμφωνα (α) με τη γνώμη των εμπειρογνομόνων και (β) με εκθέσεις ασφαλείας Πηγή: (Cha et al., 2015).....	13
Σχήμα 6 - Ροή διαδικασιών ενός συστήματος διαχείρισης του κύκλου ζωής των λιμενικών υποδομών Πηγή: (Port Technology Group, 2009).....	15
Σχήμα 7 - Αλληλουχία ενεργειών σε ένα πρόγραμμα SHM Πηγή: (Sierra et al., 2022) .....	18
Σχήμα 8 - Συνήθη όργανα και τεχνικές παρακολούθησης της μεθόδου SHM Πηγή: (Frangopol & Messervey, 2009) .....	19
Σχήμα 9 - Σχηματική αναπαράσταση των νέας γενιάς αισθητήρων Πηγή: (Sony et al., 2019) .....	22
Σχήμα 10 - Δισδιάστατη μέθοδος καταγραφής με βάση την όραση υπολογιστών Πηγή: (Ye et al., 2016) .....	24
Σχήμα 11 - Σκοπός και εφαρμογές ενός SHM βασισμένου στη λήψη εικόνων Πηγή: (Payawal & Kim, 2023).....	25
Σχήμα 12 - Αναπαράσταση ψηφιακής δισδιάστατης και τρισδιάστατης εικόνας με πίνακα διακριτών σημείων Πηγή: (Jähne, 2002).....	29
Σχήμα 13 - Σχηματική Αναπαράσταση Μηχανικής της Εικόνας Πηγή: (Zhang, 2022) .....	31
Σχήμα 14 - Σχηματική Αναπαράσταση του μηχανισμού Ανάλυσης Εικόνας Πηγή: (Zhang, 2021) .....	32
Σχήμα 15 - Χρωματικός χώρος RGB με πρωτεύοντα και δευτερεύοντα χρώματα Πηγή: (Sonka et al., 2014) .....	34
Σχήμα 16 - Στάδια περιγραφής διάρκειας ζωής κατασκευών υπό φθορά επηρεασμένα από διάβρωση Πηγή: (Siamphukdee, 2015).....	36

Σχήμα 17 - Κατηγοριοποίηση της μεθόδου ενίσχυσης εικόνας Πηγή: (Dumka et al., 2020) .....	39
Σχήμα 18 - Κατηγοριοποίηση θορύβου εικόνας Πηγή: (Baskar et al., 2023) .....	40
Σχήμα 19 - Αναπαράσταση Ιστογράμματος εικόνας με χρήση ενός κατωφλιού (αριστερά) και πολλαπλών (δεξιά) Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	43
Σχήμα 20 - Τύποι ακμών Πηγή: (Pepe et al., 2018) .....	45
Σχήμα 21 - (α) Παραδείγματα δομικών στοιχείων Πηγή: Ιδία Επεξεργασία, (β) Παράδειγμα διαδικασίας μορφολογικής επεξεργασίας Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	46
Σχήμα 22 - Ταξινόμηση των τεχνικών ανίχνευσης ρωγμών Πηγή: (Gupta & Dixit, 2022) .....	48
Σχήμα 23 - Η Αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	53
Σχήμα 24 - Προσδιορισμός κλίμακας φωτογραφίας για αντικείμενο με σημεία στο επίπεδο αναφοράς Πηγή: (Philpot & Philipson, 2012) .....	56
Σχήμα 25 - Προσδιορισμός κλίμακας φωτογραφίας για σημεία εκτός επιπέδου αναφοράς Πηγή: (Philpot & Philipson, 2012).....	57
Σχήμα 26 - Μετωπική και εγκάρσια επικάλυψη για τη λήψη φωτογραφιών κατά την πτήση του UAV Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	59
Σχήμα 27 - Ο μετασχηματισμός από το επίγειο στο φωτογραφικό σύστημα συντεταγμένων Πηγή: (Liu et al., 2012) .....	60
Σχήμα 28 - Οι γωνίες στροφής $\omega, \varphi, \chi$ Πηγή: (Pepe et al., 2018) .....	61
Σχήμα 29 - Σύνοψη διαδικασιών απόκτησης δεδομένων Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	61
Σχήμα 30 - Παρουσίαση μεθόδου αποκοπής Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	67
Σχήμα 31 - Παρουσίαση μεθόδου μετατροπής σε κλίμακα του γκρι Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	68
Σχήμα 32 - Παρουσίαση τεχνικής διάμεσου φιλτραρίσματος Πηγή: Ιδία Επεξεργασία...69	
Σχήμα 33 - Παρουσίαση ψηφιοποίησης ρωγμών Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	70
Σχήμα 34 - Περιγραφή διαδικασίας εφαρμογής δομικού στοιχείου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	76
Σχήμα 35 - Παράδειγμα εφαρμογής μορφολογικού τελεστή συστολής Πηγή: (Yağmur Çiğdem Aktaş, 2021) .....	78
Σχήμα 36 - Παράδειγμα εφαρμογής μορφολογικού τελεστή διαστολής Πηγή: (Yağmur Çiğdem Aktaş, 2021) .....	79
Σχήμα 37 - Παράδειγμα διανυσματοποίησης Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	81
Σχήμα 38 - Παράδειγμα διαγράμματος Voronoi Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	82
Σχήμα 39 - Παράδειγμα μετατροπής σε γραμμές και εξομάλυνσης Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	82

Σχήμα 40 – Σχήμα αναπαράστασης διαδικασίας μετατροπής από διανυσματικό σε ψηφιδωτό αρχείο με 3 διαφορετικά μεγέθη εικονοστοιχείων .....	84
Σχήμα 41 – Πίνακας Σύγκρισης και Μετρικές Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	87
Σχήμα 42 – Μεθοδολογία Ανάλυσης Εικόνας για ανίχνευση ρωγμών με εργαλεία GIS και Python Πηγή: Ιδία Επεξεργασία .....	88
Σχήμα 43 - Διάγραμμα Ροής Βημάτων Προγραμματισμού (Python) για την Ανάλυση Εικόνας Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.....	89



# Συντομογραφίες – Ακρωνύμια

---

ΣμηΕΑ	Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών
GIS	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών - Geographic Information Systems
UAV	Μη-Επανδρωμένα Αεροσκάφη - Unmanned Aerial Vehicle
ΚΥ - CI	Κρίσιμες Υποδομές - Critical Infrastructure
AKZ - LCA	Ανάλυση Κύκλου Ζωής - Life Cycle Analysis
ASCE	American Society of Civil Engineers
ROV	Remotely Operated Vehicles
GPS	Global Positioning System
RS	Remote Sensing
SHM	Structural Health Monitoring
IoT	Internet of Things
TFS	Traditional Fixed Sensors
TCS	Traction Control System
PWAS	Piezoelectric Wafer Active Sensors
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
WSN	Wireless Sensor Networks
BOTDA	Brillouin Optical Time-Domain Analysis
FBG	Fibre Bragg Grating Sensor
LDV	Laser Doppler Vibrometer
TLS	Terrestrial Laser Scanner
IRT	Infrared Thermography
GPR	Ground-Penetrating Radar
NDT	Non Destructive Testing
ASNT	American Society for Nondestructive Testing

NDI	Non-Destructive Inspection
NDE	Non-Destructive Evaluation ή Non-Destructive Examination
NIR	Near Infrared
SWIR	ShortWave Infrared
TIR	Thermal Infrared
LiDAR	Light Detection And Ranging
DIP	Digital Image Processing
MP	Megapixels
IP	Image Processing
IA	Image Analysis
IE	Image Engineering
IU	Image Understanding
CMYK	Cyan Magenta Yellow Key
RGB	Red Green Blue
GNSS	Global Navigation Satellite System
IDE	Integrated Development Environment
NumPy	Numerical Python
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
OpenCV	Open Source Computer Vision
Scipy	Scientific Python
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
KP	Κατώτατη Ρηχία
MΣΘ	Μέση Στάθμη της Θάλασσας
E/T-O/T	Επιβατηγό/Οχηματαγωγό
ISPS	International Code for the Security of Ships and Port Facilities
GLONASS	Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
ΥΠΑ	Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας
ISI	In-Situ Inspection

# 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Τα λιμάνια από την αρχαιότητα έως και σήμερα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη μιας ηπείρου, μιας χώρας, μιας πόλης ειδικότερα, καθώς αποτελούν τον τόπο, στον οποίο αναπτύσσεται πληθώρα δραστηριοτήτων σχετιζόμενων με τη μεταφορά φορτίων ή επιβατών. Ιστορικά, αποτελούν το συνδετικό κρίκο διασύνδεσης μεταξύ θάλασσας και ενδοχώρας (de Langen et al., 2018; Dwarakish & Salim, 2015), κάτι το οποίο διαφαίνεται από την απόδοση του «Λιμένα» στα λατινικά ως “Porta”, δηλαδή είσοδος, πύλη ή πόρτα.

Οι λιμένες ως στρατηγικοί κόμβοι για τις θαλάσσιες μεταφορές, την παραγωγή ενέργειας, το εμπόριο και τη γαλάζια οικονομία (de Langen et al., 2018), πρέπει να προσαρμόζονται καταλλήλως στις ραγδαίες εξελίξεις, τεχνολογικές και μη, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργικότητά τους. Έργα τέτοιου βεληνεκούς είναι αδύνατο να κατασκευάζονται συνεχώς, με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον να στρέφεται περισσότερο σε υφιστάμενους λιμένες και στους τρόπους μετριασμού των συνεπειών από παράγοντες που θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργικότητα των λιμενικών υποδομών, όπως η γήρανση, το θαλάσσιο περιβάλλον, οι φυσικοί κίνδυνοι, τα ανεπαρκή μέτρα συντήρησης και αποκατάστασης, οι συνθήκες φόρτωσης και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Lauritzen et al., 2019).

Γενικά, η ορθή διαχείριση των υποδομών καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής (life cycle) τους σε ένα πλαίσιο διατήρησης της δομικής ακεραιότητας (Zhang et al., 2017), καθίσταται εξίσου σημαντική με το σχεδιασμό της υποδομής (Del Grosso, 2001). Ο όρος της διαχείρισης πρακτικά περιλαμβάνει ενέργειες προσδιορισμού της κατάστασης μιας υποδομής συμπεριλαμβάνοντας την πρόβλεψη της απόδοσης σε μια μελλοντική κατάσταση,

την ανίχνευση φθορών και τον προσδιορισμό της φάσης εμφάνισης και διάδοσης τους και την επίδραση της συντήρησης και της επισκευής στα τμήματα της υποδομής (Frangopol & Soliman, 2019). Από τη στιγμή που πρακτικά εξετάζεται μια συνεχής μεταβολή της κατάστασης των υποδομών, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν στρατηγικές παρακολούθησης της δομικής κατάστασης/υγείας τους (Structural Health Monitoring – SHM) (Agdas et al., 2016).

Όσον αφορά στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα, η παρακολούθηση της δομικής υγείας περιλαμβάνει την καταγραφή και αξιολόγηση διαφόρων τύπων φθορών όπως είναι οι ρωγμές, δηλαδή τα ακανόνιστα γραμμικά στοιχεία στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Shifani et al., 2020). Οι ρωγμές στις λιμενικές υποδομές αποτελούν σημαντική πρόκληση για τη δομική τους ακεραιότητα με τις ταχτικές επιθεωρήσεις να χαρακτηρίζονται ζωτικής σημασίας για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση της σοβαρότητας τους, καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω δομικές βλάβες εάν δεν αντιμετωπιστούν έγκαιρα (Parrany & Mirzaei, 2022).

Στη σύγχρονη εποχή της αυτοματοποίησης, νέες τάσεις καταγραφής φθορών επιτάσσουν τη ψηφιακή επεξεργασία εικόνων για την ανίχνευση ρωγμών σε υποδομές από σκυρόδεμα (Gupta & Dixit, 2022). Οι συνήθεις πρακτικές για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση των ρωγμών περιλαμβάνουν τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων και τεχνικών για την ανάλυση εικόνων που λαμβάνονται στο πλαίσιο της επιθεώρησης των υποδομών. Ωστόσο, οι υφιστάμενες μεθοδολογίες δεν παρέχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας και αξιοποίησης της γεωχωρικής πληροφορίας που ενδέχεται να περιλαμβάνεται στις εικόνες συλλογής και η οποία είναι απαραίτητη για τη χαρτογράφηση και τον ακριβή εντοπισμό των ρωγμών.

Η ανάγκη αξιοποίησης της γεωχωρικής πληροφορίας εντείνεται από την αυξημένη ζήτηση για παρακολούθηση της κατάστασης των υποδομών με Μη-Επανδρωμένα Αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicle – UAV). Συγκεκριμένα, οι εικόνες συλλογής με UAV εμπεριέχουν πληροφορίες που αφορούν στη χωροθέτηση των υποδομών (γεωχωρική πληροφορία) και μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας με στόχο την παραγωγή Ορθοφωτοχαρτών, δηλαδή εικόνων που αποτυπώνουν τις τρισδιάστατες υποδομές σε ένα επίπεδο χωρίς την επίδραση της κλίσης και της προοπτικής που παρατηρούνται κατά την λήψη εικόνων.

## 1.2 Αντικείμενο

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η ενσωμάτωση διαδικασιών ανάλυσης



εικόνας με Ορθοφωτοχάρτες που έχουν δημιουργηθεί από τη λήψη εικόνων από UAV και περιλαμβάνουν γεωχωρική πληροφορία, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση ρωγμών σε υποδομές από σκυρόδεμα, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των ενεργειών συντήρησης ή αποκατάστασης.

Για το λόγο αυτό, το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας ανίχνευσης ρωγμών σε πλάκες σκυροδέματος της ανωδομής λιμένων αξιοποιώντας τη γεωχωρική πληροφορία που εμπεριέχεται στους Ορθοφωτοχάρτες. Στη μεθοδολογία λαμβάνονται υπόψη διάφορες υφιστάμενες τεχνικές που σχετίζονται με τον ευρύτερο όρο της Μηχανικής της Εικόνας (Image Engineering) και υλοποιούνται μέσω κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python, με την ιδιαιτερότητα πως σε κάθε βήμα ενσωματώνεται η γεωχωρική πληροφορία και συνεπώς υπάρχει ακριβής αποτύπωση των εικόνων σε ένα σύστημα αναφοράς. Επιπλέον βήματα ανάλυσης υλοποιούνται μέσω των εργαλείων των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems - GIS).

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται στη μελέτη περίπτωσης του Λιμένα Λαυρίου προκειμένου να ελεγχθεί και να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητά της. Τα απαιτούμενα γεωχωρικά δεδομένα λαμβάνονται από την πτήση UAV σε τέσσερις (4) διαφορετικές χρονικές περιόδους με στόχο την παρακολούθηση της εξέλιξης των ρωγμών στην επιφάνεια της ανωδομής του λιμένα και την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Όλα τα στοιχεία επεξεργάζονται και αναλύονται με τέτοιο τρόπο ώστε η εφαρμογή της μεθοδολογίας να είναι όσο το δυνατό πιο αυτοματοποιημένη.

### 1.3 Δομή

Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας συνοψίζεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται αναλυτικά οι αιτίες υποβάθμισης και οι υφιστάμενες μέθοδοι αποτύπωσης και καταγραφής της κατάστασης των λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη ότι μία εκ των συνηθέστερων φθορών που εντοπίζονται στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα είναι οι ρωγμές, πραγματοποιείται διεξοδική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την ανίχνευση ρωγμών μέσω ανάλυσης εικόνων. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της ανάλυσης εικόνας, καθώς επίσης και οι μέθοδοι και οι τεχνικές που εφαρμόζονται σε διάφορους τύπους υποδομών από σκυρόδεμα.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία που ακολουθείται από το στάδιο απόκτησης των δεδομένων και την πτήση του UAV για την



εξαγωγή των ορθοφωτοχαρτών μέσω της Φωτογραμμετρίας έως και το στάδιο ανάπτυξης βημάτων για ανίχνευση, οπτικοποίηση και εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων των ρωγμών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στο Λιμένα Λαυρίου που αποτελεί τη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε καταλήγοντας στην επικύρωση (validation) των αποτελεσμάτων δηλαδή στην ποσοτική σύγκριση των ρωγμών που ανιχνεύονται με την προτεινόμενη μεθοδολογία, με τις πραγματικές.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το θεωρητικό και το πρακτικό σκέλος της εργασίας ενώ περιλαμβάνονται και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος η εργασία περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, όπως επίσης και το Παράτημα Α με την παράθεση του κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python για κάθε βήμα της μεθοδολογίας όπου απαιτήθηκε η χρήση της.

# 2

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Γενικά

Ο όρος λιμάνι εννοιολογικά αποδίδεται στον ασφαλή όρμο που χρησιμεύει ως Πύλη μεταξύ χερσαίας και θαλάσσιας ζώνης, επιτρέποντας την αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική διακίνηση αγαθών μεταξύ διαφορετικών περιοχών και χωρών (Dwarakish & Salim, 2015). Ο ρόλος των λιμένων για την κοινωνία είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της έγκαιρης παράδοσης αγαθών και υπηρεσιών, καθώς και για την ανάπτυξη και εξέλιξη των περιοχών που εξυπηρετούν.

Οι σύγχρονοι λιμένες αποτελούν Υποδομές που εντάσσονται στα Δίκτυα Μεταφορών και δρουν ως «Σύστηματα», όπου με ορθή αξιοποίηση των εγκαταστάσεων και των λειτουργιών τους, επιτυγχάνεται αρχικά η ομαλή προσέγγιση των πλοίων και στη συνέχεια η αποδοτική φορτοεκφόρτωσή τους. Τα λιμάνια αναγόμενα στον τομέα των μεταφορών, μπορούν να χαρακτηριστούν ως Κρίσιμες Υποδομές σύμφωνα με την Οδηγία 2008/114/EK (European Council, 2008), η οποία προσαρμόστηκε στην Ελληνική νομοθεσία μέσω του ΠΔ 39/2011.

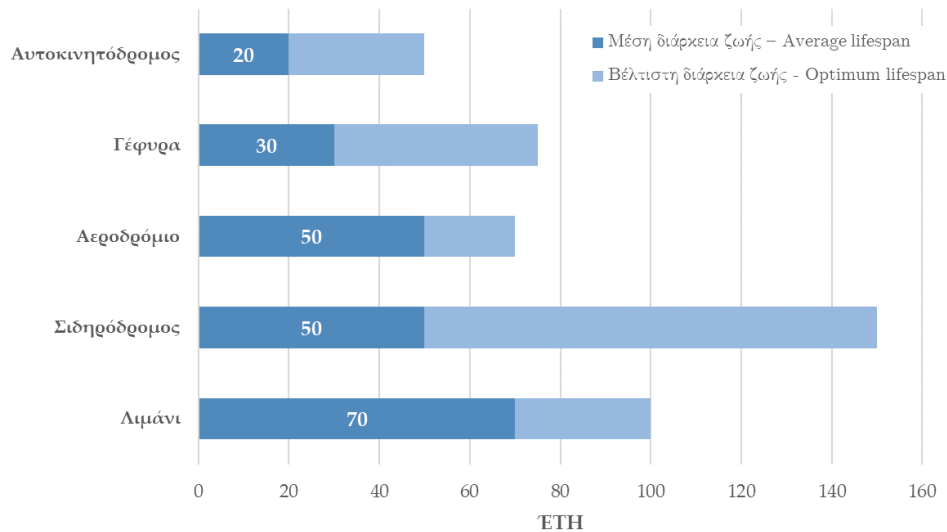
Ως Κρίσιμες Υποδομές - ΚΥ (Critical Infrastructure - CI), το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο (European Council, 2008) ορίζει: «τα περιουσιακά στοιχεία, συστήματα ή μέρη αυτών που βρίσκονται εντός των κρατών μελών και τα οποία είναι ουσιώδη για τη διατήρηση των λειτουργιών ζωτικής σημασίας της κοινωνίας, της υγείας, της ασφάλειας, της οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας των μελών της, και των οποίων η διακοπή λειτουργίας ή η καταστροφή θα είχε σημαντικό αντίκτυπο για ένα κράτος μέλος, ως αποτέλεσμα της αδυναμίας διατήρησης των λειτουργιών αυτών».

Οι υποδομές ενός κράτους συμπεριλαμβανομένων και των λιμενικών υποδομών υποβαθμίζονται λόγω της συνεχούς και αδιάκοπης λειτουργίας τους, με το πέρασμα του χρόνου αλλά και από διάφορους άλλους παράγοντες. Η έκθεση των υποδομών σε πολλαπλούς κινδύνους καθημερινά είναι ένα σύνηθες φαινόμενο, με τη διαχείριση και την προστασία τους να έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως και την επιστημονική κοινότητα να χρησιμοποιεί παραδείγματα από καταστροφικά ατυχήματα του παρελθόντος προκειμένου να αναπτύξει τη θεωρία της ανθεκτικότητας (resilience) και να ισχυροποιήσει την ικανότητα μιας υποδομής να αντέχει στο χρόνο, να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει (Moteff, 2012; Pursiainen, 2009; Zio, 2016).

## 2.2 Παρακολούθηση Λιμενικών Υποδομών

Οι υποδομές αποτελούν περιουσιακό στοιχείο δεδομένου ότι συμβάλλουν στη μακροπρόθεσμη αξία των κρατών. Δεδομένου ότι τα περιουσιακά στοιχεία πρέπει να παρέχουν οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους γίνεται σαφές πως η ανάγκη για τη διασφάλιση της λειτουργικότητάς τους είναι κάτι παραπάνω από σημαντική. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης των υποδομών που καθορίζουν την κατανομή των χρηματικών πόρων ή των πόρων από νέες επενδύσεις στις υποδομές για: α) το σενάριο να τεθεί μια υποδομή εκτός λειτουργίας πριν το τέλος της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής ή β) το σενάριο μια υποδομή να χρειαστεί να μετασκευαστεί κατά τη διάρκεια της ζωής της για να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τα προβλήματα υποβάθμισης (Wilbanks et al., 2013).

Σύμφωνα με τον Rodrigue (2020), η διάρκεια ζωής (lifespan) μιας Υποδομής του τομέα των μεταφορών, είναι ο κατά προσέγγιση αριθμός των ετών κατά τα οποία αναμένεται μια υποδομή να αποδώσει υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ενώ θα δέχεται τακτική συντήρηση (μέση διάρκεια ζωής – average lifespan). Ωστόσο, επειδή η διάρκεια ζωής ενός τέτοιου έργου, βασίζεται στη διάρκεια ζωής όλων των δομικών υλικών που χρειάστηκαν για την κατασκευή του αλλά και στον τρόπο που τα υλικά αυτά συντέθηκαν, μπορεί να παραταθεί βάσει υψηλότερων τεχνικών απαιτήσεων και συνθηκών, προσδιορίζοντας έτσι έναν όρο που στη διεθνή βιβλιογραφία συναντάται ως βέλτιστη διάρκεια ζωής (optimum lifespan). Για τα λιμάνια καθώς και για τις συναφείς λιμενικές εγκαταστάσεις, σύμφωνα με το Σχήμα 1, διαφαίνεται πως η μέση διάρκεια ζωής είναι η μεγαλύτερη από κάθε άλλο έργο του κλάδου των Μεταφορών.



Σχήμα 1 - Διάρκεια Ζωής Μεταφορικών Υποδομών Πηγή: (Rodrigue, 2020)

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διάρκεια ζωής της υποδομής, πρέπει να λειτουργεί με ένα συγκεκριμένο στρατηγικό τρόπο που θα μεγιστοποιεί την ασφάλεια και τα οφέλη, διαδικασία επιτρεπτή μόνο με διενέργεια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής – AKZ (Life Cycle Analysis - LCA), όπως επισημαίνουν οι Kumar and Gardoni (2014) στην έρευνα τους. Στην AKZ, μελετάται η απόδοση ενός συστήματος, σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του από την άποψη μιας ποικιλίας μέτρων απόδοσης, όπως η αξιοπιστία και η εξάρτησή της από την ηλικία του συστήματος, το κόστος και τα οφέλη της λειτουργίας του, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των επισκευών και των συντηρήσεων. Ακριβώς αυτό είναι και το βασικό προτέρημα της μεθόδου, δηλαδή η παροχή μιας ολοκληρωμένης εικόνας βιωσιμότητας αξιολογώντας τις επιπτώσεις όλων των σταδίων του κύκλου ζωής, γι' αυτό και καθίσταται αναγκαία στον προσδιορισμό των στρατηγικών επέμβασης για την συντήρηση και αποκατάσταση.

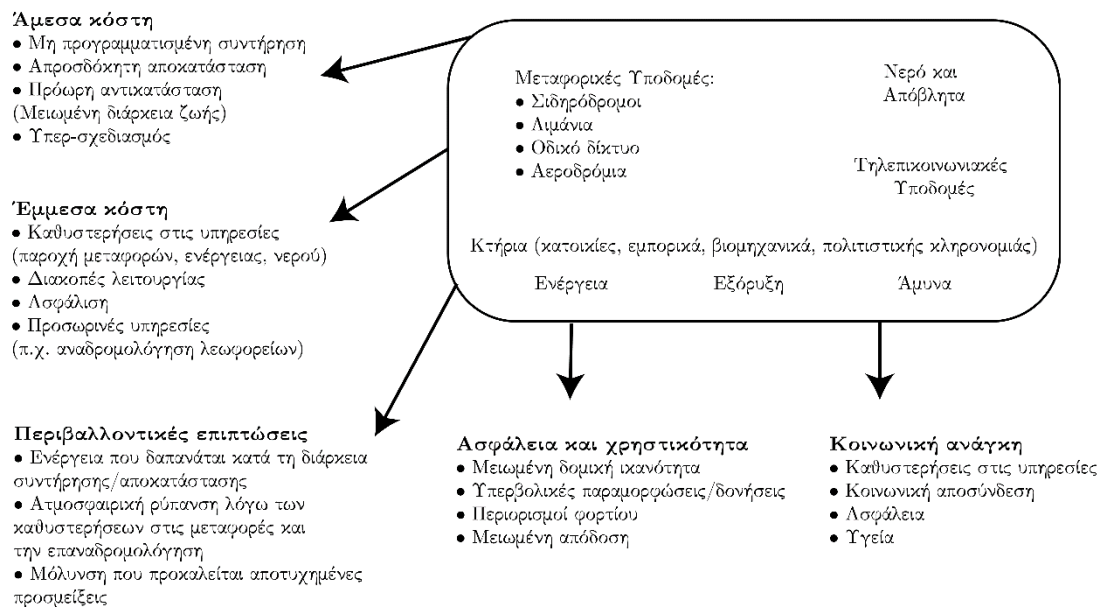
### 2.2.1 Υποβάθμιση Λιμενικών Υποδομών

Οι μεταφορικές υποδομές και ειδικότερα οι λιμενικές προάγουν την ανάπτυξη σε τομείς όπως το εμπόριο και ο τουρισμός και επομένως, η υποβάθμισή τους μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες για την οικονομική δραστηριότητα και τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα σε μετακινούμενους, επιχειρήσεις, οργανισμούς κ.ο.κ. λόγω της μειωμένης παραγωγικότητας.

Με τον όρο υποβάθμιση των λιμενικών υποδομών, πρακτικά εννοείται η σταδιακή υποβάθμιση στο πέρασμα του χρόνου λόγω φθοράς, έλλειψης συντήρησης και αδυναμία

ορθής διαχείρισης. Ο όρος της υποβάθμισης είναι πλήρως συνυφασμένος με την έννοια του χρόνου, υπό το πρίσμα της ηλικίας του έργου, αλλά και με την έννοια της ανθεκτικότητας (resiliency) και της τρωτότητας (vulnerability). Με απλούστερα λόγια, οι τρεις αυτοί όροι, καθένας ξεχωριστά αλλά και όλοι μαζί βάσει των αμφίδρομων σχέσεων τους, είναι οι βασικοί που διερευνώνται στην ανάλυση της αστοχίας (failure) μιας υποδομής (Doyle & Betti, 2010).

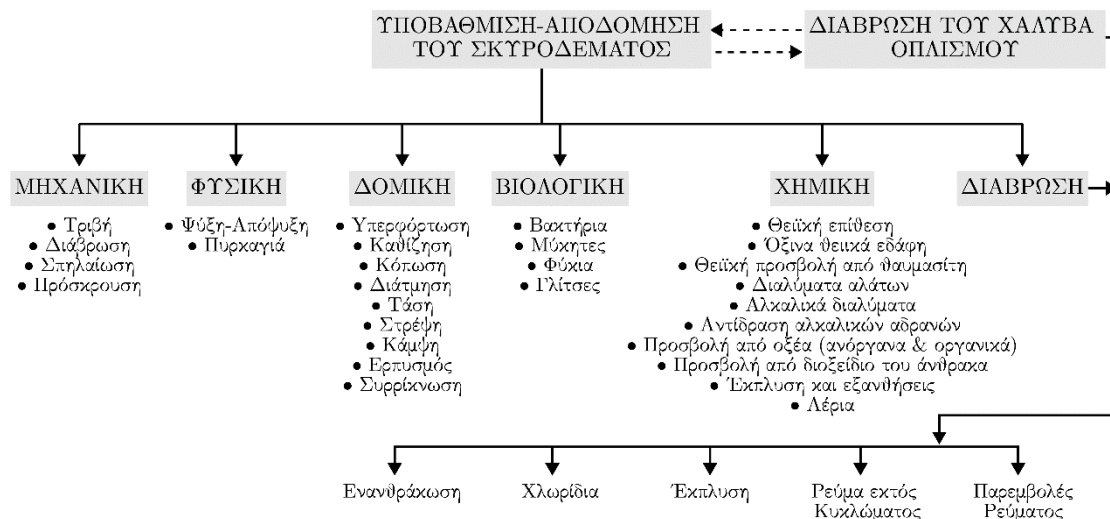
Η επιτελεστικότητα των λιμενικών υποδομών είναι βασικό μέλημα για τη διατήρηση της σταθερότητας των λιμενικών υπηρεσιών, με τους Rosquoët et al. (2006) να αναφέρουν πως η πλειονότητα των λιμένων (60%) κατασκευάστηκαν πριν από το 1955 και πολλές σημαντικές ζημιές είχαν ήδη παρατηρηθεί από τους επιθεωρητές. Η Αμερικάνικη Εταιρεία Πολιτικών Μηχανικών (American Society of Civil Engineers – ASCE) ASCE σε μια οικονομική έρευνα της (Group, 2016) κοστολογεί πως έως και το 2025 η υποβάθμιση των υποδομών και οι διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης θα επιφέρουν σοβαρές οικονομικές συνέπειες στην Αμερική, ύψους περίπου τριών (3) τρισεκατομμυρίων δολαρίων. Αν και στην έρευνα αυτή παραμένει άγνωστο το ποσό που απαιτείται για τις λιμενικές εγκαταστάσεις και υποδομές, μπορεί να αντιληφθεί κανείς βάσει της έρευνας του 2021 (ASCE, 2021) (αναφορά σε επενδύσεις ύψους 163 δισεκατομμυρίων δολαρίων) πως τα ποσά που απαιτούνται για την αναβάθμιση και την επιδιόρθωση είναι υπέρογκα.



Σχήμα 2 - Άμεσες και Έμμεσες επιπτώσεις από την Υποβάθμιση των Υποδομών Πηγή: (Collins & Blin, 2018)

Η υποβάθμιση των λιμενικών υποδομών οφείλεται κατά κόρον στις φθορές και τη διάβρωση των υλικών, των εξαρτημάτων, της καθίζησης των θεμελίων κ.λπ. και γι' αυτό τα τελευταία χρόνια υπάρχει ανάγκη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της, αφού καλύπτει μια ευρεία κλίμακα αρνητικών συνεπειών που πολλές φορές δεν είναι ορατές από το ανθρώπινο μάτι. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, τα αποτελέσματα της υποβάθμισης των υποδομών μπορούν να επηρεάσουν ένα ευρύ φάσμα τομέων, έχοντας και συνεπακόλουθες οικονομικές/περιβαλλοντικές/κοινωνικές επιπτώσεις.

Στις περισσότερες λιμενικές υποδομές, το χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό είναι το σκυρόδεμα, γεγονός που αποδίδεται στο ότι τη δεδομένη στιγμή δεν υπάρχει άλλο διαθέσιμο και βιώσιμο δομικό υλικό (Scrivener, 2014) που να μπορεί να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά στις δυσμενείς συνθήκες που επικρατούν σ' ένα θαλάσσιο περιβάλλον (Alexander, 2016). Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από σκυρόδεμα και χαλύβδινες ράβδους οπλισμού (οπλισμός) ή συγκολλημένο συρματόπλεγμα, τα οποία και αποτελούν τον ενισχυτικό πυρήνα του. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι συνήθεις μηχανισμοί φθοράς του οπλισμένου σκυροδέματος.



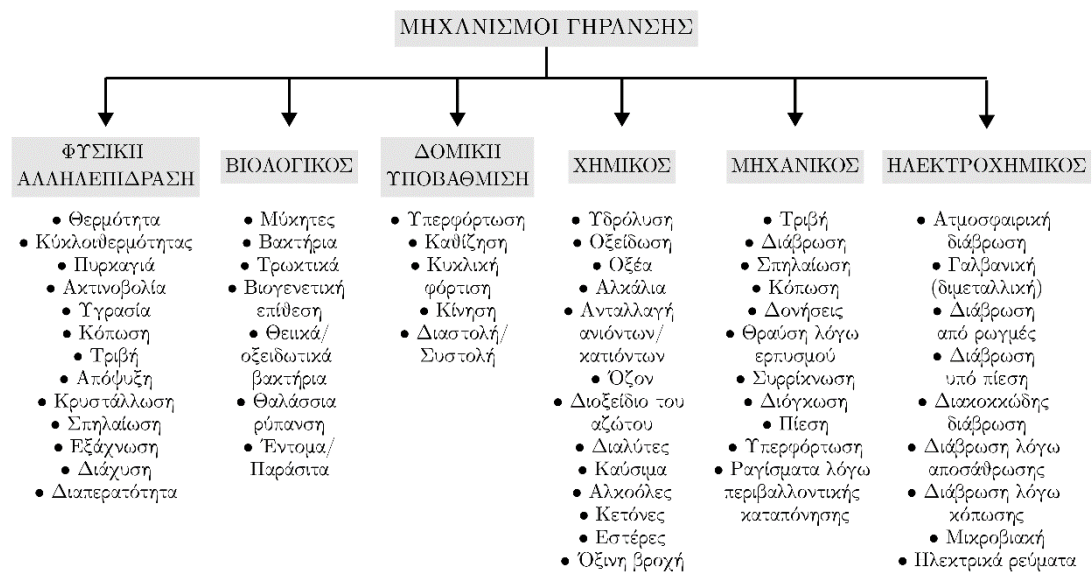
Σχήμα 3 - Σύνοψη όλων των μηχανισμών φθοράς και διάβρωσης του σκυροδέματος Πηγή: (Bertolini et al., 2013)

Ο παράγοντας της θέσης είναι παρά πολύ σημαντικός γιατί μέσω αυτού αναγνωρίζονται οι κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής, οι οποίες αποτελούν μια από τις καθοριστικές αιτίες υποβάθμισης. Οι κλιματολογικές συνθήκες περιλαμβάνουν κάθε μετεωρολογικό φαινόμενο, όπως αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, τη μελέτη των ανέμων, τη βροχή και τις χιονοπτώσεις κ.λπ. και σύμφωνα με τον Rodrigue (2020) η επίδραση τους ανάλογα το φαινόμενο μπορεί να είναι από αμελητέα έως πολύ σοβαρή όχι μόνο για την εξεταζόμενη υποδομή αλλά για ολόκληρο το μεταφορικό κλάδο

και την αλυσίδα εφοδιασμού. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν και έναν παράγοντα πρόκλησης φαινομένων γήρανσης σε μικρότερο χρονικό διάστημα από την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής.

Η γήρανση (ageing) σχετίζεται με τον παράγοντα «χρόνος» και άρα την «ηλικία» της κατασκευής και αποτελεί μια αρκετά σημαντική και δύσκολα προσεγγίσιμη περίπτωση φαινομένου, διότι μπορεί να είναι ανεπαίσθητη και να μην αναγνωριστεί εύκολα. Ο ρυθμός της γήρανσης επηρεάζεται από τον τύπο του δομικού υλικού, την περιβαλλοντική έκθεση και τις φορτίσεις που δέχεται ενώ υπάρχουν παραδείγματα όπου η ταχεία και απρόβλεπτη γήρανση υποδομών οδήγησε σε δομικές αστοχίες με συνέπεια την απώλεια ανθρώπινων ζώων, τραυματισμούς, περιβαλλοντικό αντίκτυπο και μεγάλες ανακατασκευές (Collins & Blin, 2018).

Στο Σχήμα 4, συνοψίζονται οι μηχανισμοί γήρανσης, όπως προκύπτουν από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας που οδηγούν στην προοδευτική λειτουργική αστοχία, έως ότου τελικά καταστεί μια υποδομή ότι αποτυγχάνει να ανταποκριθεί στις κοινωνικοοικονομικές και χρηματοοικονομικές προσδοκίες (Collins & Blin, 2018).



Σχήμα 4 - Μηχανισμοί γήρανσης Πηγή: (Collins & Blin, 2018)

Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος υποβάθμισης των λιμενικών υποδομών που αναφέρεται και ως αιτία στους μηχανισμούς γήρανσης είναι η υπερφόρτωση (Cherry & Green, 2021; Del Grosso, 2001). Κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου, πραγματοποιείται μελέτη σχετικά με τις κανονικές φορτίσεις, που αναμένονται να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ζωής της υποδομής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Delatte, 2009). Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις οι οποίες και επιφέρουν στην υποδομή ακραίες φορτίσεις



που ξεπερνούν αυτές του σχεδιασμού με αποτέλεσμα να προκύπτουν σοβαρά προβλήματα, ειδικά όταν αυτές από τυχαίες γίνουν επαναλαμβανόμενες ή ακόμα και μόνιμες.

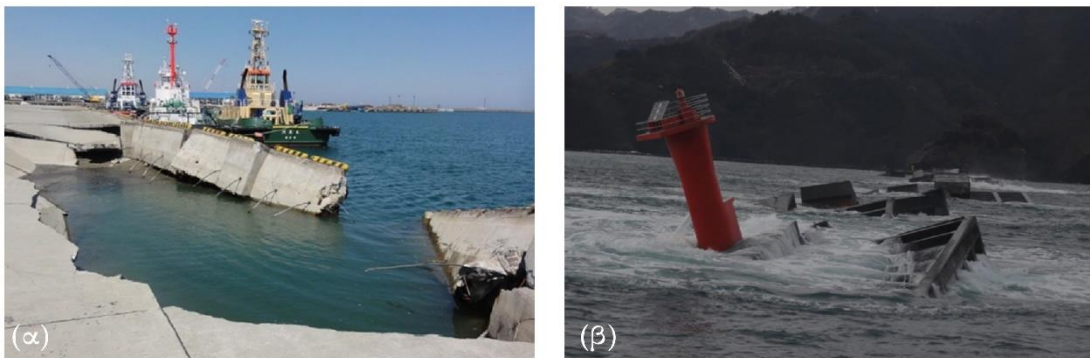
Στιγμιαίες τάσεις (δυναμικά φορτία) που προκύπτουν λόγω κίνησης ενός βαρέως αντικειμένου (π.χ. οχήματος), και επαναλαμβανόμενες τάσεις (στατικά φορτία) που σχετίζονται με την αύξηση του όγκου του φορτίου π.χ. για εμπορευματοκιβώτια (containers) και τη μόνιμη τοποθέτηση βαρύτερου αναγκαίου εξοπλισμού π.χ. γερανογέφυρες καταπονούν τις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα. Το πρόσθετο βάρος μπορεί να προκαλέσει υπερβολική καταπόνηση και παραμόρφωση στην υποδομή, οδηγώντας στην ανάπτυξη ρωγμών, οι οποίες με τη σειρά τους επιτρέπουν στο νερό και άλλους διαβρωτικούς παράγοντες να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα, οδηγώντας σε διάβρωση του χάλυβα οπλισμού. Συνεπώς στις οριακές αυτές καταστάσεις, προκαλείται απώλεια μιας ή και παραπάνω ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος (Thoresen, 2010).

Ακόμη μια αιτία υποβάθμισης των λιμενικών υποδομών είναι οι φυσικές καταστροφές. Στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών εντάσσονται οι καταιγίδες και οι χιονοθύελλες, οι πλημμύρες, οι κυκλώνες (τυφώνες) (π.χ. Τυφώνας Κατρίνα με καταστροφές στο λιμάνι του Gulfport και σ' αυτά των Pascagoula και Bienville (Joint Legislative Committee on Performance Evaluation and Expenditure Review (PEER), 2006; Simpson et al., 2010), οι ανεμοστρόβιλοι και οι ξηρασίες, οι διάφορες μορφές γεωφυσικών καταστροφών που είναι δύσκολο να προβλεφθούν όπως οι σεισμοί και το τσουνάμι κ.α. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στις κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων των κρηπιδωμάτων, των κυματοθραυστών και των προβλητών, δεδομένου ότι η δύναμη των κυμάτων και των ρευμάτων μπορεί να διαβρώσει την περιβάλλουσα ακτογραμμή και τον πυθμένα της θάλασσας, οδηγώντας σε αστάθεια και καθίζηση της υποδομής.

Οι σεισμοί επίσης έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις υποδομές των λιμένων, ιδίως σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε σεισμική δραστηριότητα, προκαλώντας κίνηση του εδάφους και ρευστοποίηση (liquefaction) και άρα καθίζηση και απώλεια της δομικής ακεραιότητας (Soga, 1998; Werner et al., 2011) (Εικόνα 1). Επιπλέον, πολλές φορές ως επακόλουθο ενός σεισμού, όπως το 2011 στο Tōhoku της Ιαπωνίας, έρχονται τα τσουνάμι (Εικόνα 2).



Εικόνα 1 – Τμήματα λιμένα που υπέστησαν ζημιές μετά από σεισμό (α) στο Port-au-Prince Πηγή: (Berkeley Seismology Lab, 2010), (β) στο Kobe Πηγή: (UCDAVIS Civil and Environmental Engineering)



Εικόνα 2 – Τμήματα λιμένα που υπέστησαν ζημιές μετά από τσουνάμι στην Ιαπωνία (α) στην Soma Πηγή: (Sugano et al., 2014), (β) στην Kamaishi Πηγή: (Sugano et al., 2014)

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα δυναμικό φαινόμενο, που αφήνει πολλαπλά ερωτηματικά για την επιτάχυνση των διαδικασιών φθοράς αλλά και ερωτηματικά για το εάν τελικά υποδομές, όπου ο σχεδιασμός τους δεν έχει λάβει υπόψη την επίδραση των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών, είναι πιθανότερο να υποστούν περισσότερες ζημιές και να επιβαρυνθούν με επιπλέον κόστος συντήρησης (Wang et al., 2010). Μερικοί μόνο από τους παράγοντες της κλιματικής αλλαγής που οδηγούν σε αυξημένη ευπάθεια, είναι η αύξηση της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, οι μεταβολές στην υγρασία, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, οι παράκτιες πλημμύρες κ.λπ.

Ταυτόχρονα, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μπορούν να επιδεινώσουν τα υφιστάμενα τρωτά σημεία των λιμενικών υποδομών, όπως αυτά που προκαλούνται από την ανεπαρκή συντήρηση, τη γήρανση των υποδομών και αρκετές φορές τον ανεπαρκή σχεδιασμό.

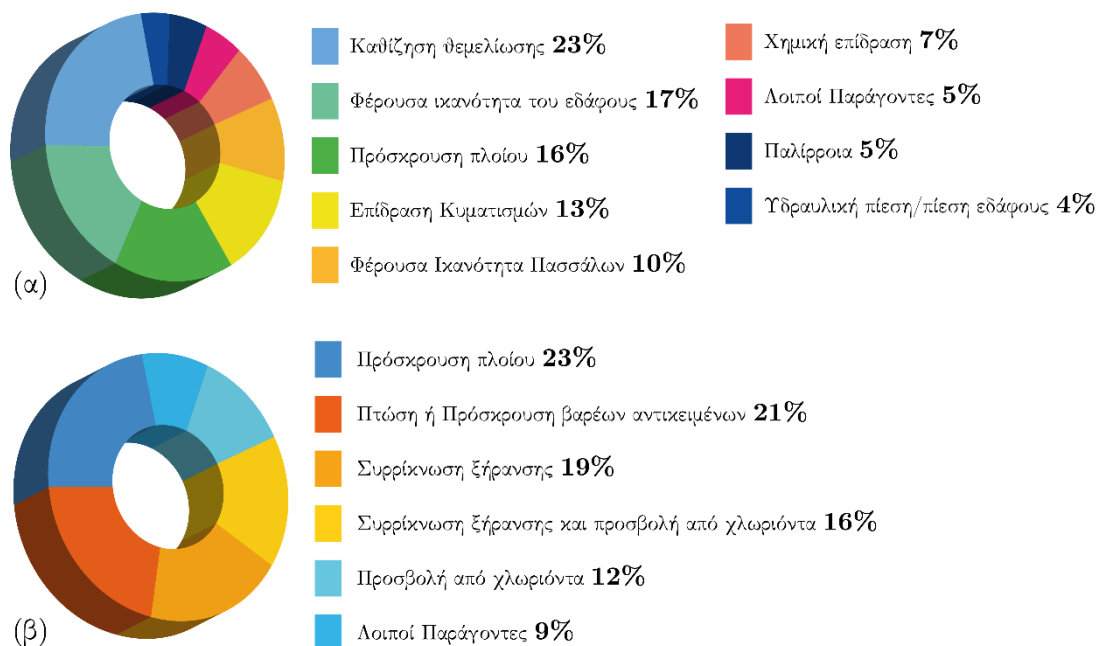
Σημαντικές αιτίες υποβάθμισης είναι επίσης οι τρομοκρατικές επιθέσεις (π.χ. βομβιστική επίθεση) και τα ατυχήματα (Del Grosso, 2001):

- Πρόσκρουση μεταξύ πλοίων και λιμενικών υποδομών

- Κακή χρήση του εξοπλισμού με αποτέλεσμα τη σύγκρουση με σταθερές υποδομές, την πτώση φορτίου ή πολύ συχνά την υπερφόρτωση, όπως επίσης και πιθανά ανθρώπινα λάθη
- Ανθρώπινο λάθος και πυρκαγιές

Η έλλειψη συντήρησης εμποδίζει την απρόσκοπτη λειτουργία των υποδομών και τη διατήρηση της ακεραιότητας τους στο πέρασμα των χρόνων. Χωρίς κατάλληλη συντήρηση, τα στοιχεία της υποδομής, από το πλέον απλό έως το πιο πολυσύνθετο, μπορούν να φθαρούν και να γίνουν τρωτά. Κομβική αιτία για την ανεπαρκή τακτική επιθεώρηση, συντήρηση και συνεπώς επισκευή είναι ο περιορισμός χρηματοδότησης, οπότε και η συντήρηση συχνά αναβάλλεται, οδηγώντας στη συσσώρευση φθοράς.

Συνοπτικά, σύμφωνα με την έρευνα των Cha et al. (2015), με στοιχεία βασισμένα σε εμπειριστατωμένη έρευνα και ανάλυση από εμπειρογνώμονες και από εκθέσεις ασφαλείας (Kim et al., 2012) αποκλειστικά για την περίπτωση των λιμανιών, οι περισσότεροι καταγεγραμμένοι παράγοντες υποβάθμισης τα τελευταία χρόνια είναι όσοι παρατίθενται στο Σχήμα 5.



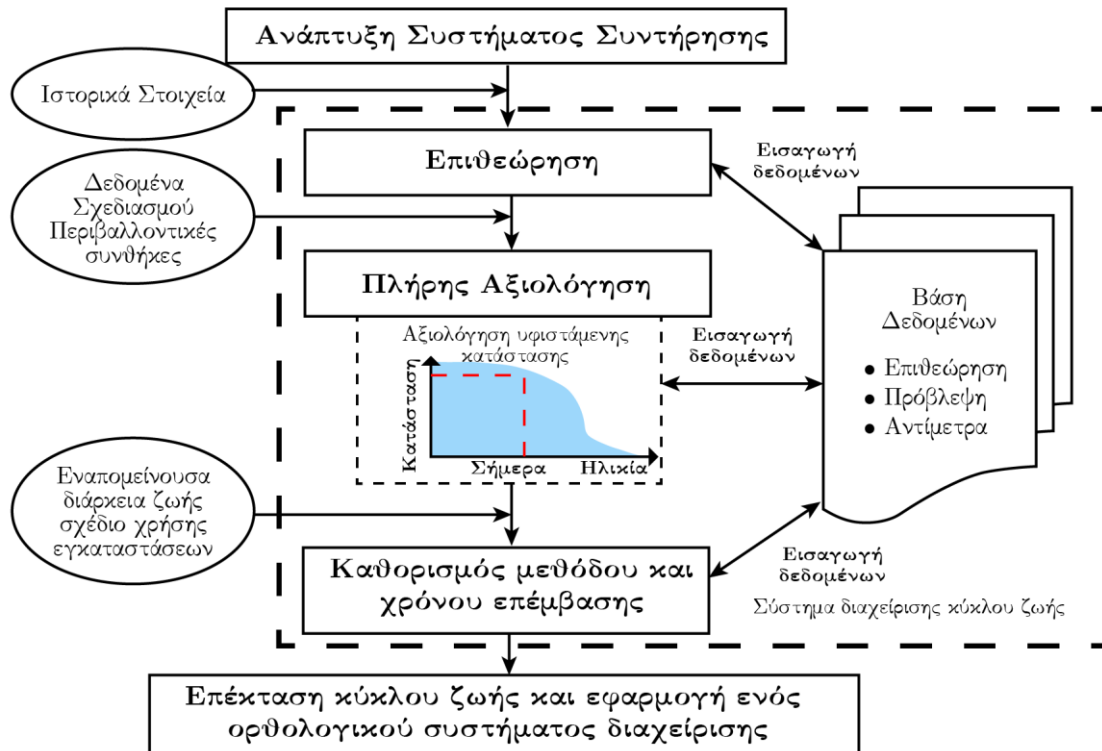
Σχήμα 5 - Παράγοντες φθοράς λιμενικών υποδομών σύμφωνα (α) με τη γνώμη των εμπειρογνομόνων και (β) με εκθέσεις ασφαλείας Πηγή: (Cha et al., 2015)

### 2.2.2 Σημαντικότητα Παρακολούθησης Λιμενικών Υποδομών

Οι υποδομές από σκυρόδεμα που βρίσκονται κοντά στο «εχθρικό περιβάλλον» της θάλασσας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στα φαινόμενα υποβάθμισης, και ειδικότερα από τη στιγμή που δεν μπορούν να προβλεφθούν ορισμένα από αυτά, τα πλεονεκτήματα της συνεχούς παρακολούθησης είναι πολλαπλά. Η παρακολούθηση της κατάστασης του σκυροδέματος μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό σημείων φθοράς σε πρώιμο στάδιο, επιτρέποντας την έγκαιρη συντήρηση και επισκευή και αποτρέποντας σε μεγάλο βαθμό φαινόμενα αστοχίας.

Φυσικά, η περίπτωση των λιμενικών εγκαταστάσεων είναι πολυσύνθετη και ξεχωριστή καθώς πρέπει να συνδυάζει παρακολούθηση όλων των υποδομών σε ξηρά και θάλασσα. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό αφού, έχοντας μια ολική εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης μπορούν ευκολότερα να αξιολογηθούν οι φθορές, να εκτιμηθεί ο κίνδυνος, να καταστρωθεί ένα πρόγραμμα αποκατάστασης και να προϋπολογιστούν έργα συντήρησης (Gaythwaite, 2016). Οι παραπάνω ενέργειες μπορούν να ενταχθούν σε ένα Πρόγραμμα Παρακολούθησης των υποδομών, το οποίο και αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου συστήματος διαχείρισης των λιμένων και των συναφών λιμενικών υποδομών.

Ένα τέτοιο πρόγραμμα, λοιπόν, περιλαμβάνει διάφορους τύπους επιθεωρήσεων (π.χ. ρουτίνας, σχεδιασμού δομικών επισκευών ή αναβάθμισης, ειδικού σκοπού κ.λπ.) (Heffron, 2015) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με τη δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων σε βάσεις δεδομένων και διάθεσής τους προς σύγκριση σε μεταγενέστερες επιθεωρήσεις. Σε πρώτη φάση τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποδοθεί ένας βαθμός αξιολόγησης, να γίνει κατάταξη της υποδομής σε κάποια κατηγορία/κλίμακα και στη συνέχεια να ελεγχθεί για παράδειγμα ο ρυθμός κάποιου φαινομένου διάβρωσης ή ακόμα και να αξιολογηθεί η δράση ενός μέτρου αποκατάστασης φθοράς (Σχήμα 6).



Σχήμα 6 - Ροή διαδικασιών ενός συστήματος διαχείρισης του κύκλου ζωής των λιμενικών υποδομών Πηγή: (Port Technology Group, 2009)

Σχετικά με την περιοδικότητα των επιθεωρήσεων, ισχύει πως επειδή κάθε λιμάνι είναι μοναδικό όσον αφορά στην ηλικία, στη χρήση, στα υλικά, στο περιβάλλον και στην κατάσταση των υποδομών του, δεν υπάρχει κάποια απολύτως ορθή πολιτική για τη διενέργειά τους. Το χρονικό περιθώριο μπορεί να ποικίλει ανάλογα τον τύπο και τον τρόπο επιθεώρησης, τις ειδικές ανάγκες του λιμανιού, το κανονιστικό πλαίσιο ή ακόμα και τα πρότυπα ασφαλείας, με το χρονικό περιθώριο να κυμαίνεται από έξι (6) μήνες έως και έξι (6) χρόνια για τις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα (Heffron, 2015). Είναι πολύ σημαντικό επίσης ότι οι επιθεωρήσεις μπορεί να συμπίπτουν σκόπιμα χρονικά με κάποιες τακτικές συντηρήσεις, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο μη λειτουργικός χρόνος του λιμένα και να διασφαλιστεί ότι η επιθεώρηση πραγματοποιείται διεξοδικά.

### 2.2.3 Παρακολούθηση Δομικής Υγείας Λιμενικών Υποδομών

Οι υφιστάμενες μέθοδοι/τεχνικές παρακολούθησης των λιμενικών εγκαταστάσεων δίνουν τη δυνατότητα καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης της λιμενικής υποδομής, έχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα κάθε προσιτής ή απρόσιτης θέσης. Η παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνικές επισκόπησης.

Η οπτική επισκόπηση αποτελεί την αρχαιότερη μέθοδο επιθεώρησης μιας υποδομής για τον εντοπισμό φθορών (Dorafshan et al., 2016) και ταυτόχρονα την πιο απλή, οικονομική και κυρίαρχη (Vaghefi et al., 2012) ώστε να καθοριστεί η βέλτιστη στρατηγική συντήρησης που θα ελαχιστοποιεί το κόστος των επεμβάσεων στην υποδομή με την πάροδο του χρόνου (Bertola & Brühwiler, 2021; Mirzaei & Adey, 2015). Η οπτική επισκόπηση αποτελείται από τις τακτικές επιθεωρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται συνήθως από εξειδικευμένους εργαζόμενους/μηχανικούς, γεγονός που καταδεικνύει και τα θέματα ασφαλείας που προκύπτουν λόγω της σχετικής έκθεσης τους σε μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας (Jiao et al., 2023). Στις τεχνικές της οπτικής επιθεώρησης μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν και όλες οι υποθαλάσσιες τεχνικές σύμφωνα με τους Wang et al. (2018), σαν την υποβρύχια φωτογράφιση και τις μετρήσεις κ.λπ. και πλέον προστίθεται και η βιντεοσκόπηση (Alexander, 2016).

Ο στόχος της οπτικής επιθεώρησης είναι συνήθως η προκαταρκτική εκτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης της υποδομής, ώστε να εντοπιστούν φαινόμενα υποβάθμισης σε πρώιμη μορφή, ενώ δευτερευόντως ανάλογα την κατάσταση που βρίσκεται η υποδομή μπορούν να προκύψουν αποτελέσματα σχετικά με την εξέλιξη των φαινομένων αυτών (π.χ. διάβρωση). Αυτό δηλαδή επιτρέπει σε πρώτη φάση την αξιολόγηση μιας κατάστασης και σε δεύτερη, τον προσδιορισμό ορισμένων θέσεων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως θέσεις δειγματοληψίας (Shekarchi et al., 2011) σε περίπτωση που απαιτείται κάποια πιο λεπτομερής έρευνα.

Ωστόσο, όπως χαρακτηριστικά τονίζουν στις έρευνες τους οι Agdas et al. (2016), Frangopol and Liu (2019), Jofré-Briceño et al. (2021) και Chelioti et al. (2023), η οπτική επισκόπηση είναι μια μέθοδος που όταν βασίζεται αποκλειστικά στην ανθρώπινη παρατήρηση, τα αποτελέσματά μπορούν να εμπεριέχουν και σφάλματα, αφού υπόκεινται καθαρά στη γνώμη και την εμπειρία του παρατηρητή, δηλαδή ο βαθμός υποκειμενικότητας είναι υψηλός.

Στη σύγχρονη εποχή, νέες τεχνολογίες όπως τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) και τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα (Remotely Operated Vehicles – ROVs) τα οποία μπορούν να εξοπλιστούν με επιπλέον κάμερες υψηλής ευκρίνειας, με διάφορα τεχνολογικά μέσα όπως αισθητήρες, θερμικές κάμερες, συστήματα σόναρ (sonar) κ.λπ. και να έχουν υποστήριξη GPS (Global Positioning System) δηλαδή άμεση θεοσιθεσία με πομποδέκτες (Hallermann & Morgenthal, 2013; Hallermann et al., 2015; Mai et al., 2016), παρέχουν τη δυνατότητα υποστήριξης της οπτικής επισκόπησης.

Ωστόσο, οι περισσότερες σύγχρονες τεχνολογίες με τις οποίες εξοπλίζονται τα

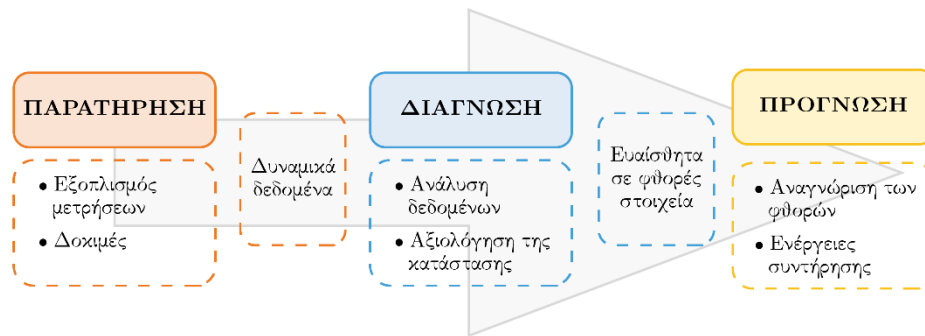
συστήματα αυτά, συγκαταλέγονται σε κατηγορίες ενεργητικών ή παθητικών οργάνων, πέραν του βασικού εξοπλισμού τους, καθώς τα δεδομένα που μπορούν να αντληθούν δεν καλύπτουν μόνο το φάσμα της απλής οπτικής επιθεώρησης, με αποτέλεσμα η χρήση τέτοιων μεθόδων στην πλειοψηφία τους να υπάγεται σε πιο προηγμένες μορφές επιθεώρησης που απαντώνται ως τηλεπισκόπηση/ τηλεανίχνευση (Remote Sensing - RS) και θα αναλυθούν παρακάτω.

Προκειμένου να εξαλειφθούν οι διάφοροι περιορισμοί της οπτικής επισκόπησης και να εφαρμοστεί μια ολική προσέγγιση στην παρακολούθηση της υποδομής με συνεχή αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας, η πρακτική της παρακολούθησης της δομικής κατάστασης/υγείας (Structural Health Monitoring – SHM) έχει κερδίσει σημαντικό χώρο στη διαχείριση των υποδομών (Dhakal et al., 2013; Morgenthal & Hallermann, 2014). Ως SHM δηλαδή ορίζεται μια διαδικασία συνεχούς εκτίμησης της «υγείας» της υποδομής μέσω ενός αυτοματοποιημένου συστήματος παρακολούθησης αποτελώντας έτσι βασικό άξονα για οικονομικά αποδοτικές στρατηγικές συντήρησης (Chen, 2018) και βρίσκοντας πολύτιμη εφαρμογή σε όλες τις υποδομές, από τις πιο πρόσφατα κατασκευασμένες έως τις πιο γηρασμένες (Liu & Nayak, 2012).

Ένα υλοποιημένο πρόγραμμα παρακολούθησης με μέθοδο SHM σε ένα λιμένα χρησιμοποιεί περιοδικές δειγματοληπτικές μετρήσεις από το σύστημα ανίχνευσης για την απόκριση κάθε εξεταζόμενου στοιχείου στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (καταγραφή μέσω αισθητήρων), με το τελικό αποτέλεσμα να είναι ενδείξεις σχετικά με τη συμπεριφορά της κατασκευής, την ωφέλιμη ζωή της και τις πιθανές φθορές της εντός της ζώνης ανίχνευσης (Σχήμα 7) (Chen, 2018; Farrar et al., 2003). Ο αντικειμενικός σκοπός της SHM πάντοτε, σύμφωνα με τον Chen (2018), είναι η κατηγοριοποίηση στα ακόλουθα πέντε (5) επίπεδα, αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμο τεχνολογικό μέσο και κάθε διαθέσιμο εργαλείο (μαθηματικό μοντέλο) πρόγνωσης:

- Επίπεδο 1: Ανίχνευση φθορών, δίνοντας μια ποιοτική ένδειξη/πιθανότητα ύπαρξης φθορών
- Επίπεδο 2: Πλήρης εντοπισμός της φθοράς, παρέχοντας πληροφορίες για την ακριβή θέση στο λιμάνι
- Επίπεδο 3: Ταξινόμηση της φθοράς ανάλογα με τον τύπο και τη σοβαρότητα της
- Επίπεδο 4: Εκτίμηση της ακριβούς έκτασης της φθοράς και της συνολικής υποβάθμισης του συστήματος

- Επίπεδο 5: Πρόγνωση της φθοράς, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια της κατασκευής, π.χ. εκτίμηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής



Σχήμα 7 - Αλληλουχία ενεργειών σε ένα πρόγραμμα SHM Πηγή: (Sierra et al., 2022)

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω απαιτείται το πρόγραμμα SHM να διαθέτει τρία βασικά στοιχεία σύμφωνα με την πρόσφατη έρευνα των Pezeshki et al. (2023) και την έρευνα των Agdas et al. (2016): α) το σχεδιασμό της συνολικής προσέγγισης του συστήματος παρακολούθησης, από το στάδιο της απόκτησης δεδομένων έως τη διαχείριση, β) την εκτέλεση του σχεδίου, από τη διαμόρφωση των οργάνων και των μέσων παρακολούθησης έως και τη δημιουργία μοντέλου και γ) την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων έως και την εξαγωγή συμπερασμάτων, την ερμηνεία και την οπτικοποίηση τους.

Ένα πρόγραμμα για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης/υγείας απαιτεί τόσο υλισμικό (hardware) όσο και λογισμικό (software). Η επιλογή, ωστόσο, του καταλληλότερου, κάθε φορά βάσει συνθηκών, συνδυασμού αυτών των συστατικών τμημάτων του προγράμματος SHM είναι περίπλοκη και απαιτεί σύμφωνα με τους Alonso et al. (2018) αρκετά εμπειριστάωμένη έρευνα. Βιβλιογραφικά έχει επικρατήσει τα περισσότερα εργαλεία υλισμικού να αποκαλούνται τεχνολογία αισθητήρων (sensors technology) ή απλώς αισθητήρες (sensors), όπου ως ορισμό στην έρευνα τους οι Ferreira et al. (2022) αποδίδουν τις τεχνολογικές αυτές συσκευές που επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των φυσικών, χημικών ή βιολογικών ιδιοτήτων των υλικών, μετατρέποντάς τες σε σήματα που μετρώνται από τον κατάλληλο εξοπλισμό.

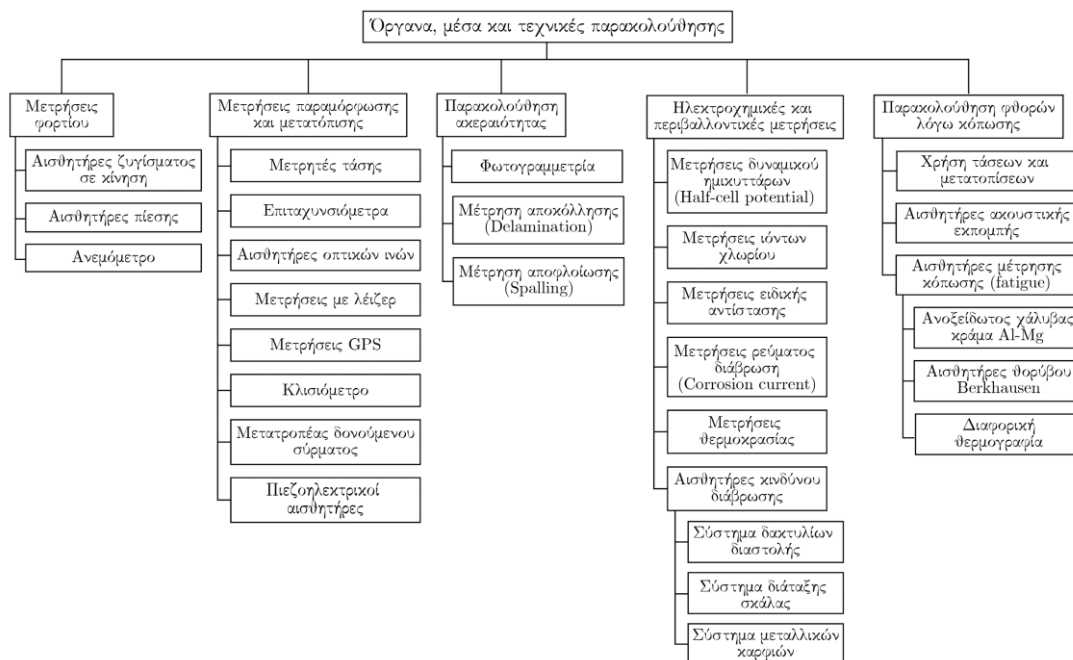
Οι πληροφορίες που παρέχονται από τους αισθητήρες επεξεργάζονται υπό διαφορετικές προσεγγίσεις (συνδυασμός συστατικών μερών) με σκοπό τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας των καταγραφών (Silva-Campillo et al., 2023). Το τμήμα της μετάδοσης των δεδομένων είναι πολύ σημαντική διεργασία καθώς καταδεικνύει την εισχώρηση των συστημάτων τηλεπικοινωνιών και του διαδικτύου στον τομέα της παρακολούθησης και την νέα επανάσταση για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με τις αρχές της ανάλυσης πολλαπλών δεδομένων (big data analytics).



Αναδυόμενες τέτοιες προσεγγίσεις που επιτρέπουν την ολική ή μερική αυτοματοποίηση και την απομακρυσμένη ή μη επιθεώρηση, βιβλιογραφικά αναζητούνται ως τεχνολογίες του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) συμπεριλαμβάνοντας κάθε πιθανό τρόπο για διευκόλυνση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλαπλών αισθητήρων σε ένα ενιαίο σύστημα παρακολούθησης.

Επομένως, χρόνο με τον χρόνο βάσει και της εξέλιξης της τεχνολογίας τα συστήματα SHM έχουν περάσει από τη χρήση παλιών παραδοσιακών αισθητήρων σε σύγχρονους μετρομερές δυνατότητες καταγραφής και απόκρισης. Ενδεικτικά ορισμένα παραδείγματα μελετών που κάνουν χρήση ασύρματων ή και ενσύρματων με χρήση δικτύου αισθητήρων είναι: τα κυψελοειδή δίκτυα 4G (Guirado et al., 2021) και 5G (Mishra & Natalizio, 2020), το Wi-Fi (Heo et al., 2018; Muhendra et al., 2017), το Bluetooth (Friesen & McLeod, 2015; Mehta & El Zarki, 2004) και οι οπτικές ίνες (Glisic & Inaudi, 2007; Jayawickrema et al., 2022).

Βιβλιογραφικά έχουν αναφερθεί και χρησιμοποιούνται, αναρίθμητες τεχνολογίες οργάνων καταγραφής στο πλαίσιο του SHM για την απόκτηση δεδομένων, με κάποιες από αυτές να απαριθμούνται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8 - Συνήθη όργανα και τεχνικές παρακολούθησης της μεθόδου SHM Πηγή: (Frangopol & Messervey, 2009)

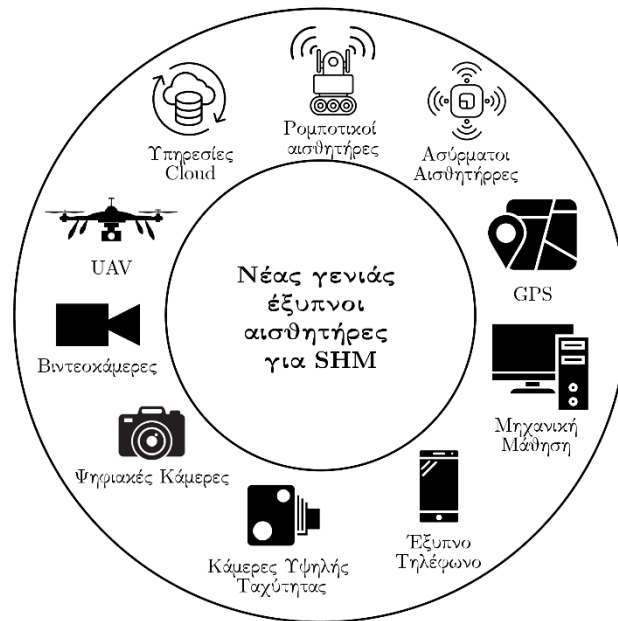
Στην έρευνα των Silva-Campillo et al. (2023) γίνεται μια εκτενής παρουσίαση των οργάνων και των τεχνικών που αναφέρθηκαν στο Σχήμα 8 από όπου και μπορούν να αντληθούν περαιτέρω πληροφορίες για τον τρόπο που χρησιμοποιούνται όλα τα είδη των

αισθητήρων. Οι αισθητήρες και γενικότερα τα μέσα καταγραφής που αναφέρονται και ανήκουν σε ένα σύστημα SHM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν (Scott et al., 2003) βάσει της αρχής λειτουργίας τους (Gastineau et al., 2009), σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Αισθητήρες επαφής (contact): λειτουργούν πάντοτε με άμεση επαφή με την επιφάνεια ενός αντικειμένου (AlHamaydeh & Ghazal Aswad, 2022) για τη μέτρηση φυσικών μεγεθών όπως η τάση, η μετατόπιση, η θερμοκρασία, η υγρασία, οι δονήσεις ή οι κραδασμοί, η παρουσία χλωρίου κ.λπ. (Hassani & Dackermann, 2023) ή δυναμικών αποκρίσεων όπως η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετατόπιση ή η κλίση (Sony et al., 2019). Οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών και στην ηλεκτρονική οδήγησαν στην ανάπτυξη πιο προηγμένων αισθητήρων επαφής, που είναι μικρότεροι, ακριβέστεροι και ικανοί να μετρούν ένα ευρύτερο φάσμα φυσικών μεγεθών. Σύμφωνα με τους Sony et al. (2019) η κατηγορία αυτή αισθητήρων δημιουργεί σημαντικές οικονομικές και πρακτικές προκλήσεις με σημαντικότερα μειονεκτήματα τις χρονοβόρες και ενεργοβόρες διαδικασίες εγκατάστασης και τακτικής συντήρησης προκειμένου να επιτευχθεί μακροπρόθεσμη παρακολούθηση. Επιπλέον, παρέχουν αραιές και διακριτές σημειακές μετρήσεις και χαμηλές χωρικές αναλύσεις ανίχνευσης, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος SHM σε μια μεγάλης κλίμακας υποδομή (Sony et al., 2019). Σε μια προσπάθεια ανασκόπησης όλων των αισθητήρων επαφής, οι AlHamaydeh and Ghazal Aswad (2022) αναφέρουν στη λίστα: παραδοσιακούς σταθερούς αισθητήρες (TFS ή TCS), ενεργούς αισθητήρες πιεζοηλεκτρικών πλακών (PWASs), επιταχυνσιόμετρα, δέκτες GPS, αισθητήρες μετατόπισης (Διαφορικός μετασχηματιστής γραμμικού μεταβλητού – LVDT και μετρητές τάσης - strain gauges), ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN), κινητούς αισθητήρες, ρομποτικά συστήματα και οπτικούς αισθητήρες (Ανάλυση οπτικού χρονικού πεδίου Brillouin – BOTDA και Αισθητήρες πλέγματος οπτικών ινών Bragg – FBG).
- 2) Ανέπαφοι αισθητήρες (non-contact ή contactless): γνωστοί και ως απομακρυσμένοι (remote) αισθητήρες, λειτουργούν μετρώντας φυσικά μεγέθη μιας δομής χωρίς να έρχονται σε άμεση επαφή με την επιφάνειά της (Sony et al., 2019). Σε γενικές γραμμές, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση τη φύση της συλλογής δεδομένων: α) παθητικούς και β) ενεργητικούς. Όπως επεξηγούν στην ερευνά τους οι Kaartinen et al. (2022) οι παθητικές τεχνικές χρησιμοποιούν οπτική ρύθμιση για τη λήψη εικόνων ή βίντεο των κατεστραμμένων δομών, οι οποίες στη συνέχεια αναλύονται ώστε να προσδιοριστεί το επίπεδο της φθοράς, όπως και η αναγκαία τεχνική

αποκατάστασης που απαιτείται. Κατ' αντιστοιχία, οι ενεργητικές τεχνικές εκπέμπουν διάφορες φασματικές ζώνες και συχνότητες φωτός και ήχου που κατευθύνονται προς το αντικείμενο, με τον αισθητήρα να μετρά είτε τη μετατόπιση Doppler του ηχητικού κύματος που επιστρέφει, είτε του ανακλώμενου φωτός για να εξακριβώσει τη φύση των ανωμαλιών της επιφάνειας (Kaartinen et al., 2022). Η δημοτικότητα που έχουν λάβει τα τελευταία χρόνια οι ανέπαφοι αισθητήρες είναι αξιοσημείωτη, οδηγώντας σε χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs), των δορυφόρων, ακόμη και των έξυπνων τηλεφώνων (smartphones) (Sony et al., 2019). Στην ανασκόπηση των AlHamaydeh and Ghazal Aswad (2022) επισημαίνονται αισθητήρες: λέιζερ Doppler δονησιόμετρο (LDV), επίγειος σαρωτής λέιζερ (TLS), υπέρυθη θερμογραφία (IRT), ραντάρ διείσδυσης εδάφους ή γεωραντάρ (GPR), αισθητήρες βασισμένοι στην όραση υπολογιστών, φωτογραμμετρία κοντινής απόστασης/εμβέλειας, και κάμερες RGB-D (Depth Sensor) με αισθητήρες βάθους.

- 3) Υβριδικό αισθητήρες (hybrid): αποτελούν μια νέα κατηγορία αισθητήρων που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες ανίχνευσης (Liu & Nayak, 2012) για να παρέχουν βελτιωμένες δυνατότητες καταγραφής. Συνδυάζουν συνήθως ασύρματους και ανέπαφους αισθητήρες εξασφαλίζοντας έτσι τη λειτουργική ευκολία (AlHamaydeh & Ghazal Aswad, 2022) ενώ το κύριο πλεονέκτημά τους έγκειται στην ικανότητα συνδυασμού δεδομένων από ετερογενείς πηγές με υψηλή ακρίβεια και υψηλή ευαισθησία, βελτιώνοντας κατά πολύ την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί και προκλήσεις στη χρήση υβριδικών αισθητήρων με τους Glisic et al. (2014) να αναφέρουν τη δυσκολία που έχει η ενσωμάτωση και η ανάλυση δεδομένων από διαφορετικές πηγές, τις διακυμάνσεις στην ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων και την αυξημένη πολυπλοκότητα στην οπτικοποίηση των δεδομένων. Ο Lienhart (2013) επίσης προσθέτει ότι αποτελεί εξίσου μεγάλη πρόκληση, η συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων λόγω της ανεξάρτητης ανάλυσης κάθε τύπου αισθητήρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άρα την αδυναμία διαχωρισμού των τελικών συμπερασμάτων για το εάν φθορές που εντοπίζονται οφείλονται σε μεταβολές λόγω γήρανσης ή στην εξέλιξη προϋπαρχόντων φαινομένων υποβάθμισης/φθοράς.



Σχήμα 9 - Σχηματική αναπαράσταση των νέας γενιάς αισθητήρων Πηγή: (Sony et al., 2019)

Οι αισθητήρες της επόμενης γενιάς (Σχήμα 9) φαίνεται πως μπορούν να φέρουν μια πρωτοπορία στην απόκτηση των δεδομένων για παρακολούθηση των υποδομών. Έξυπνοι (smart) αλλά και ευφυείς (intelligent) αισθητήρες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο που επιτρέπει τη ραγδαία ανάπτυξη δύο πολύ μεγάλων και σύνθετων τεχνικών παρακολούθησης, του Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου (Non Destructive Testing - NDT) και της Τηλεπισκόπησης/Τηλεανίχνευσης (Remote Sensing).

Ως NDT, η Αμερικανική Εταιρεία Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου (American Society for Nondestructive Testing - ASNT), ορίζει τις τεχνικές εκείνες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της φυσικής κατάστασης (ιδιότητες του υλικού ή ένδειξη παρουσίας επιφανειακών, εσωτερικών ή κρυφών ασυνεπειών) ενός αντικειμένου χωρίς να επηρεάζεται η ικανότητα του να εκπληρώνει τη μελλοντική, προβλεπόμενη λειτουργία του (Forsyth et al., 2006). Βιβλιογραφικά οι τεχνικές NDT μπορεί να συναντηθούν και ως Μη-Καταστρεπτική Επιθεώρηση (Non-Destructive Inspection – NDI) (Junyan et al., 2015), Μη-Καταστρεπτική Αξιολόγηση (Non-Destructive Evaluation - NDE) (Hübschen et al., 2016) και Μη-Καταστρεπτική Εξέταση (Non-Destructive Examination - NDE) (Bray & Stanley, 1996), υποδηλώνοντας έτσι ότι δεν πρόκειται απλά για μέθοδο καταγραφών αλλά και συμπερασμάτων.

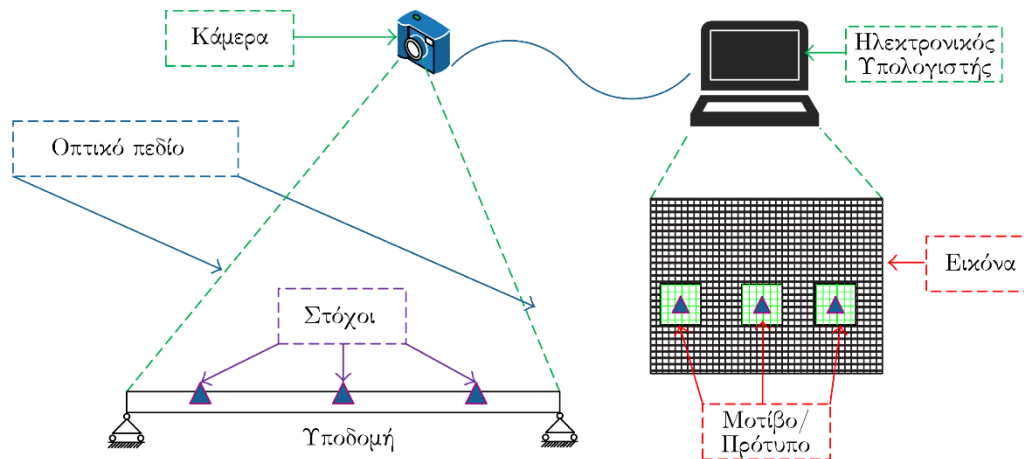
Ένα από τα μειονεκτήματα των κλασικών τεχνικών NDT στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης/υγείας είναι ότι συχνά απαιτούσαν φυσική επαφή με την υποδομή, κάτι που μπορεί να ήταν χρονοβόρο και δαπανηρό (Gupta et al., 2022). Με την εξέλιξη

της τεχνολογίας και την ανάπτυξη τεχνικών που βασίζονται στην όραση (vision-based) και στη λήψη εικόνας ή βίντεο (image-based και video-based) (AlHamaydeh & Ghazal Aswad, 2022), οι σύγχρονες μέθοδοι NDT, παρέχουν μια ευρεία και ολοκληρωμένη εικόνα της υπό παρακολούθηση υποδομής, επιτρέποντας την ανίχνευση πιθανών προβλημάτων σε μεγάλες περιοχές. Όπως επισημαίνουν στην έρευνα τους οι Sony et al. (2019) υπάρχει μια σημαντική εξέλιξη στη ανίχνευση μεταβολών, αντικειμένων, φθορών κ.ο.κ. μέσω της ανάλυσης εικόνας και βίντεο. Γίνεται αντιληπτό πως σε ένα τέτοιο σύστημα ανάλυσης καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν τα καρέ ανά δευτερόλεπτο (frames per second - fps), τα εικονοστοιχεία (pixels), το εύρος ζώνης (bandwidth) και η σταθεροποίηση της εικόνας (image stabilization) (Sony et al., 2019) ούτως ώστε να συλλέγονται δεδομένα υψηλής ακρίβειας από τις λήψεις.

Οι αισθητήρες όρασης επίσης που βρίσκονται στην κάμερα καταγράφουν και προσδιορίζουν διαφόρων ειδών χαρακτηριστικά συμπεριλαμβανομένης της θέσης, του προσανατολισμού και τη σύνθεση της επιφάνειας στην οποία βρίσκεται καθετί που εξετάζεται (Hassani & Dackermann, 2023). Ωστόσο παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην καινοτομία, ορισμένες προκλήσεις διαφαίνονται, παρέχοντας έτσι ευκαιρία για περαιτέρω έρευνα.

Πρώτο και κομβικότερο ζήτημα είναι πως, όπου υπάρχει αναφορά για vision-based τεχνικές παρακολούθησης συνήθως αυτές στο μεγαλύτερο ποσοστό τους αναφέρονται σε όραση υπολογιστών (computer/machine vision) και άρα μηχανική μάθηση (machine learning) ή βαθιά μάθηση (deep learning) με αποτέλεσμα να απαιτούνται σημαντικοί πόροι και γνώση για την ανάπτυξη ειδικών συστημάτων. Παρόλο δηλαδή που η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε για να υπερβεί το όριο του ανθρώπινου ματιού για την αξιολόγηση και την ανίχνευση δομικών φθορών, εντούτοις, οι τεχνικές αυτές μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο ορισμένες μορφές φθορών σε σκυρόδεμα και χάλυβα.

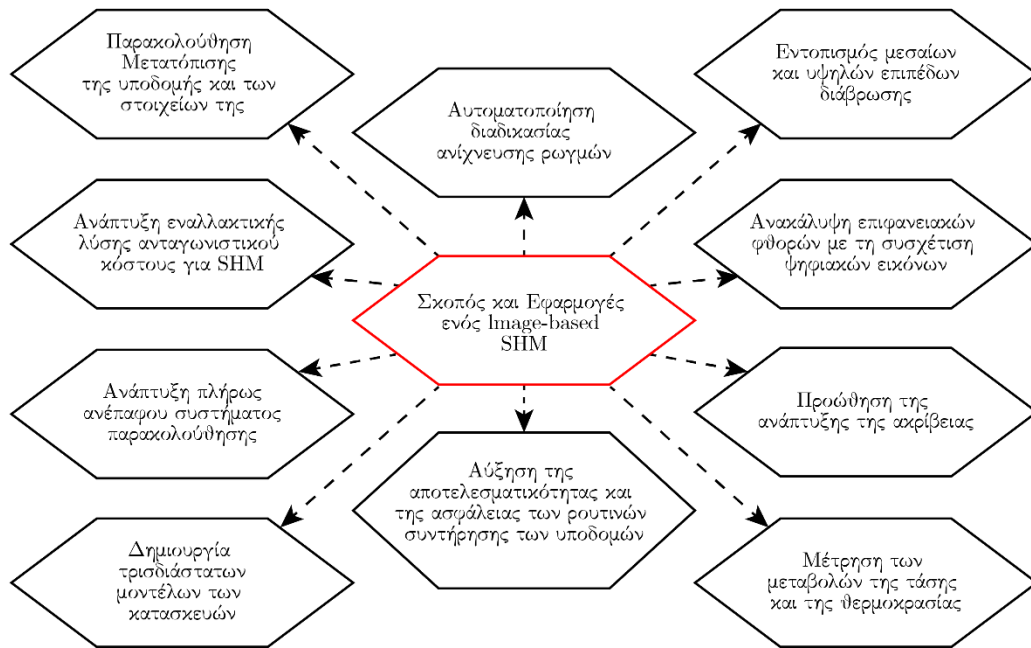
Επιπλέον, βάσει της έρευνας των Tian et al. (2021) η δυσκολία χρήσης καμερών για την όραση υπολογιστών δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, αφού χρειάζεται να εγκατασταθούν σε σταθερό τρίποδο και να μετακινούνται συνεχώς προκειμένου να υπάρξει μια πλήρης καταγραφή της υποδομής. Συμπληρωματικά, δεν είναι λίγες και οι καταγραφές προβλημάτων, σε έρευνες για την παρακολούθηση υποδομών, που σχετίζονται με τις συνθήκες φωτισμού και ακτινοβολίας του φωτός τη στιγμή των μετρήσεων, δυσχεραίνοντας κατά πολύ τις λήψεις και δημιουργώντας ανακρίβειες (Hassani & Dackermann, 2023).



Σχήμα 10 - Δισδιάστατη μέθοδος καταγραφής με βάση την όραση υπολογιστών Πηγή: (Ye et al., 2016)

Πολλές φορές οι δύο όροι (image-based και vision-based) συγχέονται και όχι αδικώς, καθώς συνήθως δρουν συμπληρωματικά, με την image-based να προηγείται. Στην image-based τεχνική τα αποτελέσματα προκύπτουν από εικόνες που έχουν ληφθεί με χρήση διαφόρων αισθητήρων, όπως κάμερες ή λέιζερ, και στη συνέχεια αναλύονται με αλγορίθμους για την ανίχνευση πιθανών αλλαγών ή φθορών (Payawal & Kim, 2023). Η vision-based τεχνική έχει περισσότερο τεχνικό μέρος με την ανάλυση εικόνας να γίνεται με πολυσύνθετους αλγορίθμους και κυρίως με τη χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (convolutional neural networks - CNNs) που αναγνωρίζουν μοτίβα και χαρακτηριστικά στις εικόνες υποδεικνύοντας δομική φθορά.

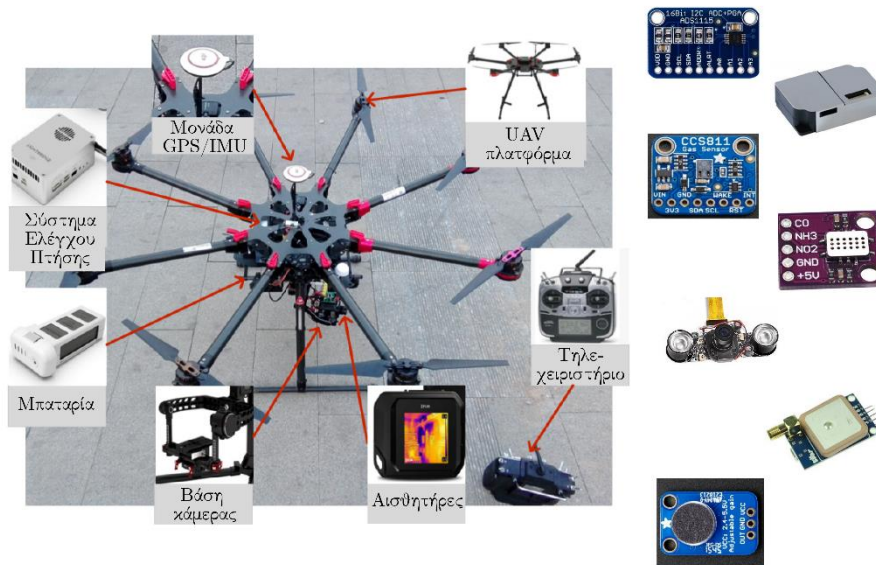
Οι τεχνικές που βασίζονται απλώς στη λήψη εικόνας (image-based) φαίνεται πως αποτελούν ένα πιο εύκολο και αποδοτικό εργαλείο και συνάμα ένα πιο πολυδιάστατο αντικείμενο μελέτης σύμφωνα με το Σχήμα 11, καθώς ακόμη και συνδυάζοντας φθηνή τεχνολογία καμερών μπορούν να δώσουν αποτελέσματα.



Σχήμα 11 - Σκοπός και εφαρμογές ενός SHM βασισμένου στη λήψη εικόνων Πηγή: (Payawal & Kim, 2023)

Η Τηλεπισκόπηση αποτελεί παράδειγμα μιας image-based τεχνικής, της οποίας ο ορισμός διατυπώθηκε από τον Colwell (1997) ως «η μέτρηση ή η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με συγκεκριμένες ιδιότητες ενός στόχου από μια συσκευή καταγραφής, η οποία δεν βρίσκεται σε φυσική επαφή με το ίδιο το αντικείμενο». Οι συσκευές καταγραφής στη σύγχρονη εποχή είναι οι δορυφόροι και τα UAVs και αντίστοιχα οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι παθητικές ή ενεργητικές. Οι πιο συνήθεις τεχνικές σύμφωνα με τους Colomina and Molina (2014) και τους Vaghefi et al. (2012) είναι η χρήση εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (Near Infrared - NIR) ή υπέρυθρης ακτινοβολίας με μικρό μήκος κύματος (ShortWave Infrared - SWIR) ή θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας (Thermal Infrared - TIR), ο φωτοεντοπισμός LiDAR (Light Detection And Ranging), η διάδοση μικροκυμάτων (Microwave Systems), η οπτική συμβολομετρία, τα ραντάρ, η τρισδιάστατη (3D) οπτική (συμπεριλαμβανομένης της φωτογραμμετρίας), οι ψηφιακές φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης τύπου street view και η απλή φωτογράφιση. Οι παραπάνω τεχνικές αναλύονται εκτενώς στην έρευνα του Singhroy (2020).

Η πλειοψηφία των τεχνικών που αναφέρθηκαν, μπορούν να εφαρμοστούν ως επιπλέον εξοπλισμός σε UAV με αισθητήρες, όπως φαίνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 3 κάποιες από τις οποίες όμως απαιτούν περαιτέρω εντατική υπολογιστική μεταγενέστερη επεξεργασία για τη διαμόρφωση ενός τελικού συνόλου πρωτογενών δεδομένων (raw data).



Εικόνα 3 - Παράδειγμα εξοπλισμού UAV Πηγή: (Xiang et al., 2019) και Παραδείγματα αισθητήρων που ενσωματώνονται σε ένα UAV Πηγή: (De Fazio et al., 2021)

Συνήθως, τα δεδομένα αυτά αφού διαμορφωθούν, στη συνέχεια με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας αναλύονται περαιτέρω προκειμένου να πραγματοποιηθεί ορθή αποτύπωση (δημιουργία Ορθοφωτοχάρτη, μοντέλων πλέγματος-mesh models κ.λπ.) της υποδομής. Μετέπειτα, οι διαδικασίες επεξεργασίας περιλαμβάνουν πλήθος τεχνικών που άπτονται στο πεδίο της Ψηφιακής Ανάλυσης και Επεξεργασίας Εικόνας (Digital Image Processing – DIP) κατά την οποία αλγόριθμοι τροποποιούν την εικόνα με τέτοιο τρόπο που συμβάλλουν στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Αυτή η αλληλουχία ενεργειών ανάλυσης και επεξεργασίας είναι που θα αποτελέσει το ευρύτερο πλαίσιο στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Βιβλιογραφικά επίσης τονίζεται πως συναντώνται και παραδείγματα όπου οι δύο (2) καινοτομίες που αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή ο Μη-Καταστρεπτικός Έλεγχος και η Τηλεπισκόπηση μπορούν να συνδυαστούν για ακόμη πιο αποδοτική και ακριβή καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης και των φθορών. Ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής συνδυαστικής μεθοδολογίας για παρακολούθηση υποδομών είναι οι έρευνες των Feroz and Abu Dabous (2021), των Tosti et al. (2021), των Gagliardi et al. (2023) και των Themistocleous et al. (2014).



## 2.3 Ανάλυση Εικόνας

Τα UAVs κυριαρχούν τα τελευταία χρόνια στην επιθεώρηση των υποδομών, τόσο σε ένα πλαίσιο εκτίμησης κινδύνου και φθορών όσο και σε απλή παρακολούθηση της κατάστασης/υγείας (Mandirola et al., 2022). Το ενδιαφέρον κρατικών αλλά και τοπικών αρχών και φορέων να υιοθετήσουν και να επενδύσουν στην εν λόγω τεχνολογία θα έλεγε κανείς πως πηγάζει από τα πολλαπλά πλεονεκτήματά της. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η πλειοψηφία των UAVs διακρίνεται για το ελαφρύ βάρος και το μικρό μέγεθος, το χαμηλό κόστος συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές, τη γρήγορη απόκριση (Duan & Zhang, 2014), την πρόσβαση σε δυσπρόσιτες περιοχές και φυσικά τη δυνατότητα απεικόνισης σε πολύ υψηλής ανάλυσης εικόνες.

Αξίζει να σημειωθεί πως η ευρωπαϊκή έρευνα προοπτικών για τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη που δημοσίευσε η SESAR (Single European Sky Air Traffic Management Research) (SESAR Joint Undertaking, 2017) με πρόβλεψη έως το 2050, υπολογίζει ότι οι δυνατότητες και η αγορά των UAV αναμένεται να εξαπλωθούν με ταχείς ρυθμούς με σημαντικό αντίκτυπο στο πεδίο έρευνας που άπτεται της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Δεδομένου πως τα UAVs γίνονται αποδεκτά ως μέθοδος για την επιτάχυνση της συλλογής δεδομένων γεωγραφικής παρακολούθησης (Shakhatreh et al., 2019), ιδίως εικόνων, αλλά και δεδομένου ότι η ανάλυση και επεξεργασία εικόνας (image analysis/image processing) είναι δυναμικές μέθοδοι που συνεχώς εξελίσσονται, διαπιστώνεται πως ο συνδυασμός τους μπορεί να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα, ερμηνείες και συμπεράσματα στην παρακολούθηση των υλικών όπως το σκυρόδεμα αλλά και των υποδομών συνολικά.

Σήμερα, όλα τα UAV είναι εξοπλισμένα ή μπορούν να εξοπλιστούν εξωγενώς με συσκευές που επιτρέπουν τη λήψη ψηφιακών αεροφωτογραφιών εξαιρετικά μεγάλης ακρίβειας και ποιότητας, χρησιμοποιώντας κάμερες Ultra 4K με ανάλυση πολλών Megapixels (MP) (Lesiak, 2020). Κατά γενική ομολογία όταν ο σκοπός της πτήσης είναι η απόκτηση δεδομένων που στη συνέχεια θα αναλυθούν ώστε να γίνει η ανίχνευση αντικειμένων ή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών όπως οι ρωγμές, τότε θεωρείται απαραίτητη προϋπόθεση η χρήση εικόνων πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης. Σε έρευνες για κατασκευές από σκυρόδεμα όπως γέφυρες, σήραγγες, τμήματα σιδηροδρομικών γραμμών (Jordan et al., 2018) ακόμη και φράγματα, μπορεί να τίθενται προς ανίχνευση μικρής κλίμακας ρωγμές, της τάξης των λιγοστών mm.

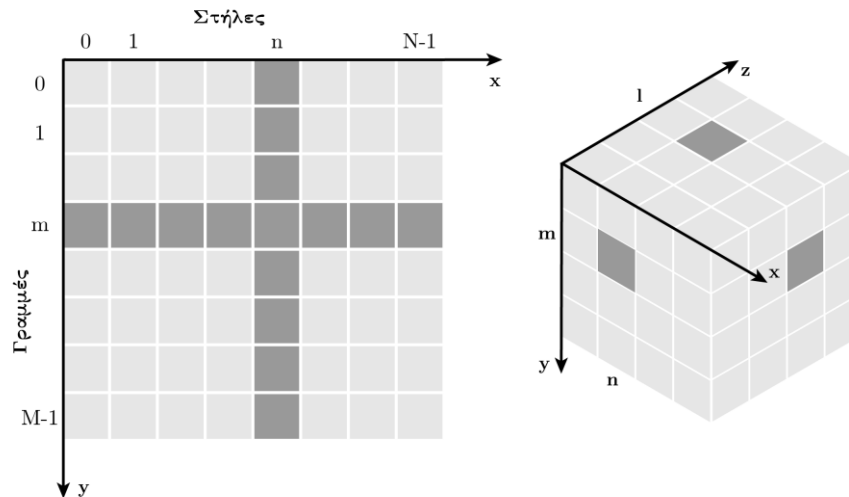
Οι εικόνες υψηλής ανάλυσης καταλαμβάνουν μεγάλο μέγεθος σε βάσεις δεδομένων που δημιουργούνται, όμως προτιμάται να γίνεται περιχοπή τμημάτων μελέτης παρά να γίνονται βήματα προ-επεξεργασίας (pre-processing) για συμπίεση τους (μείωση του

όγκους τους) και άρα την ταυτόχρονη αλλοίωση της ποιότητας τους (Zhang, 2021). Αυτό επιλέγεται, αν και πολλές φορές υπολογιστικά είναι χρονοβόρο, καθώς και η παραμικρή καταγεγραμμένη λεπτομέρεια σε μια ψηφιακή εικόνα είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση της υποδομής ειδικά όταν εξετάζονται λεπτομέρειες κάποιων mm. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό να συμβαίνει και για τις καταγραφές λιμενικών υποδομών, ιδίως στα τμήματα της ανωδομής των πλακών σκυροδέματος που πρέπει να αποτυπωθούν με ακρίβεια της τάξεως του χιλιοστού (και πάλι ίσως κάποιες ρωγμές εκ πρώτης όψεως να μην είναι εμφανείς) ώστε τελικά η λεπτομερής ανάλυση της ψηφιακής εικόνας, να αποδώσει όσο το δυνατό πιο πιστά στην πραγματικότητα αποτελέσματα ανίχνευσης.

Ψηφιακή εικόνα είναι μια διακριτή αναπαράσταση δεδομένων που διαθέτει χωρικές πληροφορίες (πληροφορίες διάταξης – layout) όσο και πληροφορίες εντάσεως (χρωματική πληροφορία) (Solomon & Breckon, 2011). Στον πιο μαθηματικοποιημένο ορισμό που δίνουν οι Gonzalez and Woods (2018) αναφέρουν πως οι χωρικές πληροφορίες αναφέρονται στις επίπεδες συντεταγμένες  $x, y$  με την ένταση να ορίζεται ως  $f$  και τελικά η συνάρτηση της εικόνας ως  $f(x, y)$ , ενώ για να χαρακτηριστεί η εικόνα ψηφιακή πρέπει οι τιμές των παραπάνω να είναι πεπερασμένες. Έτσι, μια ορισμένη ψηφιακή εικόνα αντιπροσωπεύει την απόκριση κάποιου αισθητήρα (ή απλώς μιας τιμής ενδιαφέροντος) σε μια σειρά σταθερών θέσεων ( $x=1, 2, 3, \dots, M$  και  $y=1, 2, 3, \dots, N$ ) σε δισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες που προκύπτει από το δισδιάστατο συνεχές χωρικό σήμα μέσω μιας διαδικασίας δειγματοληψίας που συχνά αναφέρεται ως διακριτοποίηση (discretization) (Solomon & Breckon, 2011).

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & f(0,2) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & f(M-1,2) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Τα στοιχεία του πίνακα στο δεξί μέρος της εξίσωσης (1) είναι αυτά που ονομάζονται στοιχεία εικόνας (image elements ή picture elements) ή εικονοστοιχεία (pixels), όπως έχει επικρατήσει. Ωστόσο, οι υπολογιστές δεν μπορούν να αναγνωρίσουν συνεχείς εικόνες, παρά μόνο πίνακες με αριθμούς, στην προκειμένη τους αριθμούς που αντιστοιχούν σε κάθε εικονοστοιχείο ως πληροφορία. Αυτό που συμβαίνει όμως είναι πως κάθε εικονοστοιχείο δεν αντιπροσωπεύει απλώς ένα σημείο της εικόνας, αλλά μια ορθογώνια περιοχή ως το στοιχειώδες κελί του πλέγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, και συνεπώς η τιμή του αντιπροσωπεύει το μέσο όρο φωτεινότητας κάθε σημείου του κελιού.



Σχήμα 12 - Αναπαράσταση ψηφιακής δισδιάστατης και τρισδιάστατης εικόνας με πίνακα διακριτών σημείων Πηγή: (Jähne, 2002)

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω το μέγεθος του δισδιάστατου πλέγματος εικονοστοιχείων σε συνδυασμό με το μέγεθος των δεδομένων που αποθηκεύονται για κάθε μεμονωμένο εικονοστοιχείο της εικόνας καθορίζει τη χωρική ανάλυση και τον χβαντισμό των χρωμάτων της (Solomon & Breckon, 2011). Η ανάλυση μιας εικόνας καθορίζεται με βάση τρία μεγέθη:  $\alpha$ ) τη χωρική ανάλυση (spatial resolution) δηλαδή τον αριθμό γραμμών επί στηλών της εικόνας,  $\beta$ ) τη χρονική ανάλυση (temporal resolution) δηλαδή τον αριθμό των λήψεων/εικόνων σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (καρέ ανά δευτερόλεπτο/frames per second - fps) και  $\gamma$ ) την ανάλυση bit (bit resolution) ή όπως συνηθίζεται να λέγεται στην πράξη το βάθος χρώματος δηλαδή τον αριθμό των πιθανών τιμών έντασης/χρώματος που μπορεί να έχει ένα εικονοστοιχείο.

Οι χρωματισμοί ή οι τόνοι των εικονοστοιχείων ποικίλουν και γι' αυτό υπάρχουν 4 μεγάλες κατηγορίες στις οποίες κατηγοριοποιούνται οι εικόνες. Αυτές είναι σύμφωνα με τους Baskar et al. (2023):

- δυαδικές εικόνες (binary images): πρόκειται για ασπρόμαυρες εικόνες όπου κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύεται με μαύρο και τιμή 0 ή με λευκό και τιμή 1. Το βασικό προτέρημα της μορφής αυτής είναι ότι κάθε εικονοστοιχείο χρειάζεται μόνο 1 bit αποθηκευτικού χώρου, είτε πρόκειται για λευκό είτε για μαύρο χρώμα.
- ασπρόμαυρες εικόνες (black-and-white images): πρόκειται για τον ίδιο τύπο με τις δυαδικές εικόνες δηλαδή με τιμές 0 και 1, όμως η διαφορά έγκειται στο ότι οι B&W χρειάζονται 8 bit αποθηκευτικού χώρου προσδίδοντας παραπάνω ομαλότητα και εμπλουτισμό στην εικόνα.

- εικόνες κλίμακας του γκρι (grayscale images): πρόκειται για εικόνες που έχουν ένα εύρος αποχρώσεων από το μαύρο, με τιμή 0, έως το λευκό με τιμή 255.
- έγχρωμες εικόνες (color images): πρόκειται για εικόνες όπου κάθε εικονοστοιχείο έχει χρωματική πληροφορία, αποτελούμενο από 3 κανάλια κόκκινο, πράσινο, μπλε (RGB). Κάθε κανάλι από αυτά απαιτεί 8 bit αποθηκευτικό χώρο οπότε συνολικά απαιτούνται 24 bit. Η απόχρωση κάθε εικονοστοιχείου ποικίλλει καθώς αποτελεί συνδυασμό και των 3 καναλιών όπου κάθε κανάλι αποτελείται όπως και στις εικόνες κλίμακας του γκρι από 256 τιμές.

Η κοινή συνισταμένη των παραπάνω τύπων εικόνων είναι πως όλοι μπορούν να προκύψουν από διάφορα επιστημονικά πεδία και όλες οι εικόνες μπορεί να περιλαμβάνουν χρήσιμες πληροφορίες που πρέπει να επεξεργαστούν περαιτέρω.

Οι Baskar et al. (2023) επεξηγούν πως οι αρχές στην επεξεργασία και ανάλυση μιας εικόνας βασίζονται στο πλαίσιο κατανόησης της, όπως ακριβώς δηλαδή ένας άνθρωπος παρατηρεί μια πινακίδα για παράδειγμα στο δρόμο και ο εγκέφαλός του είναι σε θέση αφού την κατανοήσει και την ερμηνεύσει, να πράξει αναλόγως. Έτσι ακριβώς λειτουργεί και ο μηχανισμός της ψηφιακής επεξεργασίας/ανάλυσης, όπου η ίδια εικόνα μπορεί να τροφοδοτηθεί ως είσοδος (input) στο σύστημα, και το σύστημα να ερμηνεύσει και να κατανοήσει το περιεχόμενο της βάσει αλγορίθμων, για να επιτρέψει περαιτέρω ενέργειες να υλοποιηθούν. Το φάσμα των ενεργειών φαντάζει άπειρο χωρίς δηλαδή κάποιο όριο στη χρήση αλγορίθμων.

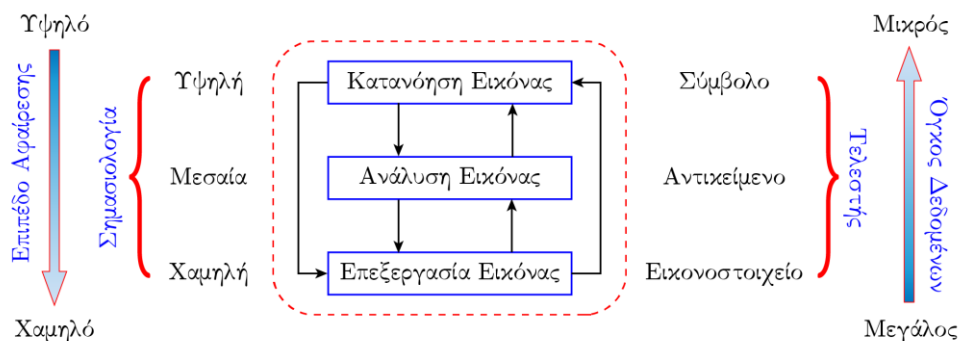
Σύμφωνα με τους Gonzalez and Woods (2018) οι υπολογιστικές ενέργειες επεξεργασίας διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες: α) χαμηλού, β) μεσαίου και γ) υψηλού επιπέδου. Αναλυτικότερα, οι χαμηλού επιπέδου διεργασίες περιλαμβάνουν λειτουργίες προ-επεξεργασίας της εικόνας για τη μείωση του θορύβου, τη βελτίωση της αντίθεσης και την όξυνση της. Επιπλέον, κάτι εξίσου σημαντικό είναι πως στις χαμηλού επιπέδου τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος (output) του συστήματος είναι αποκλειστικά εικόνα.

Στις μεσαίου επιπέδου διεργασίες (Gonzalez & Woods, 2018), περιλαμβάνονται ενέργειες κατάτμησης (segmentation), διαχωρισμού δηλαδή μιας εικόνας σε περιοχές ή αντικείμενα και η ταξινόμηση (classification) των μεμονωμένων αντικειμένων. Στην έξοδο αυτών των διεργασιών έγκειται η διαφοροποίηση από το προηγούμενο επίπεδο καθώς πρόκειται για χαρακτηριστικά που εξάγονται από τις εικόνες αυτές π.χ. ακμές, περιγράμματα, μετρήσεις ή η ταυτότητα μεμονωμένων αντικειμένων. Τέλος, στις υψηλού επιπέδου διεργασίες περιλαμβάνονται αλγόριθμοι για την αξιοποίηση ενός συνόλου ήδη

αναγνωρισμένων αντικειμένων που θα δράσουν σε ένα τέτοιο μοτίβο σαν αυτό της ανθρώπινης όρασης, δηλαδή οτιδήποτε σχετίζεται με μηχανική μάθηση (machine learning).

Μετά από εμπειριστατωμένη και πολύχρονη έρευνα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες για επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία ψηφιακών εικόνων με υπολογιστικές τεχνικές που ανήκουν στα παραπάνω επίπεδα (Zhang, 2022). Δεδομένου όμως πως δεν υπάρχει μια γενική συμφωνία μεταξύ της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας σχετικά με το που σταματά η επεξεργασία εικόνας (Image Processing - IP) και που ξεκινά η ανάλυση εικόνας (Image Analysis - IA) και σαφώς μεταξύ ποιων νοητικών ορίων τείνει ή βρίσκεται ήδη η όραση υπολογιστών (Gonzalez & Woods, 2018), οι έννοιες, οι μεθοδολογίες και οτιδήποτε άλλο σχετικό παραμένει ρευστό με αποτέλεσμα να διαπιστώνεται έντονη επικάλυψη ορολογιών, μεθόδων και τεχνικών.

Απάντηση στα παραπάνω φαίνεται πως έρχεται να δώσει με τις έρευνες του ο Zhang, ο οποίος ήδη από το (1996) κάνει λόγο για την ενοποίηση όλων των τεχνικών, θεωριών, εφαρμογών κ.λπ. υπό τον όρο της Μηχανικής της Εικόνας (Image Engineering - IE), βασισμένη σε κλάδους όπως τα μαθηματικά, η φυσική, η φυσιολογία και η ψυχολογία και η επιστήμη των υπολογιστών. Η Μηχανική της Εικόνας φαίνεται πως έχει επικαλυπτόμενη εφαρμογή μέχρι και σε κλάδους, όπως η αναγνώριση προτύπων, η όραση υπολογιστών, τα γραφικά υπολογιστών, η τεχνητή νοημοσύνη, τα νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι, η ασαφής λογική και η μηχανική μάθηση (Zhang, 2022). Όπως επεξήγησε ο ίδιος ο Zhang, στις πρόσφατες έρευνες του, τα συστατικά μέρη της Μηχανικής της Εικόνας είναι τρία (3) και όλα αλληλεξαρτώνται όπως φαίνεται στο Σχήμα 13: α) Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (DIP) (Zhang, 2017b), β) Ανάλυση Εικόνας (Image Analysis -IA) (Zhang, 2017a) και γ) Κατανόηση Εικόνας (Image Understanding - IU) (Zhang, 2017c).



Σχήμα 13 - Σχηματική Αναπαράσταση Μηχανικής της Εικόνας Πηγή: (Zhang, 2022)

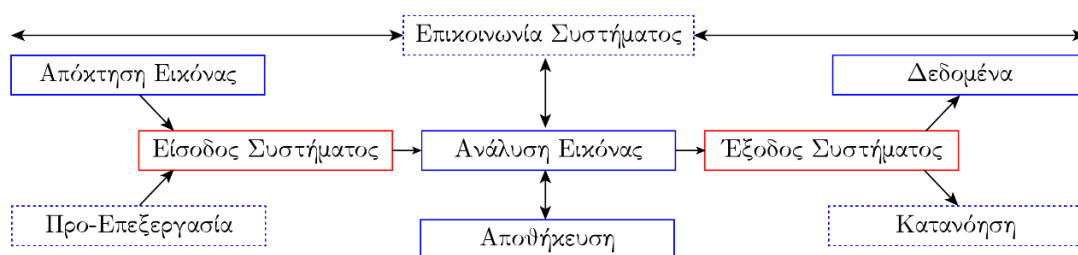
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής η μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί στη

συνέχεια βασίζεται κατά κύριο λόγο στην Ανάλυση Εικόνας και κατά δεύτερο στην Επεξεργασία Εικόνας, χωρίς ωστόσο η σειρά αυτή να προοικονομεί την ακριβή σειρά των βημάτων. Η Ανάλυση της εικόνας επιπλέον, περιλαμβάνει εισαγωγικά βήματα ως προ-επεξεργασία εικόνας, γι' αυτό και κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια πλήρης ερμηνεία του όρου.

Ο όρος της Ανάλυσης Εικόνας (Image Analysis - IA) συγκεντρώνει πολλές ερμηνείες που έχουν δοθεί κατά το παρελθόν έως σήμερα από ερευνητές, κάποιες από τις οποίες παρουσιάζουν ομοιότητες. Ενδεικτικά κάποιοι από τους ορισμούς:

- Σκοπός της IA είναι η δημιουργία/κατασκευή μιας σκληρής βάσει των πληροφοριών που εξάγονται από μια εικόνα (Rosenfeld, 1987)
- Η IA αναφέρεται στη χρήση υπολογιστών για την επεξεργασία εικόνων με σκοπό την εξεύρεση των αντικείμενων που υπάρχουν στην εικόνα (Pavlidis, 1988)
- Η IA ποσοτικοποιεί και ταξινομεί εικόνες και αντικείμενα σε νέες εικόνες (Mahdavih & Gonzalez, 1992)
- Η IA εξετάζει τον τρόπο εξαγωγής ουσιαστικών δεδομένων μέτρησης από πολυδιάστατα σήματα (Young & Renswoude, 1988)
- Η IA είναι μια διαδικασία απλούστευσης εικόνων κλίμακας του γκρι ή έγχρωμων εικόνων με αρκετά megabytes σε λίγους μόνο ουσιαστικούς και χρήσιμους αριθμούς (Russ, 2006)

Μια από τις πληρέστερες ερμηνείες ωστόσο είναι του Zhang (2022) όπου ως IA ορίζεται μια διαδικασία που ξεκινά από την εικόνα και ανιχνεύει, εξάγει, αναπαριστά, περιγράφει και μετρά τα αντικείμενα ενδιαφέροντος, προκειμένου να ληφθούν αντικειμενικές πληροφορίες και αποτελέσματα ως δεδομένα εξόδου.



Σχήμα 14 - Σχηματική Αναπαράσταση του μηχανισμού Ανάλυσης Εικόνας Πηγή: (Zhang, 2021)

Στο Σχήμα 14 αναπαρίστανται γραφικά οι επτά (7) ενότητες, με τα διακεκομμένα

πλαίσια να αντιπροσωπεύουν περιφερειακές ενέργειες στις οποίες μπορούν να εμπλέκονται και διεργασίες από τα υπόλοιπα δύο (2) μέρη της Μηχανικής της Εικόνας. Σημαντική επισήμανση είναι πως κάθε φορά μπορεί να απαιτούνται διαφορετικές εσωτερικές διεργασίες στη φάση εισόδου/εξόδου ή στη φάση ανάλυσης και ο μηχανισμός να διαφοροποιείται είτε προσθέτοντας είτε αφαιρώντας τμήματα (Zhang, 2021). Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα παράδειγμα συνδυασμού μεθόδων και τεχνικών που άπτονται στα συστατικά μέρη της Ανάλυσης και της Επεξεργασίας Εικόνας ενώ υποστηρικτικά λειτουργούν τεχνικές κατανόησης και ερμηνείας, αποφεύγοντας ωστόσο οποιοδήποτε βήμα σχετίζεται με τη μηχανική μάθηση. Από εδώ και στο εξής παρακάτω, παρόλο που όπως επεξηγήθηκε υπάρχει σύγχυση των όρων, γίνεται η θεώρηση ότι όπως διαφαίνεται και στον τίτλο της διπλωματικής, η μεθοδολογία βασίζεται στην έννοια της Ανάλυσης της Εικόνας.

Ο μηχανισμός της Ανάλυσης Εικόνας, πρακτικά αποτελεί ένα σύστημα που χρησιμοποιεί εξοπλισμό και τεχνολογία για την εκτέλεση διεργασιών. Από τη στιγμή που οι διάφορες αναλύσεις εικόνων μπορούν γενικά να περιγραφούν και να εκτελεστούν με τη μορφή αλγορίθμων και δεδομένου πως οι περισσότεροι αλγόριθμοι μπορούν να υλοποιηθούν σε ένα ενιαίο λογισμικό, είναι εμφανές πως η διαδικασία απλουστεύεται και απαιτείται η χρήση μονάχα ενός κοινού ηλεκτρονικού υπολογιστή (Zhang, 2021).

Σ' αυτό το πλεονέκτημα έγκειται η σημαντικότητα της Ανάλυσης Εικόνας αφού ένας απλός οικιακός υπολογιστής είναι αρκετός να καλύψει τις ανάγκες μιας απλής Ανάλυσης. Ωστόσο, όταν κάποιος καλείται να διαχειριστεί και να αναλύσει έναν αρκετά μεγάλο όγκο δεδομένων εικόνων τότε είναι σαφές πως απαιτείται υλισμικό (hardware) προηγμένης τεχνολογίας ώστε να καλυφθούν περιορισμοί ή επιπλέον ανάγκες λειτουργίας του συστήματος (Dumka et al., 2020).

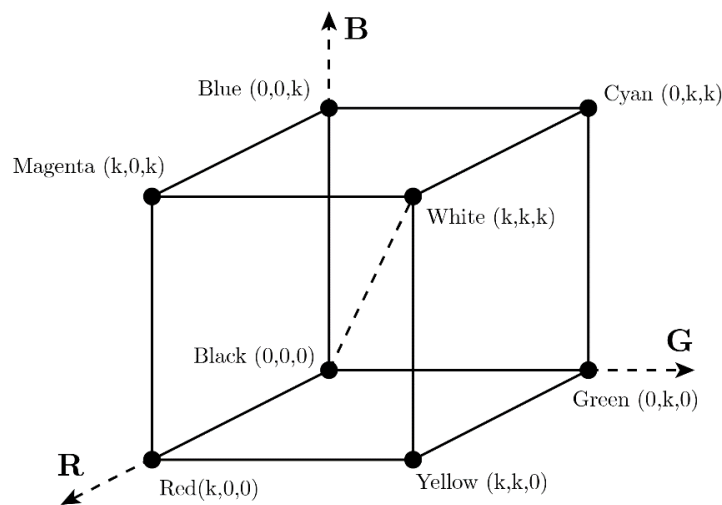
Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω επειδή ο υπολογιστής αναγνωρίζει τις εικόνες ως πίνακες, ολόκληρη η διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας βασίζεται καθαρά σε μαθηματικές εξισώσεις και πράξεις. Αυτό μπορεί φυσικά να χαρακτηριστεί και ως μειονέκτημα για κάποιους, παρόλα αυτά όμως δεν παύει να είναι πολύτιμο εργαλείο αφού πολύ άμεσα επιτρέπει την απλοποίηση, το μετασχηματισμό ή ακόμα και την αλλαγή μορφότυπου (format) αρχείου της εικόνας (Πίνακας 1) (Gonzalez & Woods, 2018).

Πίνακας 1 - Κοινές μορφές εικόνας και οι σχετικές ιδιότητές τους Πηγή: (Solomon & Breckon, 2011)

Ακρωνύμιο	Ονομασία	Ιδιότητες
GIF	Graphics interchange format	Περιορίζεται μόνο σε 256 χρώματα (8 bit)-συμπίεση χωρίς απώλειες (lossless)

JPEG	Joint Photographic Experts Group	Η πιο συνηθισμένη μορφή σήμερα, συμπίεση με απώλειες (lossy)
BMP	Bit map picture	Βασική μορφή εικόνας, περιορισμένη (γενικά) συμπίεση χωρίς απώλειες (lossless)
PNG	Portable network graphics	Νέα μορφή, συμπίεση χωρίς απώλειες (lossless), σχεδιασμένη να αντικαταστήσει το GIF
TIF/TIFF	Tagged image (file) format	Εξαιρετικά ευέλικτη, λεπτομερής και προσαρμόσιμη μορφή, παραλλαγές ως προς τη συμπίεση

Η μορφή TIFF, αποτελώντας την πλέον συνηθισμένη μορφή σε Αναλύσεις Εικόνες, συνήθως αναφέρεται ως τεράστια μορφή αρχείου λόγω του όγκου που καταλαμβάνει. Βέβαια, όταν μια εικόνα γίνεται μεγαλύτερη, έχει πολλά δεδομένα και περιεχόμενο μέσα της, με ένα από αυτά να είναι τα χρώματα της καθώς η συγκεκριμένη μορφή υποστηρίζει κλίμακα του γκρι, CMYK (Cyan (κυανό), Magenta (ματζέντα), Yellow (κίτρινο), και K (Key) αντιστοιχίζεται στο Black (μαύρο)), RGB (Red (κόκκινο), Green (πράσινο) και Blue (μπλε)) και άλλα. Στο Σχήμα 15 φαίνεται ο πιο συνηθισμένος χώρος χρωμάτων από αυτούς, με τις εικόνες κλίμακας του γκρι να βρίσκονται επάνω στη διακεκομμένη γραμμή μεταξύ μαύρου και λευκού. Σημαντικό επίσης είναι πως παρέχει τη βέλτιστη ποιότητα εικόνας χωρίς να υπάρχουν απώλειες.



Σχήμα 15 - Χρωματικός χώρος RGB με πρωτεύοντα και δευτερεύοντα χρώματα Πηγή: (Sonka et al., 2014)

Στο καθαρά πρακτικό σκέλος της Ανάλυσης Εικόνας, ένα σημαντικό πλεονέκτημα κατά τη διαδικασία μετατροπής εισόδου σε έξοδο, πηγάζει βάσει των μαθηματικών πράξεων (operations) αναμεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων αλλά και των τοπολογικών ή χωρικών σχέσεων (γειτονιά – neighborhood) τους. Στις μαθηματικές πράξεις υπάρχει ένας διαχωρισμός σε τρεις (3) κατηγορίες (Baskar et al., 2023): α) σημειακές (point) πράξεις, όπου η τιμή εξόδου σε μια συγκεκριμένη συντεταγμένη



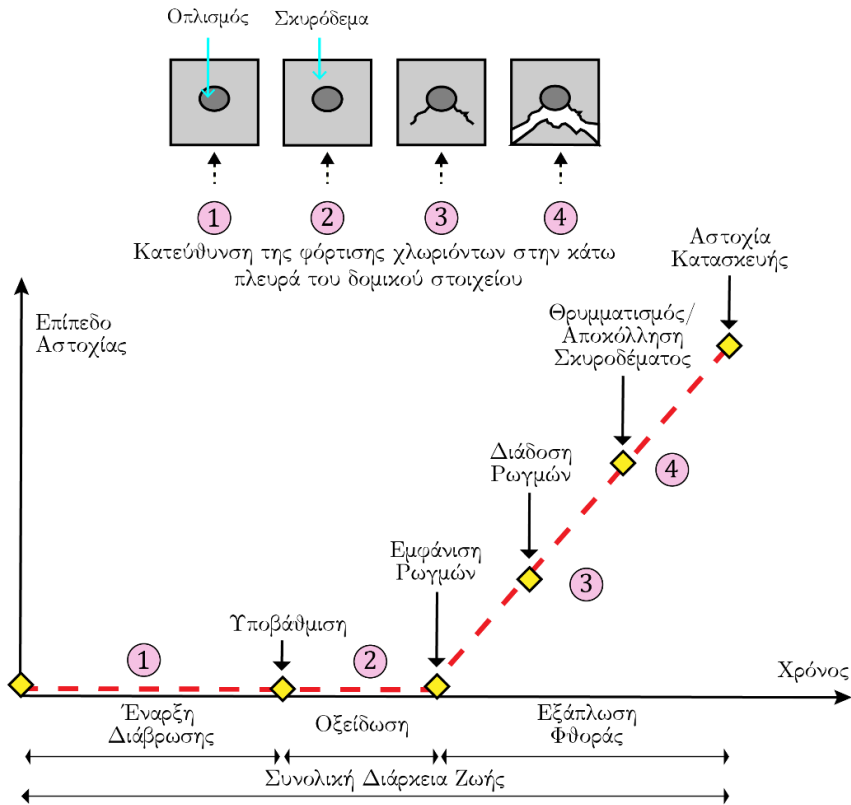
εξαρτάται μόνο από την τιμή εισόδου στην ίδια συντεταγμένη και τίποτα άλλο, β) τοπικές (local) πράξεις, όπου στην τιμή εξόδου δεν λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα εικονοστοιχείο αλλά και τα γειτονικά του σημεία που αποτελούν ένα παράθυρο εικόνας, και γ) καθολικές (global) πράξεις, όπου η τιμή εξόδου σε ένα συγκεκριμένο σημείο εξαρτάται από όλες τις τιμές στην εικόνα εισόδου. Τα γειτονικά σημεία είναι συνήθως ορθογωνικού παραθύρου και είτε υποδηλώνουν σύνδεση τεσσάρων (4) συνδεδεμένων εικονοστοιχείων (μορφή σταυρού) ή οκτώ (8).

Οι σχέσεις αυτές είναι πολύ χρήσιμες όπως θα δειχθεί και παρακάτω στο σκέλος της μεθοδολογίας, καθώς υπεισέρχονται σχεδόν σε κάθε διεργασία επεξεργασίας και ανάλυσης, ενώ ενδεικτικά επισημαίνεται πως βοηθούν στην καλύτερη εξομάλυνση, αναγνώριση προτύπων, μοτίβων και αντικειμένων κ.λπ.

## 2.4 Εντοπισμός Ρωγμών σε Υποδομές από Σκυρόδεμα με Χρήση Εικόνων

Η ανθεκτικότητα των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα στο θαλάσσιο περιβάλλον γίνεται κατανοητή από πολλούς ερευνητές, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, ως η ικανότητα αντίστασης της κατασκευής στη διείσδυση επιβλαβών ουσιών, ιδίως ιόντων χλωρίου από το εξωτερικό περιβάλλον, μέσω ενός δικτύου πόρων και ρωγμών (Van Hung et al., 2018). Οι ρηγματώσεις αποτελούν μια από τις πιο συνηθισμένες μορφές αστοχίας του σκυροδέματος και όπως αναφέρουν οι Van Hung et al. (2018) χαρακτηρίζονται ως ένα από τα εγγενή χαρακτηριστικά του, καθώς επιστημονικά στη θεωρία σκυροδέματος υπάρχει μια κατηγοριοποίηση των ρωγμών σε δύο τύπους: α) ρωγμές πρώιμου σταδίου (πριν τις 28 ημέρες) και β) ρωγμές μετά την πλήρη απόκτηση της αντοχής του σκυροδέματος.

Η ρωγή (cracking) σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να οδηγήσει σε ευκολότερη και γρηγορότερη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού λόγω αποδυνάμωσης της επικάλυψης σκυροδέματος (depassivation) (Shaikh, 2018). Η παρουσία ρωγμών σε μια κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα τη συντόμευση του χρόνου έναρξης της διάβρωσης, όπως επίσης επιταχύνει κατά πολύ τη διάδοση/εξάπλωση της ζημιάς στο υπόλοιπο ανετηρέαστο μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή τμήμα της κατασκευής αναδεικνύοντας τη χαμηλή εφελκυστική αντοχή. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται στο Σχήμα 16, ενώ οι ρωγμές μπορούν να ποικίλουν σε πλάτος, μήκος, βάθος, γεωμετρία κ.λπ.



Σχήμα 16 - Στάδια περιγραφής διάρκειας ζωής κατασκευών υπό φθορά επηρεασμένα από διάβρωση Πηγή: (Siamphukdee, 2015)

Ιδιαίτερα για το θαλάσσιο περιβάλλον και τις λιμενικές εγκαταστάσεις, είναι πολύ χρήσιμη η έρευνα των Champiri et al. (2012), καθώς επισημαίνουν αναλυτικά κατηγορίες ρωγμών και επιφανειακών φθορών που υποδεικνύουν δομικό πρόβλημα και αστοχία. Οι φθορές αυτές σχηματίζουν συγκεκριμένα μοτίβα που μπορούν να εντοπιστούν τις περισσότερες φορές σε μια φωτογραφία με αρκετά καλή χωρική ανάλυση.

Ανάλογα φυσικά με το μέσο λήψης αλλά και το μέρος/τρόπο (αέρα ή έδαφος) λήψης τα αποτελέσματα μιας εικόνας μπορεί να διαφέρουν επειδή διαφορετική λεπτομέρεια θα αποτυπώνει μια εικόνα που είναι τραβηγμένη για παράδειγμα στο 1m από το έδαφος μέσω μιας κάμερας ή ακόμη και μέσω ενός έξυπνου τηλεφώνου και διαφορετική μια εικόνα τραβηγμένη από μια πτήση UAV ή από έναν δορυφόρο. Οι ρωγμές είναι εντελώς ακανόνιστες γραμμές κατά μήκος μιας επιφάνειας (Shifani et al., 2020) και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ποικίλουν από λίγα mm έως και αρκετά cm, συνεπώς πάντα πρέπει να υπάρχει ορθολογική κρίση για το ποια είναι η βέλτιστη απόσταση λήψης ώστε να καταγραφούν (να είναι εμφανείς πρακτικά) όσο το δυνατόν περισσότερες ρωγμές στο πλαίσιο μιας παρακολούθησης με πτήση UAV.

Τις περισσότερες φορές βέβαια έχει αποδειχτεί πως δεν είναι αρκετή μονάχα μια καλή

πτήση που συνάμα θα αποδώσει και μια καλή εικόνα, αλλά απαιτείται και περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία της εικόνας προκειμένου ή να γίνουν πιο ευκρινή κάποια στοιχεία ή να εντοπιστούν πολύ συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή να αφαιρεθούν χαρακτηριστικά της εικόνας π.χ. κάποιος θόρυβος. Όπως τονίζουν οι Mohan and Poobal (2018) το εγχείρημα στη φάση ανίχνευσης μια ρωγμής σε μια εικόνα είναι μια δύσκολη διαδικασία, όχι μόνο λόγω του ακανόνιστου σχήματος και μεγέθους των ρωγμών και του θορύβου αλλά και των ακανόνιστα φωτισμένων συνθηκών και σκιάσεων, των ατελειών και των αποκολλήσεων στο σκυρόδεμα (spalling).

Τα βήματα μιας συνηθισμένης μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας γι' αυτό το σκοπό βασίζονται σε ένα εύρος τεχνικών, οι οποίες και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Αξίζει να σημειωθεί πως ανίχνευση ρωγμών στη διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν έχει πραγματοποιηθεί σε λιμάνια και λιμενικές εγκαταστάσεις, με τη μοναδική περίπτωση που εντοπίζεται βιβλιογραφικά να είναι της Tsaimou et al. (2023) όπου υλοποιεί μια πρωταρχική ανίχνευση με χρήση GIS μεθόδων σε λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα και αποκλειστικά στην ανωδομή. Σε εύκαμπτα (flexible), ημιάκαμπτα/ημιδύσκαμπτα (semi rigid) και δύσκαμπτα/άκαμπτα (rigid) οδοστρώματα με εφαρμογές σε μεγάλες γέφυρες και οδούς η βιβλιογραφία είναι περισσότερο εμπλουτισμένη, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι ερευνητικά δεν υπάρχει ενδιαφέρον ανάπτυξης νέων εφαρμογών ή βελτιστοποίησης υπαρχόντων. Επιπλέον, χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των UAV είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν τεχνικές προκειμένου να εντοπιστούν ρωγμές σε κτίρια, ηλιακούς συλλέκτες, ανεμογεννήτριες, σιδηροδρομικές γραμμές κ.λπ. καλύπτοντας έτσι ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογής τεχνικών έργων.

## 2.5 Μέθοδοι Ανάλυσης και Επεξεργασίας Εικόνας

Βιβλιογραφικά υπάρχει πληθώρα μεθόδων, τεχνικών και υπό-τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και επεξεργασία των εικόνων και συνήθως χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά της εικόνας και συνεπακόλουθα των στοιχείων που αναπαρίστανται σ' εκείνη όπως το χρώμα, η υφή, η φωτεινότητα και η ένταση, το σχήμα, το μέγεθος και ο προσανατολισμός. Η προσέγγιση κάθε μεθόδου επομένως μετατρέπει την αρχική εικόνα (ακατέργαστα δεδομένα - raw data) σε σημαντική πληροφορία μέσω διεργασιών επεξεργασίας, δηλαδή ο στόχος σε μια τέτοια διαδικασία είναι πάντα η ανάδειξη του προς μελέτη στοιχείου/χαρακτηριστικού/αντικειμένου (Dumka et al., 2020).

Κάτι πολύ σημαντικό στο σημείο αυτό που πρέπει να διασαφηνιστεί προτού γίνει αναφορά σε μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας είναι η διαφορά μεταξύ χωρικού πεδίου (spatial domain) και πεδίου συχνότητας (frequency domain). Τα δυο αυτά πεδία είναι

από τα βασικά συστατικά διαφοροποίησης στην αντίληψη των μεθόδων και ερμηνεύονται ως εξής (Dumka et al., 2020):

- Το χωρικό πεδίο, διαχειρίζεται τις φωτεινότητες των εικονοστοιχείων της εικόνας, δηλαδή αναφέρεται στην αναπαράσταση μιας εικόνας με βάση τις τιμές των μεμονωμένων εικονοστοιχείων (ακατέργαστα δεδομένα) της που αντιπροσωπεύουν τη φυσική θέση και τη φωτεινότητα κάθε εικονοστοιχείου. Οι μέθοδοι του χωρικού τομέα εκτελούνται στο ίδιο το επίπεδο της εικόνας και βασίζονται στον άμεσο χειρισμό των εικονοστοιχείων. Η λειτουργία μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (2)$$

όπου  $g$  είναι η εικόνα εξόδου,  $f$  είναι η εικόνα εισόδου, και  $T$  είναι μια πράξη στην  $f$  που ορίζεται σε κάποια γειτονιά της  $(x,y)$ .

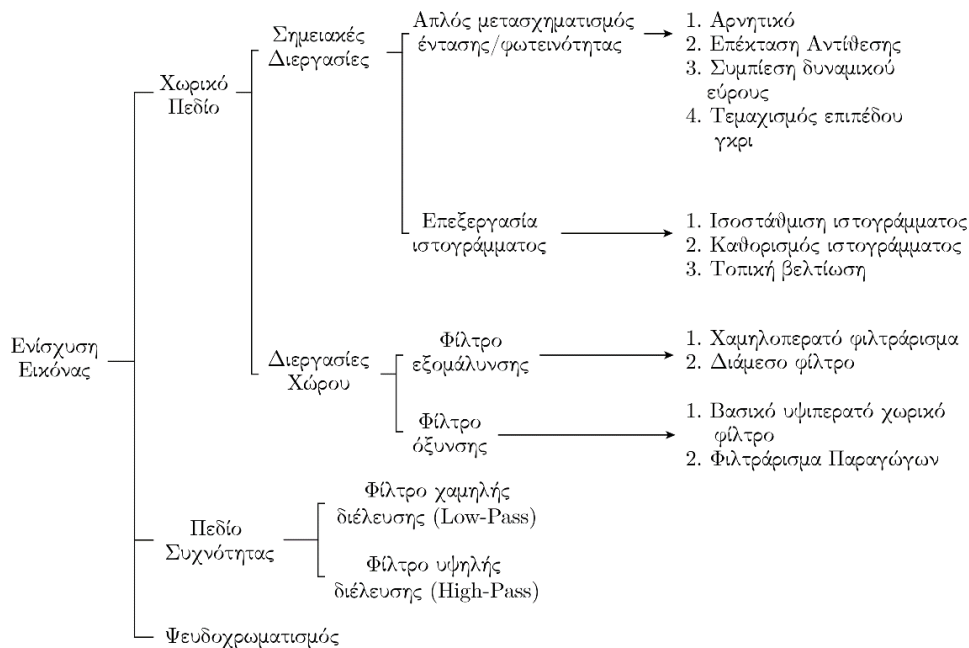
- Το πεδίο συχνότητας, διαχειρίζεται το ρυθμό εναλλαγής της φωτεινότητας της εικόνας, δηλαδή αναφέρεται στην αναπαράσταση μιας εικόνας ως προς τις συνιστώσες της συχνότητάς της. Πρακτικά, οι μέθοδοι του πεδίου συχνότητων βελτιώνουν την εικόνα μέσω της συνέλιξης με έναν γραμμικό, αναλλοίωτο ως προς τη θέση τελεστή. Η εικόνα αναπαρίσταται ως ένα σύνολο ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες και οι μέθοδοι συνήθως χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των περιοδικών δομών και μοτίβων και την αφαίρεση θορύβου.

Η διαφορά μεταξύ των δύο πεδίων είναι ο τρόπος με τον οποίο αναπαριστούν μια εικόνα και γι' αυτό καθένα έχει διαφορετικές εφαρμογές στις επιστήμες που είναι απαραίτητη η ανάλυση και επεξεργασία εικόνας. Οι μέθοδοι και των δύο πεδίων είναι πολλαπλές και από όταν άρχισε η ανίχνευση ρωγμών μέσω ανάλυσης εικόνας να απασχολεί τους ερευνητές, καθεμία από αυτές εφαρμόστηκε είτε αυτόνομα είτε συνδυαστικά με άλλες μεθόδους του ίδιου πεδίου ή μεταξύ των δύο. Στην πράξη αποδείχθηκε (Dorafshan et al., 2019) πως οι μέθοδοι και συνάμα οι τεχνικές του πεδίου της συχνότητας λόγω της υπολογιστικής διάρκειας των μετασχηματισμών Fourier και του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier που απαιτούνται για τη μετατροπή από το ένα πεδίο στο άλλο, είναι πιο αργές και λιγότερο ακριβείς στην ανίχνευση καθιστώντας έτσι αυτές του χωρικού πεδίου πολύ πιο άμεσες για το χειρισμό των τιμών των εικονοστοιχείων και την εξαγωγή αποτελέσματος για τις ρωγμές. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες από τις πιο τυποποιημένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις.

### 2.5.1 Βελτίωση και Αποκατάσταση Εικόνας

Η ενίσχυση (enhancement) και η αποκατάσταση (restoration) αποτελούν τα στοιχεία γύρω από τον ευρύτερο όρο της βελτίωσης εικόνας (image improvement) που σε όλες τις έρευνες αποτελεί το πρωταρχικό βήμα και άρα τη μέθοδο προ-επεξεργασίας. Η προ-επεξεργασία δεν αυξάνει τόσο το πληροφοριακό περιεχόμενο της εικόνας (Sonka et al., 2014) αλλά αντιθέτως είναι η κινητήριος δύναμη καταστολής πληροφοριών άσχετων με το περιεχόμενο που θέλει κάποιος ερευνητής να εξετάσει. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν και γεωμετρικά στοιχεία, συνεπώς στο συγκεκριμένο στάδιο ανήκει και η γεωμετρική τροποποίηση της εικόνας. Αναλυτικότερα ισχύουν:

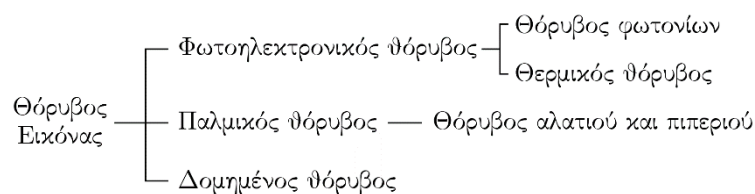
- Ενίσχυση εικόνας είναι η σειρά τεχνικών που επιδιώκουν να βελτιώσουν την οπτική εμφάνιση μιας εικόνας μετατρέποντας την σε μια καταλληλότερη μορφή για ανάλυση. Σύμφωνα με τον Pratt (2013), σε μια αλληλουχία πράξεων ενίσχυσης της εικόνας είναι αδύνατο να υπάρχει συνειδητή προσπάθεια βελτίωσης της πιστότητας αναπαράστασης ενός και μόνο στοιχείου ενδιαφέροντος, καθώς κάτι τέτοιο ξεφεύγει από το πλαίσιο της ενίσχυσης. Σημαντική παράμετρος είναι η αντίθεση (contrast), η οποία ορίζεται ως η διαφορά στη φωτεινότητα που αντανακλάται από δύο γειτονικές επιφάνειες/εικονοστοιχεία (Dumka et al., 2020). Επιπλέον διεργασίες πέραν της αύξησης/μείωσης φωτεινότητας και αντίθεσης είναι η εξομάλυνση (smoothing) και η όξυνση (sharpening).



Σχήμα 17 - Κατηγοριοποίηση της μεθόδου ενίσχυσης εικόνας Πηγή: (Dumka et al., 2020)

- Αποκατάσταση εικόνας είναι το βήμα που μπορεί να αναιρέσει όλα τα σφάλματα/ελαττώματα μιας υποβαθμισμένης εικόνας (Baskar et al., 2023) που προκαλούνται συνήθως από θόλωμα κίνησης (motion blur), θόρυβο (noise) ή από αστοχία εστίασης της κάμερας (camera miss-focus) (Dumka et al., 2020). Η αποκατάσταση εικόνας μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αντιστροφή της διαδικασίας που προκάλεσε το θόλωμα της εικόνας. Σημαντικό ωστόσο είναι πως συμβατικά, η διαδικασία θόλωσης θεωρείται ότι είναι αμετάβλητη ως προς τη μετατόπιση, γι' αυτό και πιο εξελιγμένες τεχνικές, όπως η κανονικοποιημένη αποθορυβοποίηση (regularized deblurring), έχουν αναπτυχθεί για να προσφέρουν ισχυρή αποκατάσταση υπό διαφορετικούς τύπους θορύβων.
- Γεωμετρική Τροποποίηση είναι πρακτικά η διαδικασία κατά την οποία μια εικόνα «μεταφράζεται» (image translation) χωρικά, κλιμακώνεται σε μέγεθος (scaled in size), περιστρέφεται (rotated) ή παραμορφώνεται μη γραμμικά (nonlinearly warped).

Από τα παραπάνω, για την ανίχνευση ρωγμών σημαντικό βήμα είναι η αποθορυβοποίηση δηλαδή μια μορφή εξομάλυνσης στη διαδικασία ενίσχυσης της εικόνας. Ο θόρυβος ορίζεται ως μια διακύμανση ή απόκλιση της φωτεινότητας ή της χρωματικής πληροφορίας σε μια εικόνα (Baskar et al., 2023), με την πηγή του τις περισσότερες φορές να είναι οι αισθητήρες της κάμερας και τα σχετικά εσωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα της. Τα εξαρτήματα αυτά εισάγουν ανωμαλίες ή ατέλειες στην εικόνα που σίγουρα υποβαθμίζουν την ποιότητα της. Η κατηγοριοποίηση των θορύβων σε μια εικόνα, γίνεται όπως περιγράφεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18 - Κατηγοριοποίηση θορύβου εικόνας Πηγή: (Baskar et al., 2023)

Μαθηματικά η έννοια του θορύβου σε μια εικόνα μεταφράζεται ως εξής:

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y) \quad (3)$$

όπου  $g$  είναι η αλλοιωμένη με θόρυβο εικόνα,  $f$  είναι η εικόνα εισόδου, και  $\eta$  είναι ο θόρυβος σε κάθε ζεύγος συντεταγμένων  $(x, y)$ .

### 2.5.2 Κατάτμηση Εικόνας

Η κατάτμηση ή τμηματοποίηση εικόνας (image segmentation) είναι η ονομασία που δίνεται στη γενική διαδικασία με την οποία μια εικόνα υποδιαιρείται στις περιοχές ή τα αντικείμενα που την απαρτίζουν (Solomon & Breckon, 2011) και που παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με αυτά του πραγματικού κόσμου (Sonka et al., 2014). Η κατάτμηση κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυση και επεξεργασία εικόνας, επειδή είναι πολύ συχνά το πρώτο βήμα αναγνώρισης και εξαγωγής κάποιων πληροφοριών που στη συνέχεια θα αξιοποιηθούν με στόχο την εξαγωγή χαρακτηριστικών, την ταξινόμηση κ.λπ.

Μαθηματικά η κατάτμηση επεξηγείται ως εξής: Έστω εικόνα  $R$ . Η κατάτμηση χωρίζει την  $R$  σε  $N$  διακριτές περιοχές με βάση τον κανόνα  $P(R)$  έτσι ώστε να ισχύουν τα παρακάτω

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i, \quad R_i \cap R_j = \emptyset, \quad \forall i, j, \quad i \neq j \quad (4)$$

που σημαίνει πως οι περιοχές πρέπει να καλύπτουν όλη την εικόνα, κάθε  $R_i$  είναι συνδεδεμένη περιοχή με βάση έναν προκαθορισμένο κανόνα και οι περιοχές είναι μη επικαλυπτόμενες.

Στη μέθοδο αυτή γίνεται αντιληπτό πως κυριαρχεί το ερώτημα «Ποια είναι η σχέση που πρέπει να έχουν τα γειτονικά εικονοστοιχεία με το εξεταζόμενο εικονοστοιχείο αλλά και ποια σχέση πρέπει να έχουν τα υπόλοιπα ώστε να αποδίδονται ορθά τα αποτελέσματα της κατάτμησης;». Το ερώτημα αυτό προσεγγίζεται με δύο τρόπους (Solomon & Breckon, 2011): α) με τη μέθοδο των ακμών/ορίων (edge/boundary method), η προσέγγιση βασίζεται στην ανίχνευση ακμών ως μέσο προσδιορισμού των ορίων μεταξύ των περιοχών/αντικειμένων και ως εκ τούτου αναζητά έντονες διαφορές μεταξύ ομάδων εικονοστοιχείων και β) με τη μέθοδο της περιοχής (region-based method), η προσέγγιση αυτή αποδίδει τα εικονοστοιχεία σε μια δεδομένη περιοχή με βάση το βαθμό ομοιότητας, δηλαδή ο στόχος είναι να σχηματίσουν συνεκτικές περιοχές.

Η κατάτμηση ως διαδικασία είναι από τις πιο κρίσιμες και απαιτητικές καθώς η ποιότητα της εικόνας εισόδου μπορεί να είναι κακή λόγω πολλαπλών παραγόντων, όπως ανομοιόμορφος φωτισμός, σκιές, θόρυβος, ύπαρξη επικάλυψης μεταξύ των αντικειμένων και χαμηλή/ελλιπής αντίθεση μεταξύ αντικειμένων στο προσκήνιο και στο υπόβαθρο (φόντο) (Baskar et al., 2023). Ακριβώς γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που βασίζονται συνήθως σε συνδυασμό χαρακτηριστικών της εικόνας όπως είναι το χρώμα, η υφή κ.λπ. και επιπροσθέτως η κίνηση εάν εξετάζεται κάποιο βίντεο αντί για εικόνα

(Solomon & Breckon, 2011).

- Το χρώμα είναι σε ορισμένες περιπτώσεις, ο απλούστερος και πιο προφανής τρόπος διάκρισης μεταξύ αντικειμένων και συνεπώς τα αντικείμενα που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο χρώμα, δηλαδή περιορίζονται σε μια ορισμένη περιοχή ενός χρωματικού χώρου, μπορούν να διαχωριστούν από το φόντο (χρήση σε region-based).
- Η υφή είναι μια περισσότερο αφηρημένη έννοια που συμφωνεί με τις έννοιες «τραχύ» και «λείο», και άρα αναφέρεται στην «τυπική» χωρική διακύμανση σε ένταση ή χρωματικές τιμές της εικόνας σε μια ορισμένη χωρική κλίμακα (χρήση σε edge-based).

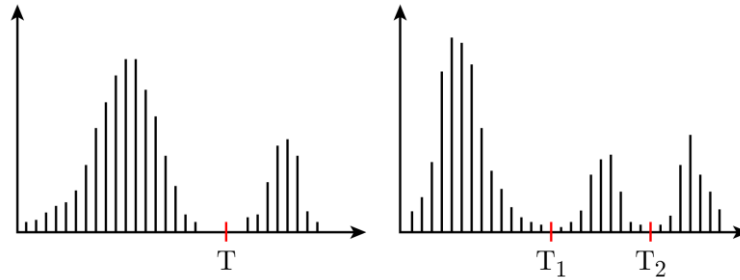
Οι τεχνικές που εφαρμόζονται για τη μέθοδο της κατάτμησης είναι αρκετές και απαντώνται στις κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω ή στο συνδυασμό αυτών, με τις πιο χρησιμοποιούμενες ωστόσο να είναι τεχνική: α) κατωφλίωσης (thresholding), β) ιστογράμματος (histogram-based), γ) ακμών (edge-based), δ) περιοχής (region based), ε) συστάδων (clustering-based), στ) μορφολογικών μετασχηματισμών (morphological transforms) και ζ) υφής (texture-based). Από τις παραπάνω αναφερθείσες μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τεχνικές που βασίζονται στην κατωφλίωση.

Η βασική ιδέα της κατωφλίωσης είναι πολύ απλή αφού επιλέγοντας μια κατάλληλη τιμή κατωφλιού  $T$ , η εικόνα από το επίπεδο του γκρι (προϋπόθεση η μετατροπή σε τόνους του γκρι της εικόνας RGB) μπορεί να μετατραπεί πολύ απλά σε δυαδική εικόνα. Το πλεονέκτημα αυτής της μετατροπής είναι ότι μειώνεται η πολυπλοκότητα των δεδομένων και απλοποιείται η διαδικασία αναγνώρισης και ταξινόμησης, καθώς στην εικόνα εξόδου υπάρχουν πλέον τιμές μονάχα 0 (τιμές κάτω από το κατώφλι και με μαύρο χρώμα) και 1 (τιμές πάνω από το κατώφλι και με λευκό χρώμα) (Al-Amri & Kalyankar, 2010). Η τεχνική του κατωφλιού μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (5)$$

όπου  $T$  είναι η τιμή του κατωφλιού,  $x, y$  είναι οι συντεταγμένες του σημείου της τιμής κατωφλιού και  $p(x, y), f(x, y)$  είναι τα σημεία των εικονοστοιχείων της εικόνας στο επίπεδο του γκρι. Στο Σχήμα 19, γίνεται αντιληπτή η χρήση του κατωφλιού σε ένα ιστόγραμμα, ενώ επιπλέον διευκρινίζεται πως δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στο πόσα κατώφλια θα χρησιμοποιηθούν σε μια ανάλυση.





Σχήμα 19 - Αναπαράσταση Ιστογράμματος εικόνας με χρήση ενός κατωφλιού (αριστερά) και πολλαπλών (δεξιά)  
Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

Έτσι, μια κατωφλιωμένη, δυαδική πλέον, εικόνα  $g(x,y)$  μπορεί να οριστεί από τις ακόλουθες εξισώσεις (6,7):

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{εάν } f(x,y) > T \\ 0 & \text{εάν } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (6)$$

$$g(x,y) = \begin{cases} a & \text{εάν } f(x,y) > T_2 \\ b & \text{εάν } T_1 < f(x,y) \leq T_2 \\ c & \text{εάν } f(x,y) \leq T_1 \end{cases} \quad (7)$$

Σχετικά με τις υπό-τεχνικές της κατωφλίωσης, αυτές διακρίνονται επίσης σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις αυτοματοποιημένες και τις μη-αυτοματοποιημένες. Η μη-αυτοματοποιημένη κατωφλίωση περιλαμβάνει τη χειροκίνητη επιλογή μιας τιμής κατωφλίου με βάση την εμπειρία/γνώση ή την οπτική επιθεώρηση της εικόνας. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι χρονοβόρα και υποκειμενική, αλλά μπορεί να είναι χρήσιμη για εικόνες με απλές δομές και σαφείς κατανομές. Παραδείγματα μη-αυτοματοποιημένης κατωφλίωσης είναι η χειροκίνητη επιλογή κατωφλίου (manual thresholding) και η επιλογή σταθερού κατωφλίου (fixed thresholding).

Από την άλλη πλευρά, η αυτοματοποιημένη κατωφλίωση καθορίζει την τιμή κατωφλίου με βάση τα χαρακτηριστικά της ίδιας της εικόνας. Αυτές οι τεχνικές είναι γενικά ταχύτερες και λιγότερο υποκειμενικές από τις μη αυτόματες μεθόδους και μπορούν να είναι χρήσιμες για την επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων ή εικόνων με πολύπλοκες δομές. Αυτές με την σειρά τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε δύο κύριους τύπους: την καθολική (global) και την τοπική (local) κατωφλίωση. Η καθολική κατωφλίωση περιλαμβάνει την επιλογή μιας ενιαίας τιμής κατωφλίου για ολόκληρη την εικόνα, ενώ η τοπική κατωφλίωση περιλαμβάνει την επιλογή μιας τιμής κατωφλίου για κάθε εικονοστοιχείο με βάση την τοπική κατανομή της έντασης γύρω από το συγκεκριμένο εικονοστοιχείο.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι αυτόματης κατωφλίωσης, ο καθένας με

τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία του, με την επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής να εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά των εικόνων που υποβάλλονται σε επεξεργασία. Ορισμένα παραδείγματα κατωφλίωσης, είναι: α) Καθολικής: μέθοδος Otsu, μέθοδος Kapur, μέθοδος μέγιστης εντροπίας (entropy) και Τοπικής: μέθοδος προσαρμογής (adaptive) που συνοψίζει την έννοια της τοπικής κατωφλίωσης, μέθοδος Otsu, μέθοδος Sauvola, μέθοδος Niblack.

### 2.5.3 Ανίχνευση και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών

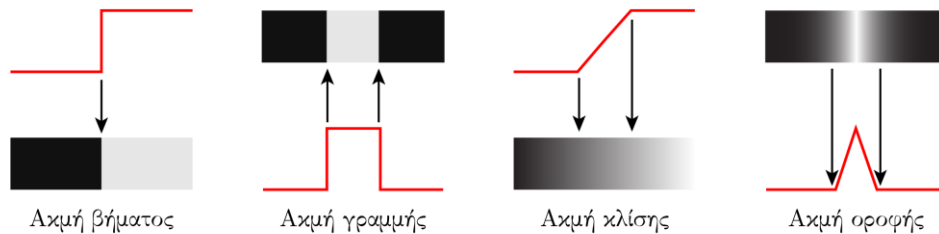
Ακόμη μια κατηγορία μεθόδων που χρησιμοποιείται πολύ στην ανάλυση και επεξεργασία εικόνας είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature extraction) ή όπως αλλιώς συναντάται η ανίχνευση χαρακτηριστικών (feature detection). Σε μια εικόνα, ορισμένα χαρακτηριστικά είναι φυσικά, με την έννοια ότι αυτά ορίζονται από την οπτική εμφάνιση μιας εικόνας, ενώ άλλα, τα λεγόμενα τεχνητά χαρακτηριστικά προκύπτουν από συγκεκριμένες χειρισμούς/διεργασίες μιας εικόνας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την κατάτμηση και ειδικότερα με τη μέθοδο των ακμών/ορίων, τα χαρακτηριστικά της εικόνας είναι μείζονος σημασίας για την απομόνωση των περιοχών κοινών ιδιοτήτων και την επακόλουθη ταυτοποίηση ή επισήμανση των περιοχών αυτών. Βιβλιογραφικά πολλές φορές υπάρχει μια σύγχυση των δύο μεθόδων καθώς διαφαίνεται μια επικάλυψη στις έννοιες και στην προσέγγιση, όμως η διαφορά μεταξύ κατωφλίωσης και εξαγωγής χαρακτηριστικών, έγκειται στο ότι στη δεύτερη αναζητούνται στην εικόνα πολύ συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως ακμές, γωνίες, σχήματα ή μοτίβα με αποτέλεσμα να μην γίνεται τμηματοποίηση όλων των αντικειμένων της εικόνας (Gonzalez & Woods, 2018). Η εξαγωγή χαρακτηριστικών ακριβώς για το λόγο που αναφέρθηκε μπορεί να θεωρηθεί και ως μια λειτουργία «υψηλότερου επιπέδου» καθώς είτε γίνεται μετά την κατάτμηση ως το επόμενο συμπληρωματικό βήμα είτε απευθείας χωρίς να προηγηθεί τεχνική κατάτμησης.

Πρακτικά αυτό που κάνει η εν λόγω μέθοδος είναι να ανιχνεύσει χαρακτηριστικά της εικόνας, να τα απομονώσει και να τα εξάγει με δυνατότητα ποσοτικοποίησης τους. Οι τεχνικές της μεθόδου υποδιαιρούνται συνήθως βάσει της εφαρμοσιμότητάς τους στα όρια της εικόνας, σε περιοχές της εικόνας ή και σε ολόκληρη την εικόνα. Θεωρώντας τις ρωγμές σε μια εικόνα ως ένα ειδικό χαρακτηριστικό που πρέπει να εξαχθεί, τότε η χρήση αλγόριθμών ανίχνευσης ακμών είναι μια αποτελεσματική διαδικασία που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος.

Σύμφωνα με τους Gonzalez and Woods (2018), σε μια εικόνα κλίμακας του γκρι

μπορεί να υπάρχουν ασυνέχειες ή τοπικές απότομες αλλαγές μεταξύ δυο διαφορετικών γειτονικών περιοχών, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση ακμών. Οι ασυνέχειες αυτές περιγράφονται ως 4 κατηγορίες κατά Baskar et al. (2023): α) ακμή βήματος (step edge), β) ακμή γραμμής (line edge), γ) ακμή κλίσης (ramp edge) και δ) ακμή οροφής (roof edge).



Σχήμα 20 - Τύποι ακμών Πηγή: (Pepe et al., 2018)

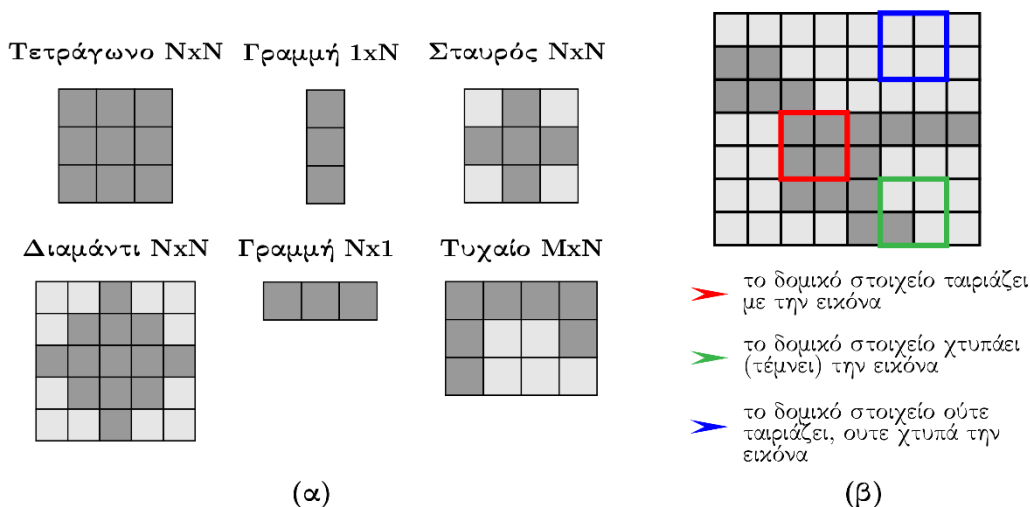
Παρά την εννοιολογική απλότητα (Solomon & Breckon, 2011), η ανίχνευση ακμών είναι μια δύσκολη διαδικασία που προσεγγίζεται με τη χρήση των παραγώγων 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης, οι οποίες και ορίζονται ως πεπερασμένες διαφορές (Gonzalez & Woods, 2018). Οι 1<sup>ης</sup> τάξης παράγωγοι χρησιμοποιούν την κλίση (gradient) μιας εικόνας για την ανίχνευση ακμών, δηλαδή η κλίση είναι ένα διάνυσμα που δείχνει προς την κατεύθυνση του μέγιστου ρυθμού μεταβολής της έντασης στην εικόνα. Με άλλα λόγια, δείχνει πόσο γρήγορα αλλάζει η ένταση μιας εικόνας από ένα εικονοστοιχείο προς τα γειτονικά του. Παραδείγματα αλγορίθμων αποτελούν τα φίλτρα ή τελεστές Sobel, Prewitt, Roberts, Scharr, Canny.

Οι 2<sup>ης</sup> τάξης παράγωγοι χρησιμοποιούν τη Λαπλασιανή μιας εικόνας για την ανίχνευση ακμών. Η Λαπλασιανή είναι ένας μαθηματικός τελεστής που υπολογίζει τη δεύτερη παράγωγο μιας εικόνας μέσω της συνέλιξης με πίνακα 3x3 ή 5x5 και που όμως δεν εντοπίζει μονάχα τα εικονοστοιχεία των ακμών αλλά ταυτόχρονα ενισχύει το θόρυβο. Τις περισσότερες φορές υπάρχει συνδυασμός αλγορίθμων 2<sup>ης</sup> μαζί με 1<sup>ης</sup> τάξης ή με άλλες διεργασίες. Παραδείγματα αλγορίθμων είναι το Λαπλασιανό Φίλτρο του Gauss (Laplacian of Gaussian - LoG), το Φίλτρο Διαφοράς του Γκαουσιανού (Difference of Gaussian - DoG), ο Ανιχνευτής ακμών Marr-Hildreth, το Φίλτρο Canny, ο Ανιχνευτής μηδενικής διασταύρωσης (Zero crossing detector) κ.λπ. Η παρούσα διπλωματική δεν θα μελετήσει τις εν λόγω τεχνικές που ανήκουν συντριπτικά στο πεδίο της συχνότητας, παρόλο που βιβλιογραφικά έχουν μελετηθεί εκτενώς, καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μελέτη στο χωρικό πεδίο είναι πιο άμεση και μπορεί να αποδώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

### 2.5.4 Μορφολογική Επεξεργασία

Η μορφολογία είναι ένας κλάδος της βιολογίας που ασχολείται με τη μορφή και τη δομή των ζώων και των φυτών. Ομοίως, η μαθηματική μορφολογία χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την εξαγωγή συστατικών στοιχείων της εικόνας που είναι χρήσιμα στην αναπαράσταση και περιγραφή του σχήματος μιας περιοχής (Baskar et al., 2023; Shih, 2009). Ο τομέας της μαθηματικής μορφολογίας συνεισφέρει ένα ευρύ φάσμα τελεστών στην επεξεργασία εικόνας και οι τελεστές αυτοί βασίζονται σε μερικές απλές μαθηματικές έννοιες από τη θεωρία συνόλων. Σκοπός τους είναι σε μια εικόνα να εντοπιστούν όρια, σκελετοί, κυρτά και μη κυρτά περιβλήματα κ.λπ. χαρακτηριστικά.

Η μαθηματική μορφολογία παρέχει μη-γραμμικές (non-linear) και με απώλειες (lossy) θεωρίες για την επεξεργασία μοτίβων σε μια εικόνα, με τους ερευνητές να έχουν αναπτύξει πολυάριθμες εξελιγμένες και αποτελεσματικές μορφολογικές αρχιτεκτονικές, αλγόριθμους και εφαρμογές. Βασική αρχή τους είναι η εξέταση μιας εικόνας με ένα μικρό σχήμα ή πρότυπο που ονομάζεται δομικό στοιχείο (structuring element) (Dumka et al., 2020). Τα δομικά στοιχεία δημιουργούνται σε διάφορα σχήματα (Σχήμα 21) αναλόγως με τα σχήματα των μοτίβων της εικόνας εισόδου που είναι επιθυμητό να «ευνοηθούν» κατά την επεξεργασία.



Σχήμα 21 – (α) Παραδείγματα δομικών στοιχείων Πηγή: *Ιδία Επεξεργασία*, (β) Παράδειγμα διαδικασίας μορφολογικής επεξεργασίας Πηγή: *Ιδία Επεξεργασία*

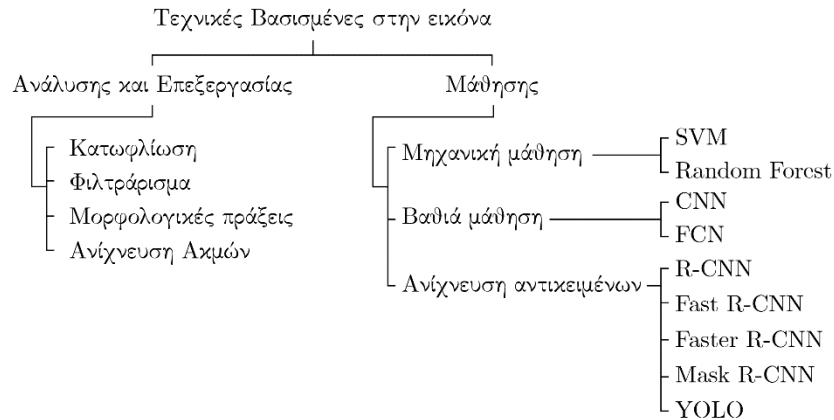
Στην πράξη, ένα σημείο του δομικού στοιχείου (συνήθως το κεντρικό) ονομάζεται «αρχή» (origin) και με βάση αυτό γίνονται οι κινήσεις στην εικόνα. Ουσιαστικά δηλαδή η λειτουργία του είναι να τοποθετηθεί σε όλες τις πιθανές θέσεις της εικόνας και να συγκριθεί με την αντίστοιχη γειτονιά των εικονοστοιχείων, το οποίο με απλά λόγια ερμηνεύεται μέσω των ρημάτων «χτυπά», «τέμνει» ή «χωράει» (Dumka et al., 2020).

Μαθηματικά αυτό ερμηνεύεται με τις συνήθεις έννοιες της θεωρίας συνόλων, όπως η ένωση, η τομή, η διαφορά και η συμμετρική διαφορά. Επιπλέον επειδή η μαθηματική μορφολογία τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται σε δυαδικές εικόνες, παρόλο που μπορεί να εφαρμοστεί και σε εικόνες της κλίμακας του γκρι ή σε έγχρωμες εικόνες, γίνεται αντιληπτό πως επικρατούν οι τιμές αλήθειας, δηλαδή αληθές (τιμή 1) και ψευδές (τιμή 0). Αυτή η σχέση περιλαμβάνει όλες τις πράξεις των λογικών τελεστών: α) Και (συνδυασμός ή σύζευξη), β) Ή (διάζευξη) και γ) Όχι (άρνηση), όπου στα μαθηματικά είναι γνωστοί και ως Άλγεβρα Μπουλ (Boolean Algebra).

Η διαδικασία επομένως της σύγκρισης εικόνας και δομικού στοιχείου, δημιουργεί μια νέα δυαδική εικόνα στην οποία το εικονοστοιχείο έχει μη μηδενική τιμή μόνο εάν ο έλεγχος είναι επιτυχής στην συγκεκριμένη θέση της εικόνας εισόδου (Baskar et al., 2023; Shih, 2009). Οι πιο χαρακτηριστικές μορφολογικές πράξεις επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις εικόνων είναι: α) Μορφολογική Συστολή (Morphological Erosion), β) Μορφολογική Διαστολή (Morphological Dilation), γ) Μορφολογικό Άνοιγμα (Morphological Opening), δ) Μορφολογικό Κλείσιμο (Morphological Closing) και ε) Μετασχηματισμός Χτυπήματος ή Αστοχίας (Hit-or-Miss Transform).

### 2.5.5 Υφιστάμενη Έρευνα Ανίχνευσης Ρωγμών

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αναρίθμητες έρευνες σχετικά με την ανίχνευση ρωγμών στο πλαίσιο της παρακολούθησης των υποδομών. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι πολλαπλές και υπό το πρίσμα διαφορετικών συνθηκών αφού οι μηχανικοί καλούνται να εντοπίσουν ρωγμές που συναντώνται στο σκυρόδεμα και άρα σε υποδομές όπως οι γέφυρες, τα λιμάνια, τα αεροδρόμια, οι σήραγγες (tunnel) κ.λπ. Σε πρόσφατη έρευνα τους οι Gupta and Dixit (2022) συμπέραναν πως για την ανίχνευση ρωγμών υπάρχουν δύο (2) πιθανοί «οδοί» μεθοδολογίας: α) οι τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας της εικόνας, στις οποίες θα βασιστεί και η μεθοδολογία όπως έχει ήδη αναφερθεί και β) οι τεχνικές που βασίζονται στη μάθηση (deep and machine learning).



Σχήμα 22 - Ταξινόμηση των τεχνικών ανίχνευσης ρωγμών Πηγή: (Gupta & Dixit, 2022)

Χάρη στις δυνατότητες της τεχνολογίας όλες οι παραπάνω τεχνικές (Σχήμα 22) καταλήγουν να είναι αυτόματες (automatic) ή ημιαυτόματες (semiautomatic) διαδικασίες. Αποκλειστικά για τις τεχνικές ανάλυσης αυτό που έχει παρατηρηθεί είναι πως οι μέθοδοι που στηρίζονται στα ιστογράμματα είναι ιδανικές για την προ-επεξεργασία μιας εικόνας, όπως επίσης η μαθηματική μορφολογία μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αποδώσει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα ιστογράμματα (Gupta & Dixit, 2022). Για τις μεθόδους που βασίζονται στα φίλτρα ωστόσο δεν φαίνεται να ισχύει το ίδιο, διότι δεν αποτελούν προσαρμοστικές τεχνικές αφού δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν παραλλαγές μήκους και πλάτους ρωγμών και σίγουρα απαιτείται ο συνδυασμός τους με διαφορετικές τεχνικές (Gupta & Dixit, 2022).

Εξίσου σημαντική έρευνα είναι αυτή των Munawar et al. (2021), όπου αναλύοντας, βάσει χαρακτηριστικών, απόδοσης, λεπτομερειών σχετικά με τα δεδομένα και το πεδίο εφαρμογής, τη διαθέσιμη βιβλιογραφία για την ανίχνευση ρωγμών κατέληξαν πως μονάχα στο 33% συγκαταλέγονται έρευνες με χρήση αποκλειστικά τεχνικών ανάλυσης. Από τις έρευνες αυτές που εξετάστηκαν πρόκυψε επίσης πως η ανάλυση εικόνας έχει τρία (3) σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των τεχνικών μάθησης. Αυτά είναι: α) η ταχύτητα των αναλύσεων, β) δεν απαιτούν τόσο σύνθετα μοντέλα και γ) μπορούν να είναι όντως αποτελεσματικές στην ανίχνευση ρωγμών. Αντίστοιχα για τα μειονεκτήματα θεωρούν πως: α) μπορεί να μην παρέχουν την υψηλότερη ακρίβεια, β) απαιτούν παραμετροποίηση και χειροκίνητη ρύθμιση και άρα κρίνονται ως ημιαυτόματες διαδικασίες.

Μια κοινή διατύπωση σχετικά με τα μειονεκτήματα της ανάλυσης εικόνας είναι αυτή που επισημαίνουν οι Jofré-Briceño et al. (2021) και οι Gupta and Dixit (2022) όπου οι εικόνες προς ανάλυση μπορεί να έχουν ληφθεί σε περιοχή με χαμηλό (νύχτα) ή ανομοιόμορφο (σύννεφα) φωτισμό, να περιέχουν κάποιες περιττές λεπτομέρειες ή αντικείμενα ή σκιές και γενικότερα το περιβάλλον να είναι αρκετά θορυβώδες. Σε μια

τέτοια περίπτωση δυσχεραίνεται κατά πολύ η επιλογή ενός κατάλληλου κατωφλίου κατάτμησης, γι' αυτό και διάφορες προσεγγίσεις προ-επεξεργασίας χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της εικόνας προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή.

Στην έρευνα τους οι Fujita et al. (2006) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία αποτελούμενη από τρία (3) βήματα: 1) προ-επεξεργασία αφαίρεσης μιας εξομαλυμένης εικόνας από την αρχική θορυβώδη εικόνα, 2) προ-επεξεργασία έμφασης γραμμών/ακμών με χρήση του πίνακα Hessian και 3) κατωφλίωση με την επιλογή κατάλληλης τιμής για διάκριση μεταξύ ρωγμών και υποβάθρου στην εικόνα.

Στην έρευνα των H. Kim et al. (2015), αναπτύσσεται μια μεθοδολογία τεσσάρων (4) βημάτων ως εξής: 1) προ-επεξεργασία αφαίρεσης μιας εξομαλυμένης εικόνας με διάμεσο φίλτρο από την αρχική εικόνα για την ενίσχυση της αντίθεσης των ρωγμών και της μείωσης του θορύβου, 2) κατάτμηση της εικόνας με τη μέθοδο τοπικής κατωφλίωσης Sauvola ώστε να προκύψει δυαδική εικόνα όπου αντιπροσωπεύονται με λευκά εικονοστοιχεία οι περιοχές με ρωγμές και με μαύρο οι υπόλοιπες, 3) αναθεώρηση της εικόνας με χρήση κανόνα εκκεντρότητας και σύνδεσης των εικονοστοιχείων για την αφαίρεση μικρών απομονωμένων περιοχών και τη σύνδεση σπασμένων τμημάτων ρωγμών και 4) αποσύνθεση (decomposition) ρωγμών σε μικρότερα μεμονωμένα τμήματα και υπολογισμών πλάτους με βάση τις μετρήσεις απόστασης που λαμβάνονται από έναν αισθητήρα υπερήχων για τη μετατόπιση που είναι τοποθετημένος στο UAV. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω μετρήσεων από το πεδίο δηλαδή σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών για το πλάτος.

Η περίπτωση των Talab et al. (2016), είναι λίγο διαφορετική καθώς χρησιμοποιούν μια μεθοδολογία τριών (3) σταδίων που διαφοροποιείται μονάχα στο στάδιο της προ-επεξεργασίας αφού μετατρέπουν πρώτα την εικόνα σε κλίμακα του γκρι και στη συνέχεια ανιχνεύουν τις ακμές με το φίλτρο Sobel και ύστερα δοκιμάζουν τη μέθοδο Otsu για κατωφλίωση. Στην ίδια λογική βασίζονται και οι J. W. Kim et al. (2015), με τη μόνη διαφορά πως χρησιμοποιούν το χαμηλοπερατό φίλτρο του Gauss (Gaussian low pass filter) για αύξηση της ευκρίνειας και στη συνέχεια βελτιώνουν την εικόνα με την τεχνική bottom hat η οποία ενισχύει τις μαύρες λεπτομέρειες σε λευκό φόντο. Τέλος, χρησιμοποιούν κατώφλια με τη μέθοδο Otsu, ώστε να προσδιορίσουν βασικά μεγέθη των ρωγμών, αφού πρώτα τις ομαδοποιήσουν βάσει χωρικών χαρακτηριστικών (απόσταση, σχέσεις με γειτονικά εικονοστοιχεία) που διαφαίνονται πλέον μετέπειτα στην ανάλυση.

Οι Chen et al. (2022) χρησιμοποιούν και αυτοί μια μεθοδολογία 3 βημάτων, λίγο πιο εξελιγμένη και αποτελεσματική, όπου: 1) για το στάδιο της προ-επεξεργασίας πραγματοποιείται μετατροπή της εικόνας σε κλίμακα του γκρι, ισοστάθμιση

ιστογράμματος, και φιλτράρισμα με φίλτρο μέσου όρου για τη μείωση του θορύβου, 2) για το στάδιο της κατάτμησης χρησιμοποιείται η μέθοδος Otsu για την καθολική και η μέθοδος Niblack για την τοπική κατωφλίωση με χρήση ενός δομικού στοιχείου που σαρώνει την εικόνα από επάνω αριστερά προς κάτω δεξιά και 3) για το στάδιο της εξαγωγής της ρωγμής ξαναχρησιμοποιείται η μέθοδος Niblack για νέα τοπική κατωφλίωση από όπου προκύπτει και η τελική δυαδική εικόνα ύστερα από κάποιες μορφολογικές πράξεις για αφαίρεση μικρών περιοχών θορύβου. Τέλος γίνεται υπολογισμός της ακρίβειας του αποτελέσματος ή αλλιώς επικύρωσης βάσει των αποτελεσμάτων χειροκίνητης καταγραφής από οπτική επισκόπηση. Πρακτικά, η επικύρωση υπολογίζεται με βάση τον πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) και τα παραγόμενα μετρικά στοιχεία (metrics) όπως η ακρίβεια (accuracy) και η ανάκληση (recall).

Πολύ σημαντικές έρευνες για το πεδίο της ανίχνευσης ρωγμών έχουν πραγματοποιήσει οι Wang and Huang (2010) και οι Dorafshan et al. (2019), οι οποίοι υλοποιώντας συγκριτικές αξιολογήσεις για τις συνήθεις τεχνικές ανάλυσης εικόνων κατέληξαν σε βαρυσήμαντα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Οι μεν πρώτοι στην έρευνα τους εξετάζουν κάποιες γενικές κατηγορίες μεθόδων ανάλυσης που ουσιαστικά δείχνουν την αλληλουχία των διεργασιών και καταλήγουν στο συμπέρασμα πως ο ολοκληρωμένος αλγόριθμος (integrated algorithm) που συνδυάζει προ-επεξεργασία και κατάτμηση με κατωφλίωση, όπως επίσης και η μαθηματική μορφολογία που συνδυάζει τεχνικές βελτίωσης, κατωφλίωσης και αφαίρεσης θορύβων, είναι ιδανικές, πιο αυτοματοποιημένες και με λιγότερα υποκειμενικά κριτήρια. Η δεύτερη έρευνα εστιάζει περισσότερο στις τεχνικές ανίχνευσης ακμών με φίλτρα του χωρικού πεδίου (spatial domain) και πεδίου συχνότητας (frequency domain), για να καταλήξει πως από τη σύγκριση των Roberts, Prewitt, Sobel, Laplacian of Gaussian (LoG), Butterworth και Gaussian, το LoG αποδείχθηκε η ταχύτερη, ορθότερη και ακριβέστερη μέθοδος για την ανίχνευση ρωγμών.

Καταλήγοντας, αυτό που παρατηρείται είναι πως για την παρακολούθηση των υποδομών μεγάλης κλίμακας όπως είναι τα λιμάνια, δεν υπάρχει κάποια έρευνα που να χρησιμοποιεί τη γεωχωρική πληροφορία μετά από το στάδιο της Φωτογραμμετρίας. Όπως επισημαίνουν οι Collins and Blin (2018) υπάρχει μια αυξημένη συνειδητοποίηση των ερευνητών για μεταστροφή από τις μακροσκελείς έγγραφες εκθέσεις και τα υπολογιστικά φύλλα ή τις απλές βάσεις δεδομένων που υλοποιούνται κατά τις επιθεωρήσεις, σε κάτι πιο σύνθετο που μπορεί και πρέπει να περιλαμβάνει γεωχωρική πληροφορία (geospatial information), ώστε η διαδικασία να καταστεί πιο απλή, λιγότερο χρονοβόρα και να μπορέσει να αξιοποιηθεί και μελλοντικά σε περιπτώσεις σύγκρισης της κατάστασης, δηλαδή των χωροχρονικών μεταβολών των ρωγμών, που είναι και το ζητούμενο.



Διαπιστώνοντας επομένως την μη αξιοποίηση της γεωχωρικής πληροφορίας, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να συνδυάσει σε μια ενιαία μεθοδολογία την Ανάλυση Εικόνας και την Γεωχωρική Ανάλυση, μέσω της χρήσης πρακτικών που βασίζονται σε γεωαναφερμένες (georeferenced) εικόνες για κάθε υπολογιστικό στάδιο.

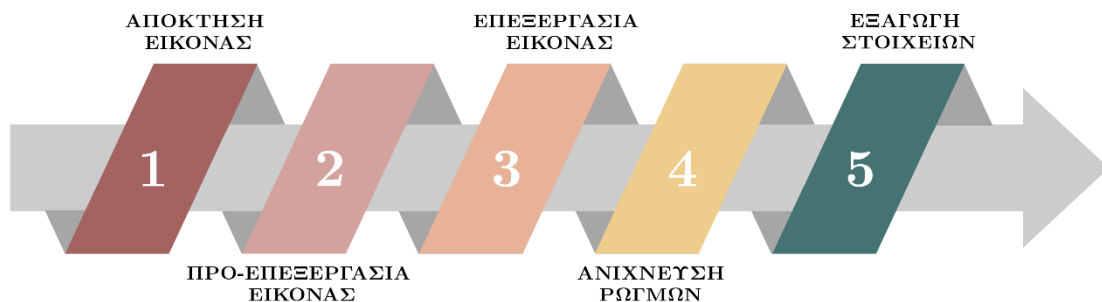
Πρακτικά, η Γεωχωρική Ανάλυση είναι πολύ σημαντική σε μια έρευνα ανίχνευσης ρωγμών συνυπολογίζοντας πως όλα τα δεδομένα προβάλλονται σε ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας επιτρέποντας την ακριβέστατη χαρτογράφηση, την αξιολόγηση των χωρικών μοτίβων των ρωγμών, την κατανόηση της αιτίας εμφάνισης τους αλλά και του μηχανισμού διάδοσής τους κ.λπ. (Fakhri et al., 2021). Επιπλέον, σε ένα τέτοιο μεθοδολογικό πλαίσιο είναι εφικτό να μοντελοποιηθούν φαινόμενα του πραγματικού κόσμου που θα προβλέπουν τη συμπεριφορά των ρωγμών μελλοντικά και άρα θα αξιοποιούνται για στρατηγική και σχεδιασμό σεναρίων και λήψη αποφάσεων, ενώ ταυτόχρονα η διεξαγωγή χωρικής στατιστικής με διεργασίες ποσοτικοποίησης των χωρικών προτύπων και μέτρησης της χωρικής τους αυτοσυσχέτισης, είναι άκρως βοηθητικές στην εξαγωγή συμπερασμάτων (Breunig et al., 2020).



# 3

## Μεθοδολογία

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που θα είναι ικανό να ανιχνεύει ρωγμές σε γεωαναφερμένες (georeferencing) εικόνες πρέπει να υπάρχουν δυο άξονες επεξεργασίας. Ο πρώτος σχετίζεται με την απόκτηση των δεδομένων και περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες που είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν πριν, κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την πτήση του UAV στο προς εξέταση τμήμα ενός λιμένα, έτσι ώστε να παραχθούν τα πρωτογενή δεδομένα (Ορθοφωτοχάρτες) που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας. Ο δεύτερος άξονας έχει να κάνει αποκλειστικά με την προ-επεξεργασία και επεξεργασία των διαθέσιμων Ορθοφωτοχαρτών με κατάλληλες τεχνικές Ανάλυσης Εικόνας.



Σχήμα 23 - Η Αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

### 3.1 Περιγραφή Διαδικασίας Απόκτησης Δεδομένων

#### 3.1.1 Επίγεια Προετοιμασία και Προγραμματισμός Πτήσης

Κατά τη φάση απόκτησης των δεδομένων, όπως γίνεται αντιληπτό πρωταρχικό μέλημα είναι η αναγνώριση της περιοχής μελέτης με τέτοιο τρόπο που θα συμβάλλει στον καθορισμό των παραμέτρων της πτήσης του UAV (ή των πτήσεων εάν απαιτούνται παραπάνω από μία). Αν και κάθε επιθεώρηση με UAV είναι μοναδική από τη φύση της όπως ισχυρίζονται οι Shakhathreh et al. (2019), εντούτοις υπάρχουν ορισμένα βήματα που είναι σταθερά, με πρώτο και αναγκαϊότατο τη δημιουργία ενός τοπογραφικού δικτύου σημείων μετρημένο από τυποποιημένες τεχνικές όπως GPS\GNSS και γεωδαιτικό σταθμό (Total Station) (Chiabrando et al., 2017). Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι καλά κατανομημένα στο χώρο καθώς μετέπειτα στη φάση επεξεργασίας των εικόνων από την πτήση θα χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία προσδιορισμού των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας (διαδικασία γεωαναφοράς).

Το δεύτερο βήμα είναι να καθοριστεί με ένα βέλτιστο τρόπο η πτήση του UAV, δηλαδή ποια διαδρομή θα ακολουθήσει ώστε να σαρώσει όλη την περιοχή ακόμη και τα πιο δυσπρόσιτα σημεία. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μέσω εμπορικών προγραμμάτων (Chiabrando et al., 2017) που προορίζονται για τέτοια χρήση ή και μέσω του λειτουργικού συστήματος με το οποίο επικοινωνεί το τηλεχειριστήριο με το UAV. Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού πτήσης, ο αλγόριθμος μπορεί να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους (Frazier & Singh, 2021; He et al., 2012) έως ότου ο χειριστής είναι ικανοποιημένος με το σχέδιο πτήσης και τα επικαλυπτόμενα (κατά μήκος και πλάτος) στερεοζεύγη εικόνων που θα δημιουργηθούν.

Σημαντική παράμετρος που πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της πτήσης είναι οι καιρικές συνθήκες καθώς το φως του ήλιου αλλά ιδίως φαινόμενα όπως η βροχόπτωση, οι πλευρικοί άνεμοι, η ομίχλη και τα σύννεφα μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα των εικόνων (Dandois et al., 2015; Pepe et al., 2018). Το ίδιο σημαντικό, και σε απόλυτη συσχέτιση με τα παραπάνω, είναι και ο καθορισμός της ταχύτητας του κλείστρου της κάμερας που υπάρχει στο UAV καθώς πρέπει να ικανοποιεί τις διάφορες συνθήκες φωτισμού, διότι εάν ο χρόνος έκθεσης (exposure time) είναι πολύ μικρός, οι εικόνες μπορεί να είναι πολύ σκοτεινές για να διακριθούν όλα τα βασικά χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος, αλλά και εάν είναι πολύ μεγάλος, οι εικόνες θα είναι θολές ή πολύ φωτεινές (Shakhathreh et al., 2019).

Τέλος, το παραγόμενο σχέδιο πτήσης, συμπληρωμένο με επιπλέον στοιχεία όπως το ύψος και η ταχύτητα, μεταφορτώνεται στον αυτόματο πιλότο του UAV και

χρησιμοποιώντας τις οδηγίες βρίσκει ρυθμούς ανόδου και προσαρμογές θέσης που επιτρέπουν στο UAV να ακολουθήσει τη σχεδιασμένη διαδρομή όσο το δυνατόν πιο πιστά (Shakhatreh et al., 2019). Αφού ολοκληρωθεί η πτήση, εξάγεται συνήθως ένα πλήρες αρχείο καταγραφής με πληροφορίες σχετικά με τις καταγεγραμμένες τρισδιάστατες τοποθετήσεις του UAV καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης, καθώς και πληροφορίες σχετικά με το πότε ενεργοποιήθηκε η κάμερα, δηλαδή πραγματοποιήθηκε λήψη (Shakhatreh et al., 2019). Οι πληροφορίες αυτές (log file) χρησιμοποιούνται αρχικά για την παροχή εκτιμήσεων για τις θέσεις του κέντρου της εικόνας και τους προσανατολισμούς, ενώ σε δεύτερο χρόνο αξιοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο φωτογραμμετρικό μοντέλο για την ανάκτηση των ακριβών θέσεων των σημείων (Whitehead & Hugenholtz, 2014).

### 3.1.2 Μέθοδος Φωτογραμμετρίας

Προκειμένου να αξιοποιηθούν όλες οι φωτογραφίες τις οποίες καταγράφει κατά την πτήση του ένα UAV και αποτελούν την image-based τεχνική απόκτησης δεδομένων έτσι ώστε να παραχθεί ένα πρότυπο ορθής αποτύπωσης, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί φωτογραμμετρική επεξεργασία. Η μέθοδος της φωτογραμμετρίας, της οποίας οι βασικές αρχές αναπτύχθηκαν στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα (Al-Ruzouq et al., 2023), ορίζεται ως εξής: «η τέχνη, επιστήμη, και τεχνολογία για την απόκτηση αξιόπιστης πληροφορίας σχετικά με φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον μέσα από διαδικασίες καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων αλλά και προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας» (Slama, 1980; Πατιάς, 1991).

Σε μια πιο σύγχρονη απόδοση του όρου, η φωτογραμμετρία είναι η τεχνική μέσω της οποίας δημιουργούνται τρισδιάστατα νέφη σημείων (3D point clouds) και ένα φωτορεαλιστικό δομικό μοντέλο βάσει εικόνων 2 διαστάσεων (2D) που συλλέγονται κατά την πτήση ενός UAV (Chelioti et al., 2023; Perry et al., 2020). Η καινοτομία που έφερε στο χώρο η UAV-based φωτογραμμετρία είναι σύμφωνα με την έρευνα του Eisenbeiß (2009) η ικανότητα της τηλεκατευθυνόμενης, ημιαυτόνομης ή και αυτόνομης, απουσίας πιλότου δηλαδή, καταγραφής με μέσα σε πραγματικό χρόνο και με εναλλακτικές λύσεις πολύ χαμηλού κόστους.

Στη φωτογραμμετρία, όπως επισημαίνουν οι Philpot and Philipson (2012) δύο είναι τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος απεικόνισης: α) η κλίμακα των εικόνων και β) η χωρική ανάλυση, δηλαδή η ικανότητα ενός οπτικού συστήματος να διαχωρίζει δύο διακριτά σημεία. Ειδικότερα, η κλίμακα της φωτογραφίας που απεικονίζει ένα αντικείμενο στο χώρο, όταν τα σημεία του βρίσκονται στο επίπεδο αναφοράς (Σχήμα 24), υπολογίζεται

από την Εξίσωση 8:

$$S = \frac{f}{H} \quad (8)$$

όπου:

S: η κλίμακα της φωτογραφίας

f: η εστιακή απόσταση

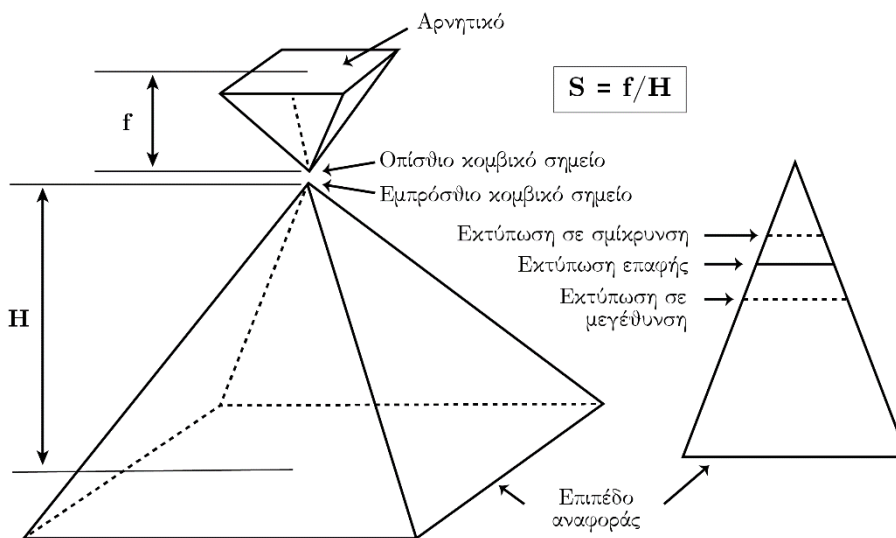
H: το υψόμετρο της κάμερας από το επίπεδο αναφοράς

Αντίστοιχα, στις περιπτώσεις όπου τα σημεία του αντικειμένου βρίσκονται άνωθεν ή κάτωθεν του επιπέδου αναφοράς (Σχήμα 25) η Εξίσωση 8 μετατρέπεται στην Εξίσωση 9:

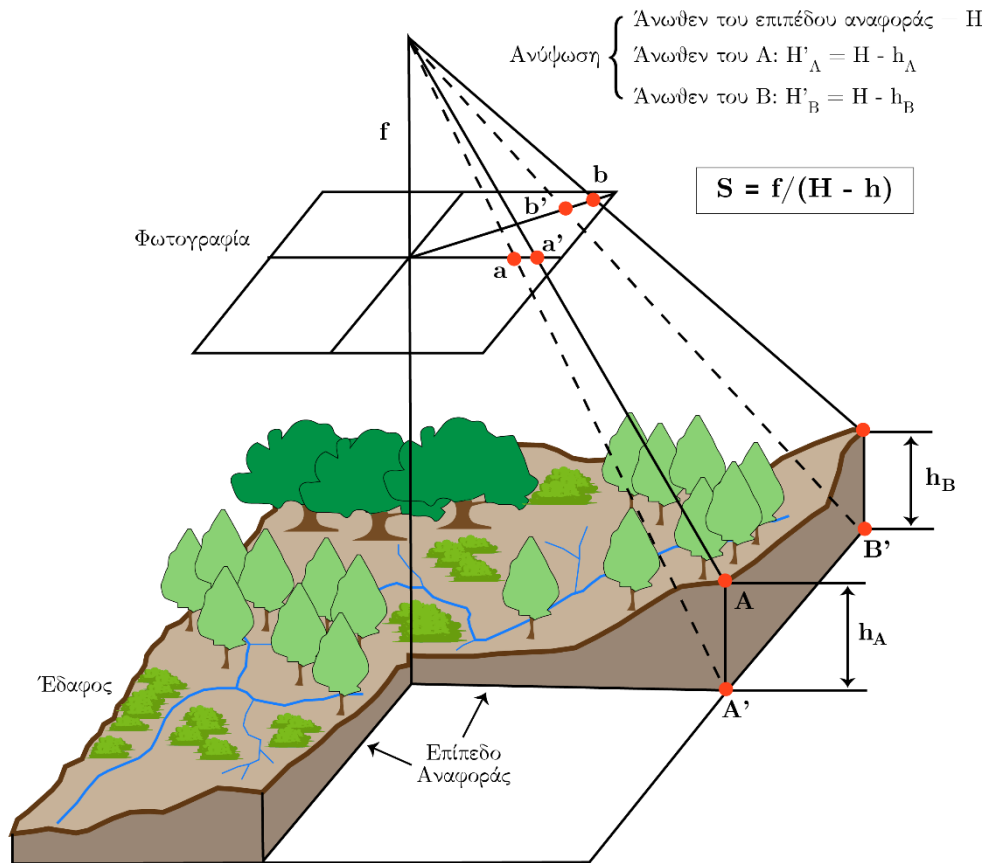
$$S = \frac{f}{H - h} \quad (9)$$

όπου:

h: το υψόμετρο του σημείου από το επίπεδο αναφοράς



Σχήμα 24 - Προσδιορισμός κλίμακας φωτογραφίας για αντικείμενο με σημεία στο επίπεδο αναφοράς Πηγή: (Philpot & Philipson, 2012)



Σχήμα 25 - Προσδιορισμός κλίμακας φωτογραφίας για σημεία εκτός επιπέδου αναφοράς Πηγή: (Philpot & Philipson, 2012)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη της υπό διερεύνηση περιοχής θα πρέπει να υπάρχει επικάλυψη στις φωτογραφίες που τραβάει το UAV κατά την πτήση του, τόσο κατά μήκος (μετωπική επικάλυψη) όσο και κατά πλάτος (εγκάρσια επικάλυψη) (Σχήμα 26). Οι Εξισώσεις 10 και 11 εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της κατά μήκος επικάλυψης και της κατά πλάτος επικάλυψης, αντίστοιχα.

$$O_{forward} = \left(1 - \frac{d_{forward}f}{H_w}\right) \times 100 \quad (10)$$

και

$$O_{side} = \left(1 - \frac{d_{side}f}{H_w}\right) \times 100 \quad (11)$$

όπου:

$O_{forward}$ : η μετωπική επικάλυψη (%)

$O_{side}$ : η εγκάρσια επικάλυψη (%)

$d_{\text{forward}}$ : η απόσταση μεταξύ των σημείων λήψης (m)

$d_{\text{side}}$ : η απόσταση μεταξύ των γραμμών πτήσης (m)

f: η εστιακή απόσταση (mm)

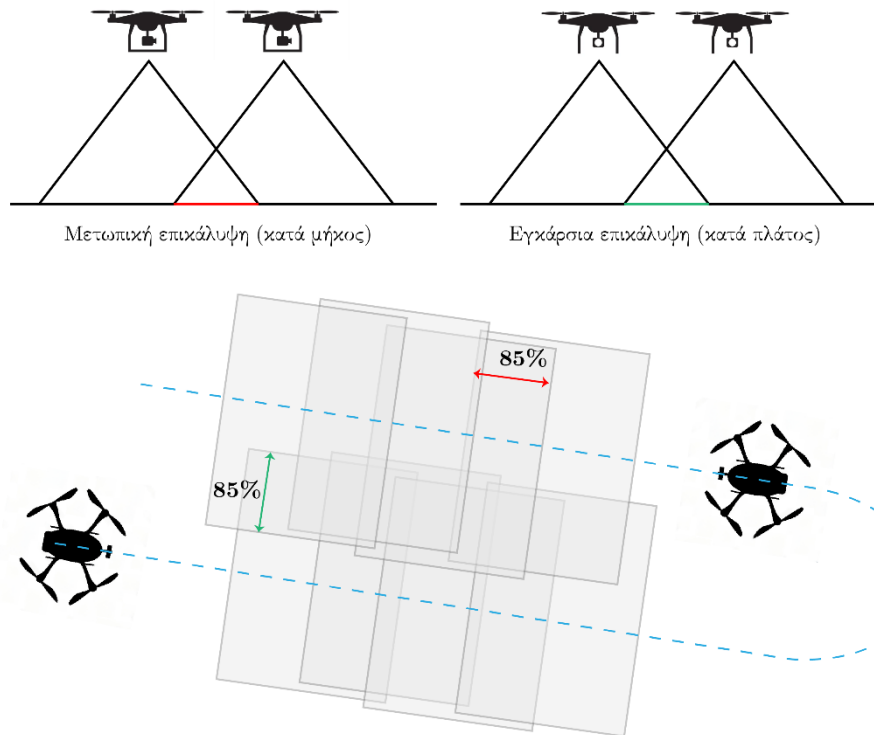
H: η απόσταση από την προβολή του κέντρου της κάμερας στο έδαφος (m)

w: το πλάτος του αισθητήρα (mm)

Η επικάλυψη είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό πτήσης, επειδή επηρεάζει τον αριθμό των εικόνων που λαμβάνονται, το χρόνο πτήσης και συνεπώς την κατανάλωση μπαταρίας. Σε μικρότερες επικαλύψεις εικόνων, απαιτείται μικρότερη διαδρομή για την κάλυψη της περιοχής, αλλά λαμβάνονται λιγότερες εικόνες. Από την άλλη πλευρά, οι μεγαλύτερες επικαλύψεις απαιτούν περισσότερο χρόνο πτήσης και έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση μπαταρίας του UAV.

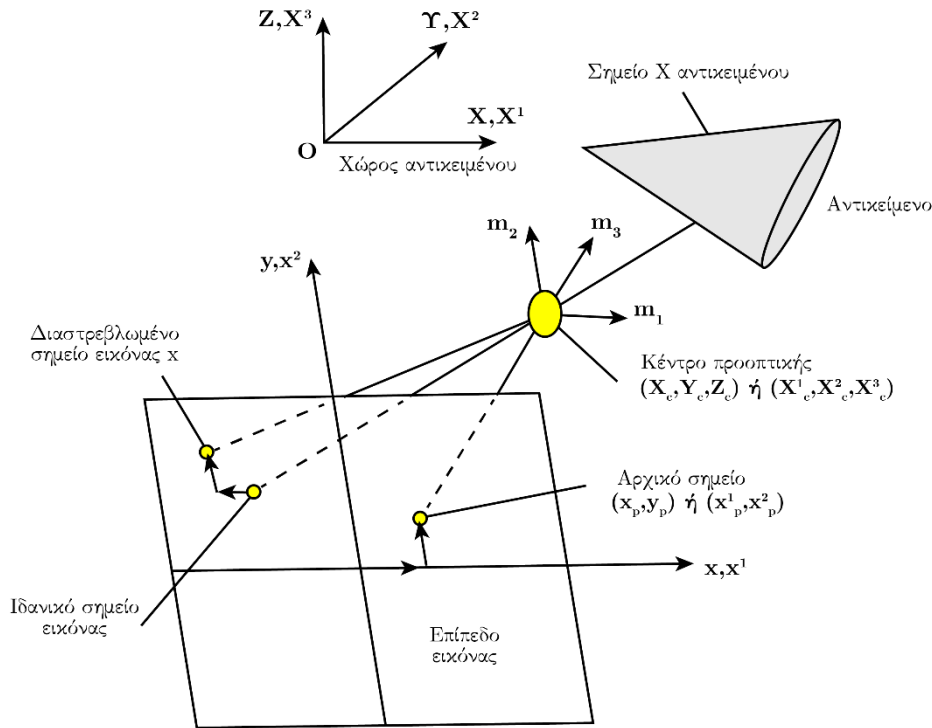
Σύμφωνα με τους Lopes Bento et al. (2022) οι μεγαλύτερες επικαλύψεις της τάξεως του 80%-90% οδηγούν μεν σε μικρότερα σφάλματα αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο κατά την πτήση και την επεξεργασία ενώ παράγουν σαφώς μεγαλύτερη ποσότητα εικόνων για τη δειγματοληπτούμενη περιοχή. Έτσι, στις περισσότερες των περιπτώσεων συνίσταται η μετωπική επικάλυψη να είναι της τάξεως του 80% ενώ η εγχάρσια εντός του εύρους 60%-80% (Mikhail et al., 2001). Σε γενικές περιπτώσεις όπου η μορφολογία της περιοχής το επιτρέπει μπορεί η ελάχιστη επικάλυψη να κυμανθεί σε ένα εύρος 20%-30% (Pepe et al., 2018), όμως σε ειδικές καταστάσεις όπου κυριαρχούν ομοιόμορφες επιφάνειες (π.χ. πυκνή βλάστηση, πεδιάδες όπου η γεωργική δραστηριότητα αναπτύσσεται ομοιόμορφα, χιόνι, άμμος, υδάτινες επιφάνειες, κ.λπ.) το ποσοστό αυξάνεται κατακόρυφα ξεπερνώντας και τις τυπικές τιμές (Mikhail et al., 2001) ώστε να υλοποιηθεί ο αεροτριγωνισμός με μεγαλύτερη αξιοπιστία.





Σχήμα 26 - Μετωπική και εγκάρσια επικάλυψη για τη λήψη φωτογραφιών κατά την πτήση του UAV Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Η συνθήκη της συγγραμικότητας είναι η σχέση εκείνη που συνδέει σημεία επάνω στην εικόνα (δισδιάστατος χώρος) με τα αντίστοιχα σημεία στην επιφάνεια του εδάφους (τρισδιάστατος χώρος) και είναι κατά συνέπεια μια από τις θεμελιώδεις εξισώσεις/σχέσεις στη Φωτογραμμετρία (Πατιάς, 1991). Προκειμένου να εξασφαλιστούν οι απαιτήσεις της Φωτογραμμετρίας και να παραχθεί ένας ορθοφωτοχάρτης είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση της κάμερας που είναι τοποθετημένη επάνω στο UAV. Βαθμονόμηση σύμφωνα με τον Πατιάς (1991) είναι η διαδικασία προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας. Στο Σχήμα 27 αποτυπώνεται η προβολή των συντεταγμένων (3 διαστάσεις:  $X, Y, Z$ ) ενός αντικειμένου στο χώρο σε συντεταγμένες στο επίπεδο (2 διαστάσεις:  $x, y$ ) της εικόνας.



Σχήμα 27 - Ο μετασχηματισμός από το επίγειο στο φωτογραφικό σύστημα συντεταγμένων Πηγή: (Liu et al., 2012)

Οι συγγραμμικές εξισώσεις που αποτυπώνουν την προβολή του τρισδιάστατου αντικειμένου σε δισδιάστατη εικόνα (Σχήμα 24) είναι οι εξής (Εξισώσεις 12 και 13):

$$x - x_p - \delta x = -c \frac{m_{11}(X - X_c) + m_{12}(Y - Y_c) + m_{13}(Z - Z_c)}{m_{31}(X - X_c) + m_{32}(Y - Y_c) + m_{33}(Z - Z_c)} \quad (12)$$

$$y - y_p - \delta y = -c \frac{m_{21}(X - X_c) + m_{22}(Y - Y_c) + m_{23}(Z - Z_c)}{m_{31}(X - X_c) + m_{32}(Y - Y_c) + m_{33}(Z - Z_c)} \quad (13)$$

όπου:

(x,y): το ζεύγος των συντεταγμένων σε ένα επίπεδο (δύο διαστάσεων)

( $x_p, y_p$ ): το ζεύγος των συντεταγμένων του αρχικού σημείου για την εφαρμογή της φωτογραμμετρίας

( $\delta_x, \delta_y$ ): η αναγωγή του ζεύγους συντεταγμένων από την «ιδανική» θέση του σημείου στο επίπεδο της εικόνας

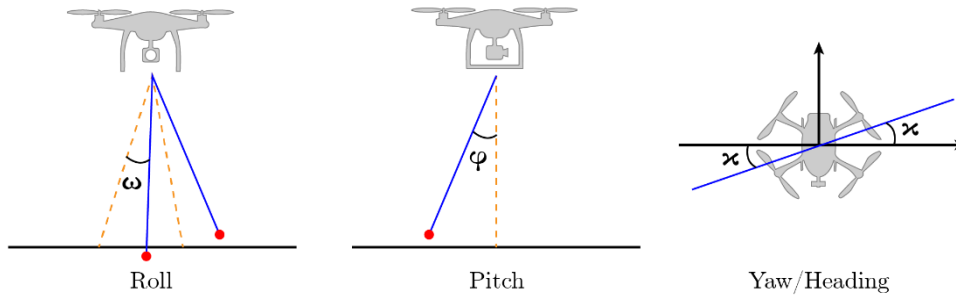
c: η απόσταση αναφοράς της κάμερας

$X_c, Y_c, Z_c$ : οι συντεταγμένες του κέντρου προοπτικής

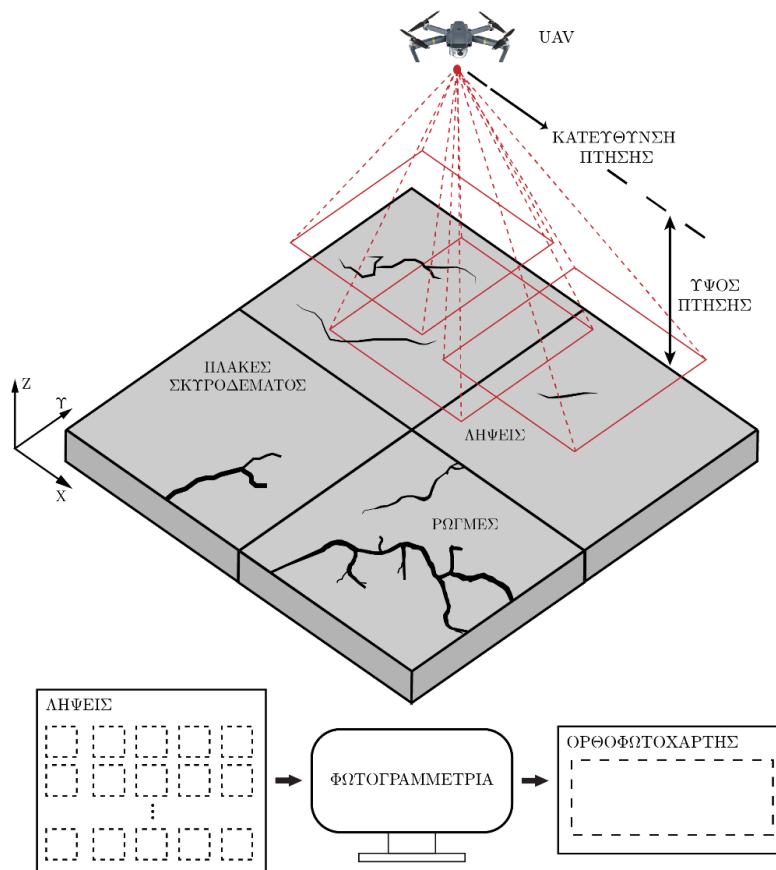
$m_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ): τα στοιχεία του πίνακα  $M = M(\chi)M(\varphi)M(\omega) = [m_{ij}]$  και τα οποία

αποτελούν συναρτήσεις των γωνιών προσανατολισμού ( $\omega, \varphi, \chi$ ) κατά Euler (η γωνία  $\omega$  είναι γύρω από τον άξονα X, η γωνία  $\varphi$  γύρω από τον Y και η  $\chi$  γύρω από τον άξονα Z).

Σύμφωνα με τους Liu et al. (2012) οι γωνίες προσανατολισμού ( $\omega, \varphi, \chi$ ) είναι περίπου ίσες με αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 28, δηλαδή τις γωνίες roll, pitch, yaw.



Σχήμα 28 - Οι γωνίες στροφής  $\omega, \varphi, \chi$  Πηγή: (Pepe et al., 2018)



Σχήμα 29 - Σύνοψη διαδικασιών απόκτησης δεδομένων Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

## 3.2 Περιγραφή Διαδικασίας Ανάλυσης Εικόνας

Με έτοιμο πλέον το σύνολο των δεδομένων (dataset) και άρα το βήμα απόκτησης (data acquisition), δηλαδή τους Ορθοφωτοχάρτες που παρήχθησαν μέσω της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας για μια εξεταζόμενη περιοχή, ο αμέσως επόμενος άξονας είναι η ανάπτυξη των βημάτων για την ανάλυση της RGB εικόνας με τέτοιο τρόπο που θα εντοπιστούν οι ρωγμές. Τα βήματα είναι διαδοχικές τεχνικές που στηρίζονται στις ευρείς κατηγορίες ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας που αναπτύχθηκαν στην Ενότητα 2.5.

### 3.2.1 Μέσα Υλοποίησης

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Baskar et al. (2023) η βασική προϋπόθεση για να πραγματοποιηθεί μια έρευνα Ανάλυσης Εικόνας, είναι ο ερευνητής να διαθέτει ένα υπόβαθρο σε έξι (6) τομείς που χαρακτηρίζονται ως θεμελιώδης τεχνογνωσία:

- Γραμμική Άλγεβρα
- Διαφορικές εξισώσεις
- Πιθανότητες και Στατιστική
- Ηλεκτρονική
- Σήματα και Συστήματα
- Προγραμματιστικές δεξιότητες

Έτσι προκειμένου να υλοποιηθεί η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί εκτενώς παρακάτω πρέπει ένας ερευνητής να αξιοποιήσει τις δυνατότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή και δη της γλώσσας προγραμματισμού Python και των GIS. Αναλυτικότερα, η Python και οι βιβλιοθήκες της χρησιμεύουν σε κάθε βήμα από την αρχική εικόνα εισόδου μέχρι την τελική δυαδική εικόνα παρουσίασης των ρωγμών. Τα GIS αποτελούν το μέσο οπτικοποίησης των γεωαναφερμένων εικόνων (Raster με μορφή GeoTIFF) ύστερα από κάθε επεξεργασία και παράλληλα το μέσο μετατροπής από την τελική εικόνα εξόδου με τα εντοπισμένα pixel που αποδίδουν τις ρωγμές, σε διανυσματικά δεδομένα (vector) για περαιτέρω εξαγωγή πληροφοριών, στατιστικών και μετρήσεων.

Η Python είναι μια αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού (object-oriented) υψηλού επιπέδου, με ενσωματωμένες δομές δεδομένων και δυναμικές ιδιότητες. Για την αξιοποίηση της γίνεται αρχικά εγκατάσταση της πλατφόρμας Conda, και ειδικότερα της διανομής Miniconda. Η πλατφόρμα αυτή έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί ένα εύκολο περιβάλλον διαχειριστή εγκατάστασης, διαμόρφωσης και διαχείρισης βιβλιοθηκών της Python για την απλοϊκότητα των επιστημονικών υπολογισμών και της ανάλυσης δεδομένων. Επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν και να διαχειρίζονται

πολλαπλά εικονικά περιβάλλοντα με διαφορετικά πακέτα και εξαρτήσεις, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή «συγκρούσεων» μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων λογισμικού και βιβλιοθηκών (Anaconda, 2023).

Το Miniconda περιλαμβάνει μόνο το διαχειριστή πακέτων Conda και ένα μικρό σύνολο βασικών πακέτων και βιβλιοθηκών και επιλέγεται καθώς είναι ταχύτερο και πιο ελαφρύ από την πλήρη διανομή Anaconda, η οποία περιλαμβάνει ένα μεγάλο σύνολο προεγκατεστημένων πακέτων και εργαλείων για επιστημονικούς υπολογισμούς. Ακόμη ένα προτέρημα του είναι πως μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε συστήματα Windows, Linux και macOS, όπως στην παρούσα διπλωματική εγκαταστάθηκε η έκδοση Conda 22.11.1 σε υπολογιστή με Windows 10 λειτουργικό.

Για να μπορέσουν να αναπτυχθούν αλγόριθμοι ανά βήμα μεθοδολογίας, απαιτείται η χρήση ενός Ολοκληρωμένου Περιβάλλοντος Ανάπτυξης (Integrated Development Environment – IDE). Ως IDE ορίζεται ένα λογισμικό που παρέχει ένα πλήρες περιβάλλον για την ανάπτυξη λογισμικού (software development), συμπεριλαμβανομένου ενός επεξεργαστή κώδικα (code editor), ενός αποσφαλματωτή (debugger), ενός μεταγλωττιστή (compiler) ή διερμηνέα (interpreter) και άλλων χαρακτηριστικών που μπορούν να βελτιώσουν την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα της διαδικασίας ανάπτυξης. Τέτοιο περιβάλλον είναι το Spyder (Spyder, 2023), γνωστό ως ένα ισχυρό και διαδραστικό περιβάλλον για επιστημονικούς υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων σε Python. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση 5.4.2.

Η Python έχει γίνει μια δημοφιλής γλώσσα προγραμματισμού για την ανάλυση και την επεξεργασία εικόνας λόγω της διαθεσιμότητας πολυάριθμων βιβλιοθηκών. Αυτές οι βιβλιοθήκες παρέχουν ένα ευρύ φάσμα εργαλείων και λειτουργιών για την ανάγνωση, το χειρισμό και την ανάλυση δεδομένων εικόνας, καθιστώντας την Python ένα πολύτιμο εργαλείο για τους ερευνητές. Ορισμένες από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες βιβλιοθήκες είναι οι OpenCV, NumPy, Matplotlib, Scikit-image, Pillow. Αυτές οι βιβλιοθήκες παρέχουν συναρτήσεις για φιλτράρισμα εικόνων, κατάτμηση, ανίχνευση χαρακτηριστικών, αναγνώριση αντικειμένων κ.λπ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω βιβλιοθήκες:

- NumPy – Numerical Python (NumPy Community, 2022): βιβλιοθήκη που επιτρέπει την ανάγνωση και τις πράξεις πινάκων (arrays & matrices) χρησιμοποιώντας μαθηματικές συναρτήσεις. Οι πίνακες NumPy χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των δεδομένων εικόνας (αριθμητική τιμή εικονοστοιχείων). Επιπλέον παρέχει μια σειρά συναρτήσεων γραμμικής άλγεβρας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εργασίες

επεξεργασίας εικόνας.

- GDAL - Geospatial Data Abstraction Library (Warmerdam & Rouault, 2023): βιβλιοθήκη ευρέως χρησιμοποιούμενη για την εργασία με γεωχωρικά δεδομένα. Παρέχει ένα σύνολο λειτουργιών για την ανάγνωση, εγγραφή και επεξεργασία διαφόρων τύπων δεδομένων (διανυσματικά (vector) και ψηφιδωτά (raster)). Για την ανάλυση εικόνων, η GDAL παρέχει συναρτήσεις για τις διεργασίες σε μορφές όπως TIFF, JPEG και PNG, ενώ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή μεταδεδομένων και την εκτέλεση μετατροπών μεταξύ διαφορετικών τύπων δεδομένων. Συναντάται και ως ενσωματωμένη βιβλιοθήκη εργαλείων σε όλες τις διανομές του QGIS.
- Rasterio (Gillies, 2023): βιβλιοθήκη ειδικά σχεδιασμένη και αυτή για το χειρισμό γεωχωρικών συνόλων δεδομένων εικόνας. Με το ολοκληρωμένο σύνολο λειτουργιών της, παρέχει μια ισχυρή εργαλειοθήκη για τις περισσότερες δημοφιλείς μορφές αρχείων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Rasterio έγκειται στην απρόσκοπτη ενσωμάτωση με τη βιβλιοθήκη NumPy, επιτρέποντας τον εύκολο χειρισμό των δεδομένων ως πίνακες ενώ καθιστά εφικτούς τους γεωχωρικούς μετασχηματισμούς και τη διατήρηση της γεωχωρικής πληροφορίας ως μεταδεδομένα.
- OpenCV - Open Source Computer Vision (OpenCV team, 2022): βιβλιοθήκη για την όραση υπολογιστών, την επεξεργασία εικόνας και τη μηχανική μάθηση. Παρέχει μια σειρά από λειτουργίες για την εργασία με εικόνες και βίντεο, συμπεριλαμβανομένης της ανάγνωσης και εγγραφής διαφόρων μορφών εικόνας, της κατωφλίωσης εικόνας, της εξομάλυνσης εικόνας, της ανίχνευσης ακμών και της μορφολογίας.
- Scipy - Scientific Python (SciPy Community, 2023): βιβλιοθήκη για επιστημονικούς υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων, όπου παρέχει ένα ευρύ φάσμα συναρτήσεων για βελτιστοποίηση, ολοκλήρωση, γραμμική άλγεβρα, επεξεργασία σήματος και πολλά άλλα. Η SciPy περιλαμβάνει το υπό-πακέτο ndimage, το οποίο έχει σχεδιαστεί ειδικά για την ανάλυση και επεξεργασία εικόνων, προσφέροντας ενδεικτικά συναρτήσεις για την ανίχνευση χαρακτηριστικών και την κατάτμηση εικόνας ενώ μπορεί να εργάζεται με n-διάστατους πίνακες, καθιστώντας το κατάλληλο για την επεξεργασία πολυκαναλικών και πολυδιάστατων εικόνων. Παρέχει επίσης συναρτήσεις για την εργασία με δυαδικές εικόνες και εικόνες με ετικέτες (labeling), οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατάτμηση και στην αναγνώριση

αντικειμένων.

- Scikit-Image (Scikit Community, 2022): βιβλιοθήκη για την επεξεργασία εικόνων και την όραση υπολογιστών. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι η φιλική προς το χρήστη διεπαφή και οι εύχρηστες λειτουργίες, όπως επίσης η ικανότητά του να εργάζεται με πολυκαναλικές (multi-channel) εικόνες.
- Scikit-Learn (Scikit-Learn developers, 2022): βιβλιοθήκη για μηχανική μάθηση και όραση υπολογιστών. Είναι «χτισμένη» πάνω σε άλλες αριθμητικές και επιστημονικές βιβλιοθήκες όπως οι NumPy, SciPy και matplotlib. Το Scit-learn παρέχει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων και αλγορίθμων για διάφορες εργασίες μηχανικής μάθησης, όπως ταξινόμηση, παλινδρόμηση, ομαδοποίηση κ.λπ. Προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύνολο λειτουργιών επίσης για την επικύρωση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων με μετρικές.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία η έκδοση της Python που χρησιμοποιείται μέσω του Miniconda είναι η 3.9.15 ενώ για τις εκδόσεις που χρησιμοποιούνται από τις παραπάνω βιβλιοθήκες ισχύει: NumPy: 1.24.2, GDAL: 3.4.3, OpenCV: 4.7.0, Scipy: 1.10.0, Scikit-Image: 0.19.2 και η Scikit-Learn 1.2.0. Σημαντική αναφορά στις περισσότερες από τις παραπάνω βιβλιοθήκες όπως και για τη βιβλιοθήκη Matplotlib, γίνεται στην έρευνα των Chityala and Pudipeddi (2020). Η βιβλιοθήκη Matplotlib είναι μέσο οπτικοποίησης δεδομένων παρέχοντας ένα ευρύ φάσμα συναρτήσεων για τη δημιουργία διαφόρων τύπων γραφικών παραστάσεων και διαγραμμάτων ή απλά εκτύπωσης της εξόδου ενός αλγορίθμου/κώδικα ως εικόνα. Για τη μεθοδολογία χρησιμοποιείται μονάχα για την εκτύπωση του πίνακα σύγχυσης ενώ δεν θα χρειαστεί η αξιοποίηση της για εικόνες αφού τα αποτελέσματα θα αποθηκεύονται ως εικόνες-εξοδοί και θα οπτικοποιούνται απευθείας στο GIS.

Τα GIS αποτελούνται συνήθως από διάφορα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου του υλισμικού, του λογισμικού, των δεδομένων και των ανθρώπων που τα χειρίζονται. Το υλισμικό μπορεί να περιλαμβάνει υπολογιστές, διακομιστές και δέκτες GPS, ενώ το λογισμικό οποιοδήποτε ανεπτυγμένο πρόγραμμα. Σήμερα, τα δύο πιο χρησιμοποιούμενα πακέτα GIS είναι το ArcGIS και το QGIS και χρησιμοποιούνται για ένα μεγάλο εύρος εργασιών, χωρικής ανάλυσης, παραγωγής χαρτών, οπτικοποίησης γεωχωρικής πληροφορίας και σε οτιδήποτε άλλο υπάρχει χωρική υπόσταση και άρα καλύπτεται από γεωχωρικά δεδομένα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση αποκλειστικά του QGIS και πιο συγκεκριμένα της έκδοσης v.3.22.11-Białowieża.

Το QGIS, γνωστό ως Quantum GIS (QGIS Development Team, 2023), είναι ένα λογισμικό που ανήκει στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, ανοικτού κώδικα, που προσφέρει ένα ισχυρό και ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων με εφαρμογή σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Το QGIS υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα μορφότυπων ώστε να είναι εφικτή η διαχείριση δεδομένων με γεωχωρική πληροφορία και στη συνέχεια η επεξεργασία και όποια άλλη σχετική ενέργεια με τη γεωχωρική ανάλυση και τη χαρτοσύνθεση. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του είναι η φιλική προς το χρήστη διεπαφή ενώ ταυτόχρονα αναγνωρίζεται ευρέως για την ευελιξία, την προσβασιμότητα και τη συμβατότητα πολλαπλών πλατφορμών, καθιστώντας το έτσι μια δημοφιλή επιλογή για τους ερευνητές.

### 3.2.2 Βήματα Ανάλυσης

Στη μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής λαμβάνονται υπόψη οι αρχές και οι προοπτικές της Ανάλυσης εικόνας βάσει των όσων έχουν αναφερθεί σε προγενέστερες Ενότητες. Αξιοποιούνται τα εργαλεία της Python που αναφέρθηκαν στην υπό-ενότητα 3.2.1 με στόχο από μια δεδομένη εικόνα εισόδου (τμήμα του ορθοφωτοχάρτη) να προκύψει μια δυαδική εικόνα εξόδου που αναπαριστά τις ρωγμές σε ένα επιλεγμένο τμήμα μιας πλάκας σκυροδέματος σε ένα λιμάνι. Στη συνέχεια με χρήση αποκλειστικά εργαλείων του περιβάλλοντος GIS, μετατρέπεται η ψηφιδωτή (raster) μορφή, με τις περιοχές που έχουν ταξινομηθεί/ανιχνευθεί ως ρωγμές σε διανυσματικά (vector) δεδομένα. Τέλος, γίνεται επικύρωση των αποτελεσμάτων με την εικόνα των πραγματικών καταγεγραμμένων ρωγμών στην εξεταζόμενη περιοχή της πλάκας σκυροδέματος. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως η διαδικασία είναι επαναληπτική από τη στιγμή που ο ευρύτερος σκοπός είναι η παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών στο πέρασμα του χρόνου και πως η ιδιαιτερότητα της είναι ότι σε κάθε βήμα διατηρείται η χωρική πληροφορία της εικόνας, έτσι ώστε να αποτυπώνεται η πραγματική θέση σε κάτοψη όταν η εικόνα εισάγεται στο περιβάλλον του GIS. Τα βήματα που αφορούν αποκλειστικά στην ανάλυση εικόνας αναλύονται βήμα προς βήμα στη συνέχεια και συνοψίζονται στο τέλος της ενότητας σχηματικά.

Βήμα 1: Ορισμός περιοχής μελέτης και επιλογή πλάκας σκυροδέματος μέσω αποκοπής από τον αρχικό Ορθοφωτοχάρτη

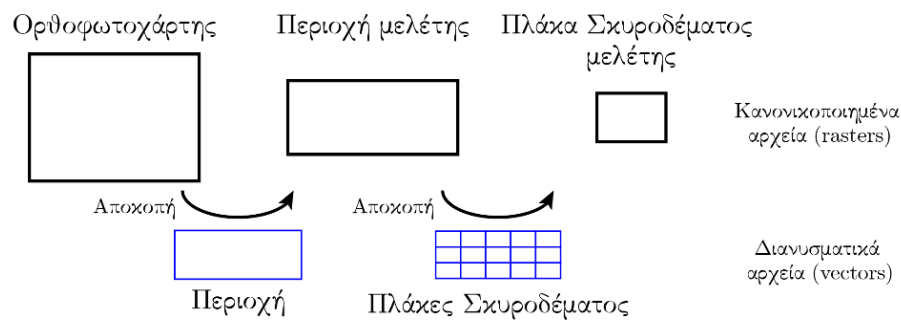
Πρωταρχικό μέλημα είναι να μειωθεί ο όγκος, όχι όμως και η ποιότητα του Ορθοφωτοχάρτη προκειμένου να πληρούνται δύο προϋποθέσεις για την ανάλυση. Η πρώτη είναι να μπορέσει η ανάλυση να γίνει πιο στοχευμένα σε περιοχή όπου κατά την επιτόπια



οπτική επισκόπηση στο λιμάνι ή την παρατήρηση της εικόνας εντοπίζονται φθορές (ρωγμές) στο σκυρόδεμα. Η δεύτερη είναι για λόγους ταχύτητας της επεξεργασίας και συνάμα για να μην παρουσιάσει το σύστημα και ο αλγόριθμος δυσλειτουργίες (crash).

Η επιλογή της περιοχής μελέτης βασίζεται στα κριτήρια που θέτει κάθε ερευνητής, (π.χ. πλάκες σκυροδέματος αρκετά επιβαρυμένες από φθορές λόγω της έντονης χρήσης του). Αφού επιλεγεί επομένως η περιοχή μελέτης και γίνεται μια πρώτη αποκοπή της από τον αρχικό Ορθοφωτοχάρτη ορίζοντας ένα πολύγωνο, στη συνέχεια ορίζονται νέα πολύγωνα βάσει των ορίων των πλακών σκυροδέματος. Τέλος, η πλάκα σκυροδέματος στην οποία παρατηρούνται έντονες ρηγματώσεις και μεταβολές στο πέρασμα του χρόνου, δηλαδή διάδοση/επέκταση (propagation) των παλαιότερων ρωγμών ή δημιουργία νέων, αποκόπτεται εκ νέου από την εικόνα της περιοχής μελέτης.

Ολόκληρη η διαδικασία γίνεται στο περιβάλλον του QGIS δημιουργώντας δύο (2) shapefiles πολυγώνων μέσω χειροκίνητης ψηφιοποίησης ενώ η διαδικασία αποκοπής γίνεται με ενσωματωμένο εργαλείο της GDAL στο QGIS.



Σχήμα 30 - Παρουσίαση μεθόδου αποκοπής Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

Βήμα 2: Μετατροπή της νέας RGB εικόνας του Βήματος 1 σε κλίμακα του γκρι

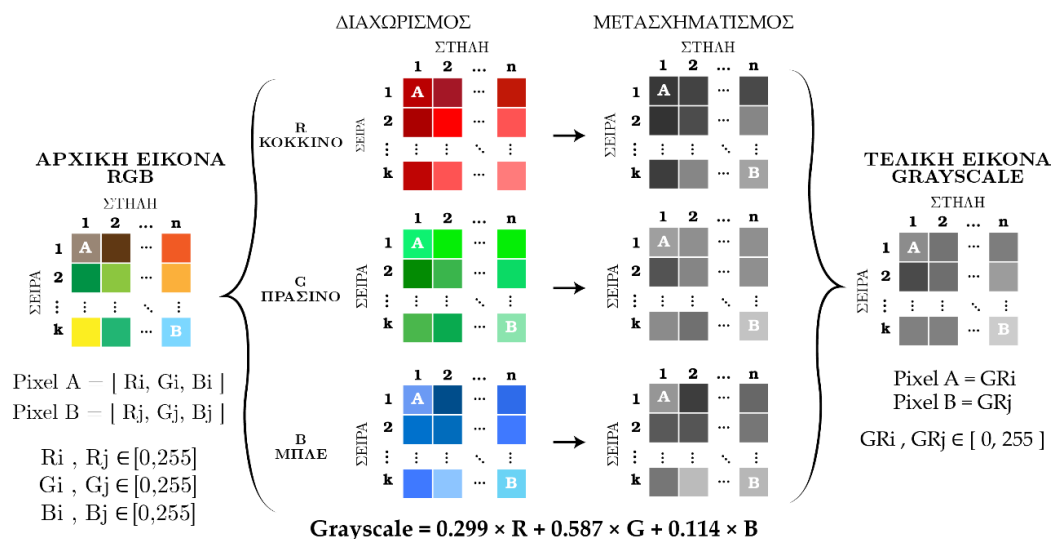
Το αμέσως επόμενο βήμα είναι ο αποχρωματισμός (decolorize) της RGB εικόνας μέσω της μετατροπής της σε κλίμακα του γκρι (grayscale conversion). Ένα εικονοστοιχείο σε μια RGB εικόνα είναι συνδυασμός τριών αέραιων τιμών των χρωμάτων Κόκκινο, Πράσινο και Μπλε, με τιμές από 0 (ελάχιστη ένταση – απουσία χρώματος) έως 255 (μέγιστη ένταση – πλήρης παρουσία χρώματος), ενώ σε μια εικόνα της κλίμακας του γκρι αναπαρίσταται με μία μόνο τιμή μεταξύ 0 και 255, όπου το 0 αντιστοιχεί σε μαύρο και το 255 στο λευκό, η οποία υποδηλώνει το βαθμό που φωτίζεται κάθε εικονοστοιχείο, ή αλλιώς τη φωτεινότητα (luminance). Η μετατροπή αυτή όπως υποστηρίζουν οι Chen et al. (2022) και οι Chen et al. (2021) είναι αναγκαία ώστε να εξαλειφθούν χρωματικές πληροφορίες και ιδίως χρωματικές διαφορές που δεν ευνοούν την ανίχνευση ρωγμών και

θεωρούνται περιττές για τις περισσότερες εφαρμογές αναγνώρισης και ανίχνευσης σύμφωνα με τους Kanan and Cottrell (2012).

Για τη μετατροπή πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια συνάρτηση που θα συνδυάσει τις τιμές κάθε καναλιού σε μια ενιαία τιμή. Η πιο συνηθισμένη είναι αυτή του σταθμισμένου μέσου όρου για τα τρία (3) κανάλια ενώ έχουν αναπτυχθεί και άλλες που υιοθετούν εναλλακτικά βάρη για να δημιουργήσουν μια πιο ακριβή αντιληπτικά αναπαράσταση. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι εκείνη της φωτεινότητας (luminosity method), η οποία αναθέτει διαφορετικά βάρη σε κάθε κανάλι βάσει της ικανότητας του ανθρώπινου ματιού να ξεχωρίζει τα χρώματα και να αντιλαμβάνεται την έννοια της φωτεινότητας. Οι έρευνες των Kanan and Cottrell (2012) και των Ahmad et al. (2018) μάλιστα την αξιολογούν ως μια από τις αποδοτικότερες μεθόδους. Η συνάρτηση που χρησιμοποιεί είναι:

$$Y = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B \quad (14)$$

όπου το Κόκκινο κανάλι συνεισφέρει σχεδόν 30%, το Πράσινο 59% και το Μπλε 11%. Η συνάρτηση δεν είναι περίπλοκη, διατηρεί την αντίθεση και τις λεπτομέρειες που υπάρχουν στην αρχική εικόνα RGB και άρα διατηρεί σημαντικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες. Το αποτέλεσμα στη μετατροπή αναδεικνύει τις ρωγμές περισσότερο προς τους τόνους του μαύρου αφού δεν αντανακλούν φως και αυτό είναι σημαντικό αφού στη συνέχεια είναι βοηθητικό στη διαδικασία της κατάτμησης της εικόνας. Η εφαρμογή της συνάρτησης γίνεται μέσω της Python και ο σχετικός κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Α ως Διεργασία 1.

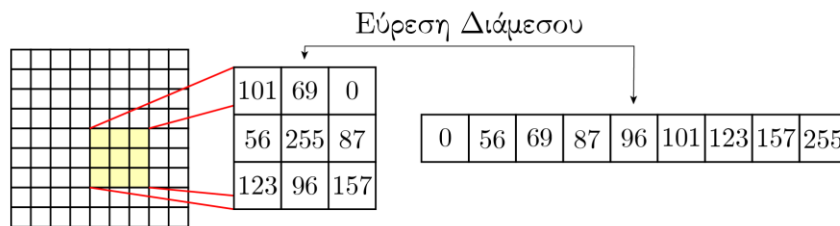


Σχήμα 31 - Παρουσίαση μεθόδου μετατροπής σε κλίμακα του γκρι Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

Βήμα 3: Εφαρμογή διάμεσου φίλτρου στην εικόνα κλίμακας του γκρι

Στο βήμα αυτό εφαρμόζεται το διάμεσο φίλτρο (median filter) στην εικόνα κλίμακας του γκρι από το προηγούμενο βήμα με στόχο την εξομάλυνση της και τη μείωση θορύβου. Στα μαθηματικά, υπάρχουν γραμμικές και μη-γραμμικές εξισώσεις και αντίστοιχη κατηγοριοποίηση έχουν και τα φίλτρα εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, το διάμεσο φίλτρο είναι ένα από τα πιο γνωστά μη-γραμμικά (non-linear) φίλτρα που ενώ αφαιρεί το θόρυβο από την εικόνα, καταφέρνει να διατηρήσει σε μεγάλο βαθμό τις ακμές αναλλοίωτες (Patidar et al., 2010). Το φίλτρο λειτουργεί ακριβώς όπως η ονομασία του δηλαδή εντοπίζει τη διάμεση τιμή μιας γειτονιάς εικονοστοιχείων και αντικαθιστά με την τιμή αυτή την αρχική τιμή του κεντρικού εικονοστοιχείου της γειτονιάς.

Πρακτικά δηλαδή υπάρχει ένα συρόμενο παράθυρο που τοποθετείται πάντα νοητά επάνω στην αρχική εικόνα και ανάλογα το μέγεθος του ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ , ...,  $N \times N$ ) εντοπίζει τη γειτονιά των σημείων, κρατάει τις τιμές τους και τις κατατάσσει σε αύξουσα σειρά (Σχήμα 32) (Chityala & Pudipeddi, 2020).



Σχήμα 32 - Παρουσίαση τεχνικής διάμεσου φιλτραρίσματος Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Το βασικό πλεονέκτημα του είναι η αφαίρεση του παλμικού θορύβου που χαρακτηρίζεται από την τυχαία εμφάνιση μαύρων και λευκών εικονοστοιχείων (Owotogbe et al., 2019; Solomon & Breckon, 2011) ενώ ταυτόχρονα υπάρχει ανθεκτικότητα σε ακραίες τιμές όπως φαίνεται και στο παράδειγμα (Σχήμα 32) με συνέπεια την αποφυγή μη-ρεαλιστικών τιμών και άρα θόλωσης σημαντικών λεπτομερειών για την εικόνα (Church et al., 2008; Solomon & Breckon, 2011). Στην παρούσα μεθοδολογία επιλέγεται ύστερα από διαδοχικά πειράματα η χρήση της μικρότερης γειτονιάς εικονοστοιχείων δηλαδή το μέγεθος παραθύρου είναι  $3 \times 3$  και η υλοποίηση με βάση την Python φαίνεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α ως Διεργασία 2.

#### Βήμα 4: Ενδεδειγμένος έλεγχος της φιλτραρισμένης εικόνας για τον οπτικό εντοπισμό ρωγμών και ψηφιοποίηση αυτών

Στο συγκεκριμένο βήμα φαίνεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ της Python και του GIS καθώς είναι το πρώτο βήμα οπτικοποίησης εικόνας εξόδου από τους αλγορίθμους που έχουν προηγηθεί. Ειδικότερα, επειδή όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η χωρική πληροφορία της εικόνας διατηρείται σε κάθε βήμα είναι εφικτό να «φορτωθούν» σε περιβάλλον GIS τα αποτελέσματα του Βήματος 3. Παράλληλα εισάγεται και η αρχική εικόνα της πλάκας σκυροδέματος του Βήματος 1 και αξιοποιώντας τα εργαλεία (φωτεινότητα, κορεσμός, αντίθεση και διόρθωση gamma) οπτικής απόδοσης (layer rendering) από το μενού του QGIS γίνεται μια προσπάθεια αναγνώρισης των ρωγμών με συνεχή εναλλαγή των επιπέδων (layers) (Tsaimou et al., 2023).

Οι ρωγμές αυτές ψηφιοποιούνται και αποθηκεύονται σε ένα αρχείο shapefile και θα αποτελέσουν ουσιαστικά όπως θα δειχθεί και στο τελικό Βήμα (Βήμα 11) τα δεδομένα ελέγχου της μεθοδολογίας. Το αρχείο αυτό όμως παραμένει συνοδευτικό αρχείο προελέγχου σε καθένα από τα επόμενα βήματα καθώς αποτελεί την κατευθυντήρια γραμμή για το εάν τα αποτελέσματα τείνουν ή απέχουν από την πραγματικότητα και να προσαρμόζονται αναλόγως οι παράμετροι των ακόλουθων υπολογιστικών βημάτων.



Σχήμα 33 - Παρουσίαση ψηφιοποίησης ρωγμών Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

#### Βήμα 5: Οριοθέτηση ζώνης ρωγμών και δημιουργία νέας εικόνας εισόδου

Πολύ σημαντικό βήμα είναι να γίνει ταυτοποίηση στην πλάκα σκυροδέματος μιας ζώνης που να συνδυάζει όλων των ειδών ρωγμές σε χαρακτηριστικά μήκους και πλάτους βάσει της ψηφιοποίησης του Βήματος 4. Επισημαίνεται πως η διαδικασία είναι επαναληπτική, για λήψεις σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ώστε να έχει νόημα η παρακολούθηση της υποδομής και άρα προκειμένου να επιλεγεί μια ζώνη μελέτης ρωγμών, πρέπει να παρατηρηθούν τυχόν μεταβολές σε ρωγμές. Αφού διαπιστωθεί πως υπάρχει μια τέτοια ζώνη στην πλάκα σκυροδέματος που μελετάται, οριοθετείται μέσω ενός πολυγώνου

και στη συνέχεια αποκόπτεται εκ νέου από τη φιλτραρισμένη εικόνα (διαδικασία όπως στο Βήμα 1) και θα αποτελέσει την εικόνα εισόδου για το Βήμα 6.

Βήμα 6: Εφαρμογή κατάτμησης της εικόνας με τη μέθοδο της τοπικής κατωφλίωσης

Η τοπική κατωφλίωση αναφέρεται στην τεχνική υπολογισμού μιας τιμής κατωφλίου για κάθε εικονοστοιχείο με βάση την τοπική γειτονιά που το περιβάλλει. Διαφορετικές μέθοδοι τοπικής κατωφλίωσης χρησιμοποιούν διαφορετικούς υπολογισμούς και αλγορίθμους για τον προσδιορισμό της προσαρμοστικής τιμής κατωφλίου. Η πιο εξιδανικευμένη περίπτωση και η πιο απλή μέθοδος που υπολογιστικά τουλάχιστον αποδίδει τα πιο γρήγορα αποτελέσματα είναι η προσαρμοστική (adaptive) που συνήθως κατονομάζεται και ως η γενική κατηγορία τοπικής κατωφλίωσης.

Η υλοποίηση της προσαρμοστικής κατωφλίωσης διαιρεί την εικόνα σε μικρά τμήματα που ορίζονται από μια τιμή παραθύρου (συνήθως είναι τετραγωνικό με  $N \times N$  διαστάσεις γειτονιάς) με την τιμή κατωφλίου για κάθε επιμέρους τμήμα (υπό-εικόνα) να υπολογίζεται και να χρησιμοποιείται για την κατάτμηση. Η τιμή  $t$  του κατωφλίου μπορεί να βασίζεται σε διάφορα στατιστικά στοιχεία με τα πιο συνηθισμένα να είναι τα φίλτρα μέσης τιμής, διάμεσου ή του Gauss (Chityala & Pudipeddi, 2020; Solomon & Breckon, 2011), με το τελευταίο μάλιστα να αποτελεί και την προκαθορισμένη μέθοδο στη βιβλιοθήκη Scikit-Image της Python. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οποιοσδήποτε άλλος στατιστικός υπολογισμός όπως για παράδειγμα ένας μέσος όρος της μέγιστης και ελάχιστης τιμής φωτεινότητας της υπό-εικόνας, αφού ο τύπος υπολογισμού του κατωφλίου είναι  $mean - C$ , με  $C$  μια προκαθορισμένη σταθερά εξισορρόπησης.

Στην προγραμματιστική υλοποίηση της Python, η προσαρμοστική τεχνική χρησιμοποιεί την τιμή εξισορρόπησης (offset value) για να λειτουργήσει ως παράγοντας προσαρμογής της τιμής κατωφλίωσης κατά έναν σταθερό παράγοντα. Η παράμετρος αυτή λαμβάνει θετικές και αρνητικές τιμές και ρυθμίζοντας την κατάλληλα μπορεί να ελεγχθεί η αυστηρότητα ή η επιείκεια της λειτουργίας του κατωφλίου και συνεπώς είναι ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της αφού προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά της εικόνας. Για παράδειγμα, αν διαπιστωθεί ότι η εικόνα με κατωφλίωση έχει ορισμένες περιοχές που έχουν ταξινομηθεί εσφαλμένα, χάρη στην τιμή εξισορρόπησης μπορεί να γίνει πειραματισμός με θετικές ή αρνητικές τιμές μετατόπισης για να συμπεριληφθούν ή να αποκλειστούν περιοχές χάρη στα επίπεδα φωτεινότητας τους.

Αρνητική τιμή εξισορρόπησης σημαίνει πως θα αυξηθεί η υπολογισμένη τιμή κατωφλίου για κάθε εικονοστοιχείο και άρα περισσότερα εικονοστοιχεία θα ταξινομηθούν

ως υπόβαθρο (background). Αντίθετα, αν δοθεί θετική τιμή θα μειωθεί η υπολογισμένη τιμή κατωφλίου για κάθε εικονοστοιχείο και αυτό σημαίνει πως περισσότερα εικονοστοιχεία θα ταξινομηθούν ως προσκήνιο (foreground). Σαφώς, τα παραπάνω δεν αποτελούν τον κανόνα αφού μπορεί να υπάρχουν εξαιρέσεις ανάλογα την εικόνα και τις συνθήκες φωτισμού της και η βέλτιστη τιμή κάθε φορά για να επιτευχθεί χρειάζεται αρκετό πειραματισμό.

Προγραμματιστικά μιλώντας, στην προσαρμοστική μέθοδο μπορεί να συμπεριληφθεί και οποιαδήποτε από τις μεθόδους κατάτμησης με βάση το ιστόγραμμα (Chityala & Pudipeddi, 2020). Μια λοιπόν από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές που μπορούν να αναγνωριστούν ως προσαρμοστικές είναι η μέθοδος Otsu, η οποία αναπτύχθηκε από τον Otsu (1979) και βασίζεται στην υπόθεση ότι μια εικόνα περιέχει δύο κατηγορίες εικονοστοιχείων: αυτά του παρασκηνίου-φόντου (background) και αυτά του προσκηνίου (foreground).

Η μέθοδος είναι μια επαναληπτική διαδικασία που λειτουργεί αποκλειστικά με τις τιμές της φωτεινότητας ιστογράμματος και στόχος της είναι η εύρεση μιας τιμής κατωφλίου που να διαχωρίζει αυτές τις δύο κλάσεις μεγιστοποιώντας τη μεταξύ τους διακύμανση (Gonzalez & Woods, 2018). Δηλαδή καθώς προσαρμόζεται το κατώφλι και τείνει να είναι το βέλτιστο για την κατάτμηση, αυξάνεται η εξάπλωση της μιας κλάσης και ταυτόχρονα μειώνεται της άλλης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο θέμα του όρου βέλτιστο, καθώς αποδεδειγμένα όλες οι τεχνικές κατωφλίωσης λειτουργούν βέλτιστα μόνο όταν το ιστόγραμμα του επιπέδου του γκρι μιας εικόνας είναι διατροπικό (bimodal) ή σχεδόν διατροπικό, ενώ εικόνες που συνήθως είναι αλλοιωμένες από παρουσία θορύβου παρουσιάζουν ένα πιο πολυτροπικό (multimodal) ιστόγραμμα και συνεπώς δεν είναι σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ των εικονοστοιχείων των κλάσεων (Al-amri et al., 2010; Bovik, 2009)

Η μέθοδος Otsu αφορά μόνο στις εικόνες σε κλίμακα του γκρι και έχει παραλλαγές καθώς έγινε ευρέως γνωστή ως μια μέθοδος καθολικής (global) κατωφλίωσης και αργότερα άρχισε να εξελίσσεται και να εφαρμόζεται και ως τοπική. Οι θεμελιώδεις μαθηματικές αρχές της μεθόδου ωστόσο παραμένουν οι ίδιες τόσο για την καθολική όσο και για την τοπική κατωφλίωση με τη μοναδική διαφορά πως αλλάζει το πεδίο εφαρμογής, αφού στην τοπική η εικόνα χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές (blocks) και οι υπολογισμοί των παρακάτω εξισώσεων γίνονται για κάθε τμήμα από τα επιμέρους ξεχωριστά.

Για να γίνει αντιληπτή η μέθοδος Otsu, πρέπει πρωτίστως να διευκρινιστούν ορισμένα πράγματα σχετικά με τις στατιστικές πληροφορίες ενός ιστογράμματος. Έτσι, έστω  $h(g)$  ιστόγραμμα μιας εικόνας  $I$  σε κλίμακα του γκρι, με ένα συνολικό αριθμό  $N$

εικονοστοιχείων και  $K$  πιθανές τιμές φωτεινότητας (ισχύει  $0 \leq g < K$ ). Οι διακυμάνσεις (variances) παρασκηνίου και προσκηνίου υπολογίζονται απευθείας από το ιστόγραμμα της εικόνας ως εξής:

$$\sigma_0^2(q) = \frac{1}{n_0(q)} \sum_{g=0}^q (g - \mu_0(q))^2 \times h(g) \quad (14)$$

$$\sigma_1^2(q) = \frac{1}{n_1(q)} \sum_{g=q+1}^{K-1} (g - \mu_1(q))^2 \times h(g) \quad (15)$$

ενώ η διακύμανση εντός της κλάσης ορίζεται σαν:

$$\begin{aligned} \sigma_w^2(q) &= P_0(q) \times \sigma_0^2(q) + P_1(q) \times \sigma_1^2(q) \\ &= \frac{1}{N} [n_0(q) \times \sigma_0^2(q) + n_1(q) \times \sigma_1^2(q)] \end{aligned} \quad (16)$$

όπου:

$$\begin{aligned} P_0(q) &= \sum_{i=0}^q p(i) = \frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^q h(i) = \frac{n_0(q)}{N} \\ P_1(q) &= \sum_{i=q+1}^{K-1} p(i) = \frac{1}{N} \times \sum_{i=q+1}^{K-1} h(i) = \frac{n_1(q)}{N} \end{aligned} \quad (17)$$

με  $P_0$  και  $P_1$  τις πιθανότητες εμφάνισης κάθε κλάσης  $C_1$  και  $C_2$  αντίστοιχα. Οπότε, η διακύμανση εντός της κλάσης που δίνεται από την Εξίσωση 16 είναι απλώς το άθροισμα των επιμέρους διακυμάνσεων σταθμισμένων με τις αντίστοιχες πιθανότητες κλάσης ή «πληθυσμούς». Αντίστοιχα, η διακύμανση μεταξύ των κλάσεων δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \sigma_b^2(q) &= P_0(q) \times (\mu_0(q) - \mu_I)^2 + P_1(q) \times (\mu_1(q) - \mu_I)^2 \\ &= \frac{1}{N} [n_0(q) \times (\mu_0(q) - \mu_I)^2 + n_1(q) \times (\mu_1(q) - \mu_I)^2] \end{aligned} \quad (18)$$

και μετρά τις αποστάσεις μεταξύ των μέσων των συστάδων  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  και του συνολικού μέσου  $\mu_I$ . Η συνολική διακύμανση της εικόνας  $\sigma_I^2$  είναι το άθροισμα της διακύμανσης εντός της κλάσης και της διακύμανσης μεταξύ των κλάσεων:

$$\sigma_I^2 = \sigma_w^2(q) + \sigma_b^2(q) \quad (19)$$

Δεδομένου ότι  $\sigma_I^2$  είναι σταθερό για μια δεδομένη εικόνα, το κατώφλι  $q$  μπορεί να βρεθεί είτε ελαχιστοποιώντας τη διακύμανση εντός της κλάσης  $\sigma_w^2$ , είτε της διακύμανσης

μεταξύ των κλάσεων. Η φυσική επιλογή είναι η μεγιστοποίηση επειδή βασίζεται μόνο σε πρώτης τάξης στατιστικά στοιχεία, δηλαδή τους μέσους όρους εντός της κατηγορίας  $\mu_0$  και  $\mu_1$ . Δεδομένου επίσης πως ο συνολικός μέσος  $\mu_I$  μπορεί να εκφραστεί ως το σταθμισμένο άθροισμα τους βάσει της Εξίσωσης 20,

$$\mu_I = \frac{1}{N} [n_0(q) \times \mu_0(q) + n_1(q) \times \mu_1(q)] = \mu_0(K - 1) \quad (20)$$

με  $n_0$  και  $n_1$  να είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε κάθε υποσύνολο και να υπολογίζονται:

$$\begin{aligned} n_0(q) &= |C_0| = \sum_{g=0}^q h(g) \\ n_1(q) &= |C_1| = \sum_{g=q-1}^{K-1} h(g) \end{aligned} \quad (21)$$

και 
$$n_0(q) + n_1(q) = |C_0 \cup C_1| = N$$

τότε η εξίσωση 18 μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \sigma_b^2(q) &= P_0(q) \times P_1(q) \times [\mu_0(q) - \mu_1(q)]^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \times n_0(q) \times n_1(q) \times [\mu_0(q) + \mu_1(q)]^2 \end{aligned} \quad (22)$$

απ' όπου και προκύπτει τελικά το βέλτιστο κατώφλι μεγιστοποιώντας της Εξίσωση 22 και ελαχιστοποιώντας έτσι την 16. Εφόσον οποιαδήποτε από τις δύο κλάσεις είναι κενή δηλαδή ισχύει:  $n_0(q) = 0$  ή  $n_1(q) = 0$ , δηλαδή στην περίπτωση όπου η εικόνα δεν περιέχει εικονοστοιχεία με τιμές  $I(x,y) \leq q$  ή  $I(x,y) > q$ , και άρα το ιστόγραμμα  $h$  είναι κενό είτε κάτω είτε πάνω από το κατώφλι  $q$ , τότε η προκύπτουσα διακύμανση μεταξύ των κλάσεων  $\sigma_b^2(q)$  είναι μηδενική.

Η τοπική εφαρμογή της μεθόδου Otsu, μπορεί να παρέχει περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς σε ενδεχόμενες ανομοιόμορφες συνθήκες φωτισμού ή διαφορετικά χαρακτηριστικά, μπορούν να καθοριστούν διαφορετικές τιμές κατωφλίου είτε με επικαλυπτόμενα παράθυρα (block-based) ή με μη επικαλυπτόμενα/παράθυρα ολίσθησης (sliding window-based) για τη σάρωση της εικόνας. Η επιλογή για το ποια από τις δύο τεχνικές θα χρησιμοποιηθεί έγκειται καθαρά στις ανάγκες της έρευνας καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις μεγάλη σημασία έχει και ο υπολογιστικός χρόνος. Κοινό χαρακτηριστικό τους ωστόσο θεωρείται ότι μικρότερα μεγέθη παραθύρων καταγράφουν περισσότερες λεπτομέρειες αλλά μπορεί να είναι αρκετά ευαίσθητα στο θόρυβο, ενώ μεγαλύτερα μεγέθη



παρέχουν μια πιο εντελώς σφαιρική προοπτική, παραβλέπουν τις τοπικές παραλλαγές και τείνουν περισσότερο σε καθολική εφαρμογή.

Υπολογιστικά για την εφαρμογή της κάθε μεθόδου που αναφέρθηκε, όπως επίσης και των Sauvola, Niblack κ.λπ. στην Python υπάρχουν έτοιμοι αλγόριθμοι σε βιβλιοθήκες και το μοναδικό που χρειάζεται να προσδιοριστεί είναι συνήθως το σχήμα (τετράγωνο, ορθογώνιο, κύκλος, έλλειψη κ.λπ.) του παραθύρου (block) και το μέγεθος του (πόσα εικονοστοιχεία θα περιλαμβάνει), τα οποία αποτελούν διερευνητικό τμήμα αφού απαιτούν πολλαπλές δοκιμές μέχρι να εντοπιστούν οι κατάλληλες τιμές για κάθε εικόνα. Η υλοποίηση του Βήματος 6 στην Python που συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό των δύο μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α ως Διεργασία 3.

#### Βήμα 7: Διόρθωση οπτικών σφαλμάτων εικόνας μέσω αφαίρεσης θορύβου από κατωφλίωση

Από το Βήμα 6 έχει προκύψει μια δυαδική εικόνα με τις δύο κλάσεις να αναπαριστούν με τιμή 0 (μαύρο) το υπόβαθρο και με τιμή 1 (λευκό) τις ρωγμές. Όμως λόγω των όσων έχουν αναφερθεί παραπάνω πολύ αναλυτικά περί θορύβου είναι αναμενόμενο στοιχεία όπως σκιές, αποτυπώματα από ελαστικά και γενικότερα οτιδήποτε αναπαρίσταται στην εικόνα κλίμακας του γκρι με έντονους μαύρους τόνους, να έχουν εντοπιστεί κατά την κατωφλίωση και να συνεχίζουν να δημιουργούν επαναλαμβανόμενο θόρυβο.

Η επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται με πολλαπλούς τρόπους που έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου που έχει κατανεμηθεί από το σύστημα/υπολογιστή στη «λάθος» κατηγορία λόγω παρερμηνείας κατά την κατωφλίωση. Για να εξαλειφθούν τέτοιου είδους προβλήματα γίνεται εκ νέου χρήση κατωφλίωσης, ενώ απαιτείται και σε αυτή την περίπτωση ορθή παρατήρηση της κατωφλιωμένης εικόνας του προηγούμενου Βήματος στο QGIS ώστε να εντοπιστούν αυτές οι «τρύπες» στην εικόνα και να προσδιοριστούν μέσω δοκιμών οι βέλτιστες τιμές κατωφλίων. Τα κατώφλια μπορεί να αποκόπουν τμήματα/συστάδες είτε είναι πολύ μικρά είτε πολύ μεγάλα.

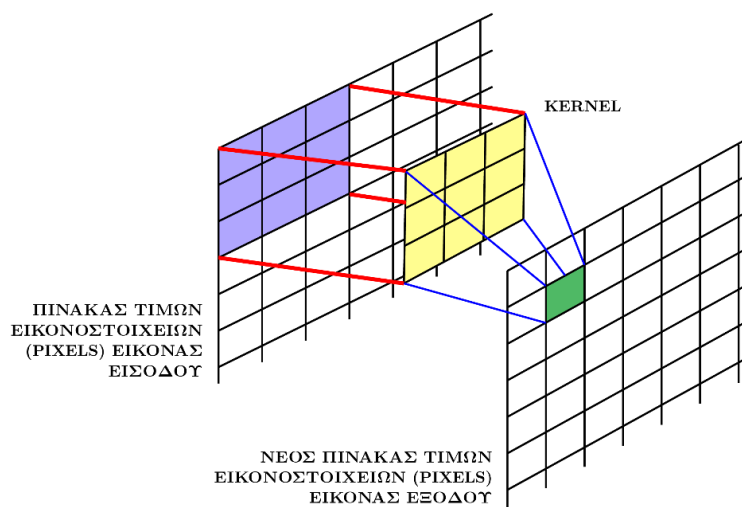
Η γενική διατύπωση του εργαλείου της Python αναφέρει πως η διαδικασία ανήκει στην κατηγορία της μέτρησης (measure) ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών ή περιοχών μέσα στην εικόνα. Περιλαμβάνει πολλών ειδών συναρτήσεις για μετρήσεις όπως το εμβαδόν, η περίμετρος, το κεντροειδές, η εκκεντρότητα και πολλές άλλες. Η ιδιότητα του εργαλείου είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα χρήσης ετικετών (labels), η οποία είναι μια συνάρτηση που αποδίδει κάτι σαν έναν μοναδικό κωδικό σε κάθε χαρακτηριστικό. Αρκετοί θεωρούν

πως το συγκεκριμένο εργαλείο επικεντρώνεται στη μορφολογική ανάλυση και είναι ένα είδος αυτής, ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ισχύει παρόλο της διαφαινόμενης επικάλυψης για ορισμένες συναρτήσεις αφού η ενότητα μέτρησης επικεντρώνεται σε ποσοτικές μετρήσεις περιοχών εικόνας και όχι σε μετασχηματισμούς.

Στο συγκεκριμένο Βήμα επιλέγεται τιμή που θα δείχνει την ανώτερη τιμή αποκοπής τμημάτων με μετρημένο εμβαδό εντός της εικόνας, δηλαδή η νέα δυαδική εικόνα θα είναι απαλλαγμένη από πολύ μικρά στοιχεία που βάσει της παρατήρησης της εικόνας δεν έχουν κάποια χρησιμότητα, εκτός του ότι αποτελούν θόρυβο. Αυτό αποτελεί άρα ένα δεύτερο Βήμα μείωσης του θορύβου της εικόνας που έχει παραμείνει από προηγούμενα Βήματα. Το εμβαδόν συνήθως υπολογίζεται μετρώντας τον αριθμό των εικονοστοιχείων. Η υλοποίηση του βήματος με βάση την Python φαίνεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α ως Διεργασία 4.

#### Βήμα 8: Επεξεργασία εικόνας με μορφολογικούς τελεστές

Η μορφολογική επεξεργασία εικόνας ή απλώς μορφολογία περιγράφει μια σειρά από τεχνικές που ασχολούνται με το σχήμα ή τη μορφή των χαρακτηριστικών μιας εικόνας. Η διαστολή (dilation) και η συστολή (erosion) είναι οι δύο βασικές μορφολογικές λειτουργίες, στις οποίες βασίζεται πληθώρα αλγορίθμων και ορίζονται με βάση την αλληλεπίδραση του δομικού στοιχείου (θεωρείται σύνολο) με ένα σύνολο εικονοστοιχείων της εικόνας (Goyal, 2011). Η εικόνα εισόδου που υποβάλλεται σε επεξεργασία αναφέρεται συνήθως ως ενεργή εικόνα και το δομικό στοιχείο ως πυρήνας (kernel) που έχει σχήμα όπως περιεγράφηκε στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34 – Περιγραφή διαδικασίας εφαρμογής δομικού στοιχείου Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

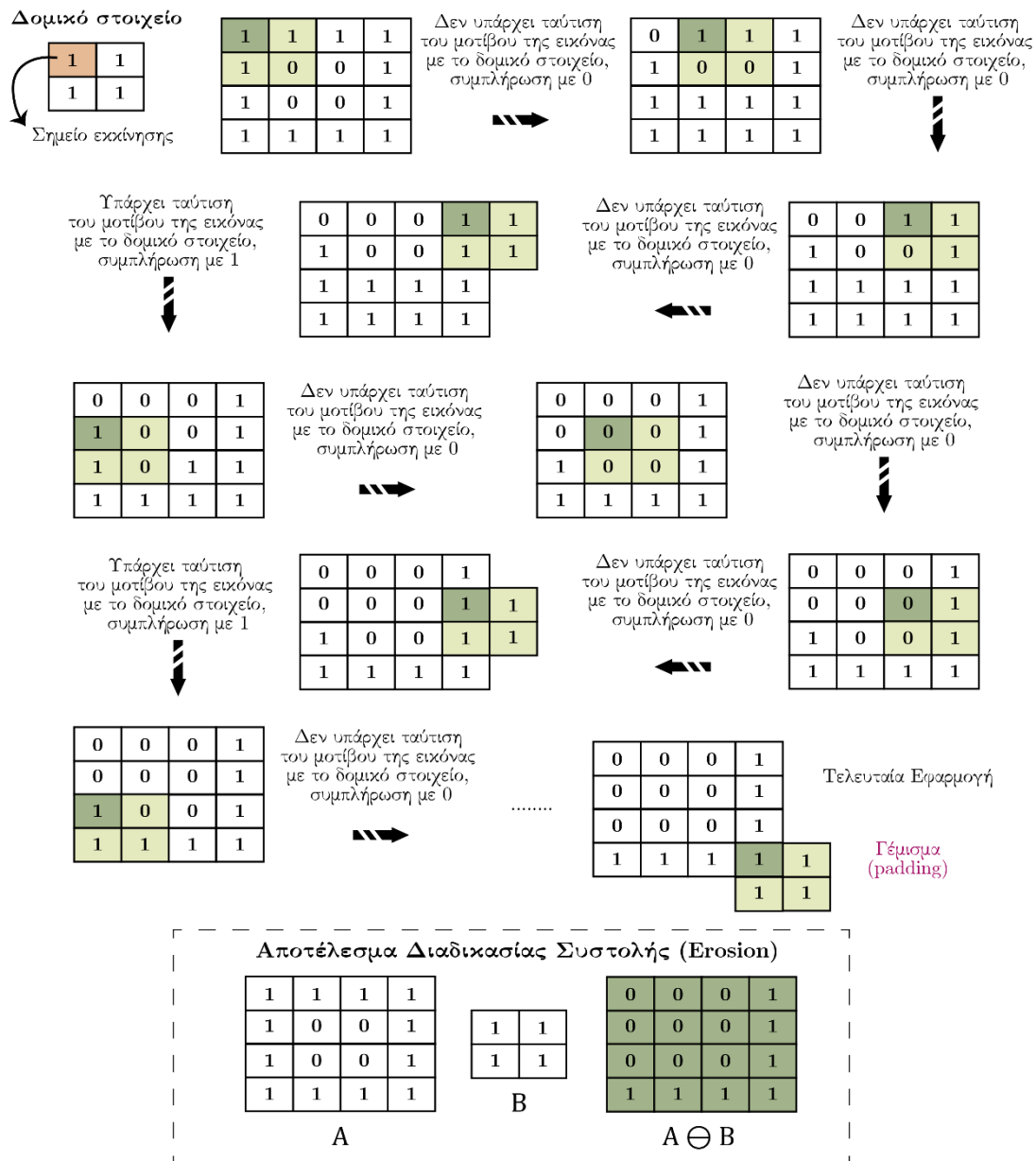
Η συστολή χρησιμοποιείται για τη συρρίκνωση αντικειμένων σε μια εικόνα με την αφαίρεση εικονοστοιχείων από τα όρια του αντικειμένου, όπως ακριβώς ένα φίλτρο τοπικού ελαχίστου (Baskar et al., 2023). Θεωρώντας εικόνα  $I$  και δομικό στοιχείο  $K$  τότε ως συστολή ορίζεται  $I \ominus S$  και βήμα βήμα η διαδικασία περιγράφεται ως εξής στο Σχήμα 35:

- Η διαδικασία ξεκινάει με μια εικόνα  $4 \times 4$  και με ένα δομικό στοιχείο  $2 \times 2$ , όπου τα εικονοστοιχεία του παρασκηνίου αντιπροσωπεύονται με 0 και τα εικονοστοιχεία του προσκηνίου με 1. Το σκιασμένο τετράγωνο του δομικού στοιχείου αναπαριστά το σημείο αναφοράς/εκκίνησης.
- Γίνεται εξέταση του μοτίβου της εικόνας με το δομικό στοιχείο, τοποθετώντας το δομικό στοιχείο πάνω από το πρώτο εικονοστοιχείο της ενεργούς εικόνας. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ταύτιση των τιμών, η τιμή του εικονοστοιχείου δεν θα παραμείνει αμετάβλητη και θα αλλάξει.
- Στη συνέχεια το δομικό στοιχείο μετακινείται όπως φαίνεται μια θέση εικονοστοιχείου δεξιότερα, με τη διαδικασία σύγκρισης και πάλι να βρίσκει διαφορές, οπότε και η τιμή μεταβάλλεται.
- Η διαδικασία είναι επαναληπτική και σκανάρει την εικόνα εισόδου από επάνω αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω μέχρις ότου το δομικό στοιχείο έχει εξετάσει κάθε εικονοστοιχείο. Σε περίπτωση όπου το δομικό στοιχείο είναι εκτός ορίων εικόνας τότε γίνεται γέμισμα (padding) και συνεχίζεται η διαδικασία κανονικά έως ότου εφαρμοστεί το δομικό στοιχείο και στο τελευταίο εικονοστοιχείο της ενεργούς εικόνας.

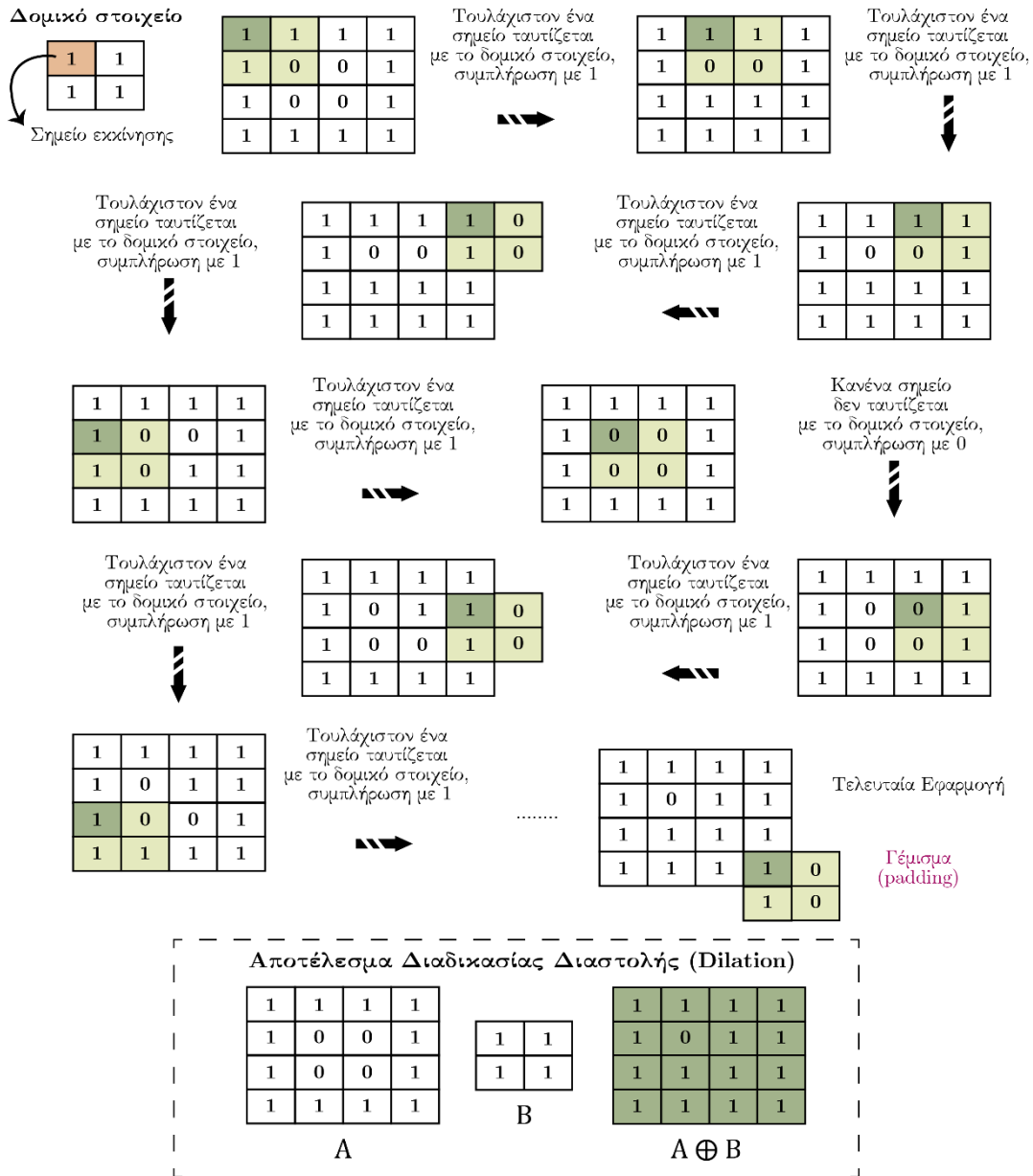
Κατ' αντιστοιχία, η διαδικασία της διαστολής επιτρέπει στα εικονοστοιχεία του προσκηνίου σε μια εικόνα να «μεγαλώσουν» ή να «επεκταθούν». Για μια εικόνα  $I$  και δομικό στοιχείο  $K$  ως διαστολή ορίζεται  $I \oplus S$  και βήμα η διαδικασία περιγράφεται στο Σχήμα 36, παρουσιάζοντας πρακτικά το αντίθετο από αυτό που κάνει η συστολή ως τελεστής.

Πιο συνοπτικά, η διαδικασία συστολής εξετάζει εάν όλα τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου με τιμή 1 βρίσκονται μέσα στη μάσκα, το αποτέλεσμα της πράξης θα είναι 1, διαφορετικά 0. Επομένως το αντικείμενο θα έχει υποστεί συστολή και οι μικρές οπές ή οι ρωγμές θα μεγαλώσουν ενώ μικρά αντικείμενα θα εξαλειφθούν. Για την περίπτωση της διαστολής, εάν ένα ή περισσότερα εικονοστοιχεία του αντικειμένου με τιμή 1 βρίσκονται μέσα στη μάσκα, το αποτέλεσμα της πράξης θα είναι 1, διαφορετικά 0. Επομένως το αντικείμενο θα χαρακτηριστεί ως διασταλμένο και οι μικρές οπές ή οι ρωγμές θα

καλυφθούν και η γραμμή του περιγράμματος θα γίνει ομαλότερη.



Σχήμα 35 – Παράδειγμα εφαρμογής μορφολογικού τελεστή συστολής Πηγή: (Yağmur Çiğdem Aktas, 2021)



Σχήμα 36 - Παράδειγμα εφαρμογής μορφολογικού τελεστή διαστολής Πηγή: (Yağmur Çiğdem Aktas, 2021)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ένα πλεονέκτημα των αυτοτελών αυτών αλγορίθμων είναι πως μπορούν να εφαρμοστούν με επαναληψιμότητα, δηλαδή στην υλοποίηση μέσω της Python υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης ενός αριθμού επανάληψης για κάθε μέθοδο που προσδίδει μεγαλύτερη προσπέλαση εικόνων, αποδοτικότητα και διαχείριση. Στο πλαίσιο της παρούσας μεθοδολογίας χρησιμοποιείται πρώτα διαστολή και στη συνέχεια συστολή δηλαδή κλείσιμο στην εικόνα. Η επιλογή ωστόσο του κλεισίματος έναντι του ανοίγματος γίνεται καθώς το κλείσιμο είναι μια ικανή διαδικασία να γεμιστούν μικρές τρύπες στην εικόνα και ιδίως να βελτιωθούν τα όρια και να συνδεθούν στοιχεία μεταξύ

τους, όπως είναι οι ακανόνιστες κοντινές ρωγμές. Η υλοποίηση του βήματος προγραμματιστικά, φαίνεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α ως Διεργασία 5.

Βήμα 9: Μετατροπή τελικών ψηφιδωτών δεδομένων σε διανυσματικά ως πολύγωνα

Από τη στιγμή που η χωρική πληροφορία διατηρείται σε κάθε εικόνα σε κάθε στάδιο επεξεργασίας των παραπάνω βημάτων και από τη στιγμή που η μεθοδολογία δεν βασίζεται αποκλειστικά σε προγραμματιστικό περιβάλλον αλλά και σε GIS, η μεθοδολογία συνεχίζεται με ένα βήμα μετατροπής της εικόνας (raster) σε διανυσματικό αρχείο πολυγώνου (vector). Η διανυσματοποίηση (vectorization) και η κανονικοποίηση (rasterization), είναι πολύ συνηθισμένα βήματα στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται σε GIS για τη μετατροπή δεδομένων από τη μια μορφή στην άλλη.

Με τη χρήση ενσωματωμένων εργαλείων στο QGIS και πάλι της βιβλιοθήκης GDAL, γίνεται η μετατροπή της εικόνας και πιο συγκεκριμένα της κλάσης με τιμή 1 που αναπαριστά τις ρωγμές, σε πολύγωνα. Η διαδικασία αναπαρίσταται στο Σχήμα 37, ενώ συνολικά μια τέτοια μετατροπή είναι χρήσιμη κυρίως για 1) καλύτερη και πιο λεπτομερή ανάλυση και επεξεργασία των αντικειμένων που έχουν εντοπιστεί ώστε με κατάλληλες ενέργειες να ενσωματωθούν/εκχωρηθούν νέα δεδομένα από άλλες βάσεις δεδομένων, 2) οπτικοποίηση, 3) διαχείριση και τροποποίηση εάν πρέπει να τηρηθούν κάποια κριτήρια.

Η τροποποίηση μπορεί να δράσει και σαν ένα μέτρο απλοποίησης και θα μπορούσε να αποτελεί εναλλακτική του Βήματος 7, βάσει κριτηρίων εμβαδού, περιμέτρου κ.λπ. Η διαχείριση από την άλλη είναι σημαντική καθώς κάθε ρωγμή γίνεται ένα ξεχωριστό πολύγωνο, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους όπως το πλάτος, ο προσανατολισμός ή η συνδεσιμότητα. Επιπλέον, ως προς τη διαχείριση μπορούν να εφαρμοστούν όλες οι μέθοδοι χωρικής ανάλυσης ώστε να εντοπιστούν συστάδες, να εξαχθεί στατιστικά σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή να αναλυθεί η κατανομή των ρωγμών σε διάφορες περιοχές που θα βοηθήσει στην κατανόηση της έκτασης και της σοβαρότητας των ζημιών από ρωγμές, στην ιεράρχηση των προσπαθειών συντήρησης και αποκατάστασης ή στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων επισκευής.

Επειδή όμως τα πολύγωνα που έχουν εισαχθεί βασίζονται στα εικονοστοιχεία, καθώς ο αλγόριθμος μετατροπής δεν μπορεί να παρακάμψει τα όρια τους και να απλοποιήσει με μια ομαλοποίηση τις γραμμές, πρέπει να εφαρμοστεί μια διαδικασία εξομάλυνσης των περιμετρικών περιγραμμάτων. Η διαδικασία είναι απλή, είναι τις περισσότερες φορές συνεπακόλουθο Βήμα της μετατροπής των ψηφιδωτών δεδομένων σε διανυσματικά και

εφαρμόζεται ταχέως στο περιβάλλον του GIS.



Σχήμα 37 - Παράδειγμα διανυσματοποίησης Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

Βήμα 10: Μετατροπή διανυσματικών δεδομένων από πολύγωνα σε γραμμές με σκελετοποίηση και ομαλοποίηση

Το αμέσως επόμενο βήμα είναι η μετατροπή των πολυγώνων σε γραμμές. Οι λόγοι της μετατροπής αυτής είναι κυρίως για τη γραμμική αναπαράσταση των ρωγμών καθώς παρόλο που τα πολύγωνα αναπαριστούν τη συνολική έκταση της περιοχής της ρωγμής, οι γραμμές αποτυπώνουν την πραγματική διαδρομή της ρωγμής με μεγαλύτερη ακρίβεια και επιτρέπουν πιο εύκολα να προσδιοριστεί το μήκος. Σημαντικό επίσης είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί και ανάλυση του δικτύου των ρωγμών υπό το πρίσμα της απόστασης της ρωγμής από άλλα χαρακτηριστικά της ανωδομής ή διαφόρων στοιχείων όπως οι δέστρες ή τα κατακόρυφα μέτωπα και υπό την πιθανότητα διασταύρωσης τμημάτων ρωγμών προκειμένου στη συνέχεια να συσχετιστούν οι ρωγμές με πιθανές αιτίες πρόκλησής τους και να ληφθούν κατάλληλα μέτρα αποφυγής της διάδοσής τους.

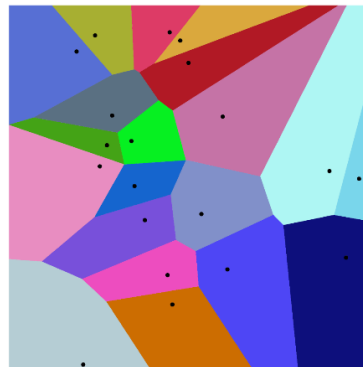
Κάτι εξίσου σημαντικό είναι το θέμα οπτικοποίησης καθώς η μετατροπή των πολυγώνων σε γραμμές βελτιώνει την οπτική αναπαράσταση, διευκολύνοντας τον εντοπισμό και την κατανόηση των μοτίβων ρωγμών και των χωρικών τους σχέσεων. Εκτός αυτού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές συμβολισμού γραμμών για να τονιστούν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως η σοβαρότητα ή ο τύπος της ρωγμής, βελτιώνοντας την οπτική μετάδοση των πληροφοριών για τις ρωγμές.

Για να γίνει η εν λόγω μετατροπή θα χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος σκελετοποίησης μέσω του ενσωματωμένου εργαλείου της GRASS GIS εντός του περιβάλλοντος του QGIS. Αρχικά, η GRASS GIS (GRASS Development Team, 2023), προκύπτει από τα αρχικά Geographic Resources Analysis Support System δηλαδή είναι ένα σύστημα υποστήριξης ανάλυσης γεωγραφικών πόρων που έχει κατασκευαστεί βάσει των αρχών των GIS και αποτελεί Ελεύθερο Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα. Η GRASS

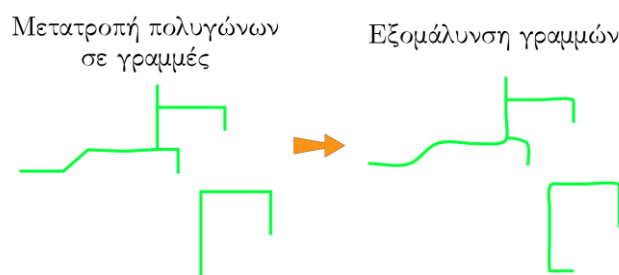
παρέχει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων κατηγοριοποιημένων σε πάνω από 500 ενότητες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς γεωχωρικής ανάλυσης, όπως η ανάλυση διανυσματικών και ψηφιδωτών δεδομένων, η διαχείριση βάσεων δεδομένων και τρισδιάστατων δεδομένων, η μοντελοποίηση, η ανάλυση χρονοσειρών, η επεξεργασία εικόνας κ.λπ.

Ο αλγόριθμος σκελετοποίησης (skeletonize) επεξεργάζεται τη γεωμετρία του πολυγώνου για να καθορίσει τη γραμμή που αναπαριστά καλύτερα την κεντρική του γραμμή. Αυτό το πραγματοποιεί αφού εκτελέσει τη διαδικασία εύρεσης των διαγράμμάτων Voronoi (Σχήμα 38) κατά την οποία γίνεται διαμερισμός του χώρου και τελικώς ο αλγόριθμος εξάγει το μεσαίο άξονα, ο οποίος αντιπροσωπεύει την κεντρική γραμμή ή το σκελετό των πολυγώνων.

Η εφαρμογή ενός τέτοιου εργαλείου (Σχήμα 39) είναι επωφελής καθώς μπορεί να βελτιώσει την οπτική τους εμφάνιση εξαλείφοντας τις οδοντωτές άκρες και τις ανωμαλίες και να μειώσει περιττή πληροφορία και θόρυβο, να αφαιρέσει παραλλαγές μικρής κλίμακας και να τονίσει τις κύριες τάσεις αφήνοντας αναλλοίωτα βασικά χαρακτηριστικά των γραμμών. Ωστόσο, ο βαθμός και η έκταση της εξομάλυνσης πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά, καθώς η υπερβολική εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σημαντικών λεπτομερειών ή να παραμορφώσει το αρχικό σχήμα του σκελετού.



Σχήμα 38 – Παράδειγμα διαγράμματος Voronoi Πηγή: Ιδία Επεξεργασία



Σχήμα 39 – Παράδειγμα μετατροπής σε γραμμές και εξομάλυνσης Πηγή: Ιδία Επεξεργασία



Βήμα 11: Παρουσίαση, οπτικοποίηση και επικύρωση αποτελεσμάτων και εξαγωγή στατιστικών στοιχείων για επιλεγμένες ρωγμές

Στο τελευταίο αυτό Βήμα γίνεται η παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων εντοπισμού των ρωγμών με υπέρθεση των διανυσματικών δεδομένων (γραμμές που έχουν εξομαλυνθεί) και των Ορθοφωτοχαρτών και των ρωγμών όπως ανιχνεύτηκαν από το μοντέλο της μεθοδολογίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, από το Βήμα 4 έχουν ψηφιοποιηθεί οι ρωγμές και διατηρούνται σε ένα διανυσματικό αρχείο, το οποίο και θα αποτελέσει τη βάση σύγκρισης της πραγματικότητας με τις εξαγόμενες ρωγμές από τη μεθοδολογία. Στο συγκεκριμένο βήμα πραγματοποιούνται επιπλέον τρεις (3) διεργασίες:

- Υπολογισμός μήκους ρωγμών
- Υπολογισμός πλάτους ρωγμών
- Επιλογή τμημάτων των πλακών σκυροδέματος της ανωδομής λιμένα για επικύρωση (validation) αποτελεσμάτων

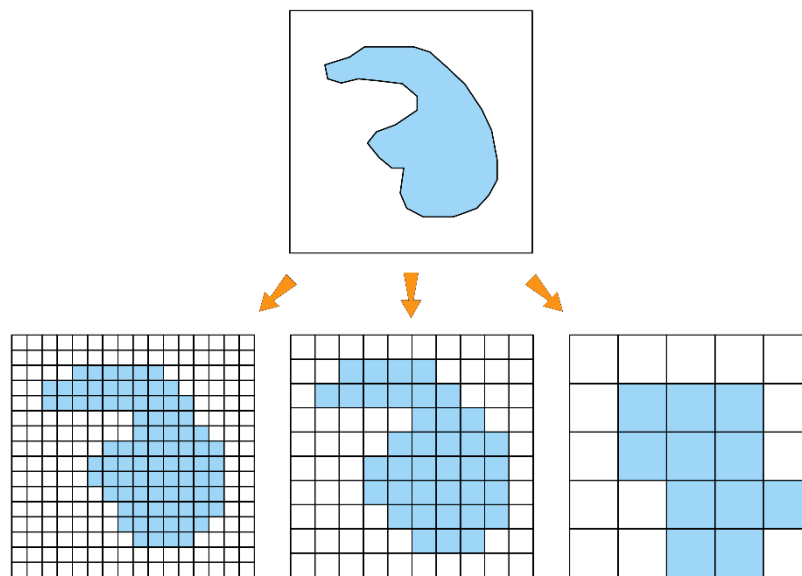
Ο υπολογισμός του μήκους των γραμμικών στοιχείων και για τις πραγματικές ρωγμές και για τις ρωγμές που ανιχνεύτηκαν από τη μεθοδολογία γίνεται μέσα στο περιβάλλον του QGIS. Σχετικά με το πλάτος, ο υπολογισμός είναι λίγο πιο σύνθετος και πραγματοποιείται με τη χρήση διατομών ανά σημείο αλλαγής κατεύθυνσης της ρωγμής. Για την οριοθέτηση των διατομών χρησιμοποιείται το θεματικό επίπεδο (layer) του εξομαλυσμένου πολύγωνου από το Βήμα 9.

Για το πλάτος των ρωγμών, βιβλιογραφικά παρατηρείται ερευνητική προσπάθεια επίλυσης ορισμένων ζητημάτων σε μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για την προσέγγιση των υπολογισμών και την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και μείωση των σφαλμάτων. Όλες οι έρευνες συντείνουν στο συμπέρασμα πως η αύξηση της απόστασης απεικόνισης μειώνει τη χωρική ανάλυση των εικόνων και συνεπώς η μείωση του αριθμού των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των ρωγμών μειώνει την ακρίβεια της μέτρησης γενικά και ειδικότερα του πλάτους (Cho et al., 2018; Jahanshahi et al., 2013; Li et al., 2014). Από την πλευρά του ο Nyyssonen (1977) επισημαίνει στην ερευνά του πως και οι τιμές κατωφλίου είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες για το ακριβές πλάτος μιας γραμμής.

Για την επικύρωση η μέθοδος που ακολουθείται είναι η σύγκριση δυο ψηφιδωτών (raster) αρχείων, δηλαδή δύο εικόνες που αναπαριστούν ακριβώς το ίδιο τμήμα ως προς την αποτύπωση των ρωγμών της πραγματικότητας και ως προς το μοντέλο της μεθοδολογίας. Για το μοντέλο υπάρχει ήδη διαθέσιμη η πληροφορία από την εικόνα του

αποτελέσματος μετά τη χρήση μορφολογικών τελεστών (Βήμα 8) και απλώς απαιτείται μια περικοπή της εξεταζόμενης περιοχής.

Για την αντίθετη περίπτωση απαιτείται πρωτίστως η οριοθέτηση κάθε ρωγμής ως πολύγωνο και στη συνέχεια ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία του Βήματος 9. Η διαδικασία για να γίνει ομαλά είναι αναγκαίο να βρεθεί η χωρική ανάλυση κάθε Ορθοφωτοχάρτη από τη στιγμή που η έρευνα στηρίζεται σε δεδομένα διαφορετικών χρονικών περιόδων και διαφορετικών χαρακτηριστικών πτήσης και συνεπώς εικόνας, έτσι ώστε να είναι το μέγεθος των εικονοστοιχείων της εικόνας εξόδου ίδιο και να συγκριθούν αποτελεσματικά. Πρακτικά δηλαδή πρέπει να αποφευχθεί αυτό που αναπαρίσταται στο Σχήμα 40 και να μην συγκριθούν ανόμοιες εικόνες ως προς τα εικονοστοιχεία.



Σχήμα 40 – Σχήμα αναπαράστασης διαδικασίας μετατροπής από διανυσματικό σε ψηφιδωτό αρχείο με 3 διαφορετικά μεγέθη εικονοστοιχείων

Στη συνέχεια και με δεδομένο ότι πλέον υπάρχουν 2 δυαδικές εικόνες με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά σε διαστάσεις και μέγεθος εικονοστοιχείων, πρέπει να συγκριθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, δηλαδή το αν κάθε εικονοστοιχείο είτε κλάσης 0 (μη ρωγμή) είτε κλάσης 1 (ρωγμή) έχει κατηγοριοποιηθεί ορθά. Η σύγκριση αυτή ως διαδικασία αναφέρεται ως επικύρωση/επαλήθευση (validation) και περιλαμβάνει τη σύνθεση ενός πίνακα τιμών που ονομάζεται πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) και τη χρήση κάποιων μετρικών. Η επικύρωση αποτελεί συνηθισμένη διαδικασία στη μηχανική μάθηση και στις ταξινομήσεις (classification) καθώς παρέχει τη δυνατότητα να κατανοηθεί η ποιότητα ενός μοντέλου ή να συγκριθούν μεταξύ τους μεθοδολογίες.

Ο πίνακας σύγκρισης είναι ένας πίνακας  $n \times n$  διαστάσεων, με πληροφορίες σχετικά με τις προβλέψεις ενός μοντέλου ταξινόμησης, έναντι των πραγματικών παρατηρήσεων με βάση τα δεδομένα (Obi, 2023), όπου το  $(i,j)$  στοιχείο του ισούται με το πλήθος των σημείων που, ενώ προέρχονται από την κλάση  $i$ , καταχωρούνται στην κλάση  $j$ . Πρακτικά δηλαδή δίνει πληροφορίες σχετικά με το αν κάποιες κλάσεις έχουν τη τάση να συγχέονται με κάποιες άλλες. Ένας πίνακας  $2 \times 2$  περιλαμβάνει τέσσερα (4) στοιχεία/τιμές με εκείνα που βρίσκονται στην πράσινη διαγώνιο στο Σχήμα 41 να αντιπροσωπεύουν τις σωστές προβλέψεις ενώ αυτά στην κόκκινη διαγώνιο υποδηλώνουν τις λανθασμένες. Αναλυτικότερα : 1) εάν το δείγμα είναι θετικό και ταξινομείται ως θετικό τότε θεωρείται αληθώς θετικό (True Positive), ενώ εάν ταξινομηθεί ως αρνητικό, θεωρείται ψευδώς αρνητικό (False Negative) ή σφάλμα τύπου II, 2) εάν το δείγμα είναι αρνητικό και ταξινομηθεί ως αρνητικό, θεωρείται ως αληθώς αρνητικό (True Negative), ενώ εάν ταξινομηθεί ως θετικό, θεωρείται ψευδώς θετικό (False Positive) ή σφάλμα τύπου I.

Μέσω του πίνακα σύγκρισης μπορούν να υπολογιστούν επιπλέον τα εξής: α) ευαισθησία (sensitivity), β) εξειδίκευση (specificity), γ) ποσοστό ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων (false-positive rate), δ) ποσοστό ψευδώς αρνητικών αποτελεσμάτων (false-negative rate), ε) θετική προγνωστική αξία (positive predictive value), στ) αρνητική προγνωστική αξία (negative predictive value), ζ) ακρίβεια (accuracy) και η) βαθμολογία/μέτρο F1 (F1 score) με το τυπολόγιό τους (Σχήμα 41) να δίνεται αναλυτικά στην έρευνα των Tharwat (2020) και των Erickson and Kitamura (2021).

Η επεξήγηση για τις χρησιμοποιημένες μετρικές στην παρούσα διπλωματική εργασία παρατίθενται στη συνέχεια.

- Ευαισθησία (Sensitivity): μετρά το ποσοστό των πραγματικών θετικών περιπτώσεων που αναγνωρίζονται σωστά από το μοντέλο της μεθοδολογίας. Μια υψηλή ευαισθησία υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι καλό στο σωστό εντοπισμό θετικών περιπτώσεων, ελαχιστοποιώντας τα ψευδώς αρνητικά.
- Εξειδίκευση (Specificity): μετρά το ποσοστό των πραγματικών αρνητικών περιπτώσεων που αναγνωρίζονται σωστά από το μοντέλο. Μια υψηλή εξειδίκευση υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι καλό στο σωστό εντοπισμό αρνητικών περιπτώσεων, ελαχιστοποιώντας τα ψευδώς θετικά αποτελέσματα.
- Ακρίβεια (Precision): μετρά το ποσοστό των προβλεπόμενων θετικών περιπτώσεων που είναι πραγματικά θετικές. Μια υψηλή ακρίβεια υποδηλώνει ότι το μοντέλο έχει χαμηλό ποσοστό ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων.
- Αρνητική προγνωστική αξία (Negative Predictive Value): μετρά το ποσοστό

των προβλεπόμενων αρνητικών περιπτώσεων που είναι πραγματικά αρνητικές. Μια υψηλή NPV υποδηλώνει ότι το μοντέλο έχει χαμηλό ποσοστό ψευδώς αρνητικών.

- Ακρίβεια (Accuracy): μετρά τη συνολική ορθότητα των προβλέψεων του μοντέλου και μια υψηλή τιμή της υποδηλώνει ότι οι προβλέψεις συνολικά είναι ορθές. Ωστόσο, η ακρίβεια μπορεί να είναι παραπλανητική εάν το σύνολο δεδομένων είναι ανισόρροπο, δηλαδή η μία κλάση είναι πολύ πιο διαδεδομένη από την άλλη.
- Βαθμολογία/μέτρο F1 (F1 score): συνδυάζει την ακρίβεια και την ανάκληση (recall, επεξήγηση στο Σχήμα 41) σε μια ενιαία μετρική που εξισορροπεί και τα δύο μέτρα. Κυμαίνεται από 0 έως 1, όπου το 1 αντιπροσωπεύει την καλύτερη απόδοση. Μια υψηλή βαθμολογία F1 υποδεικνύει ότι το μοντέλο έχει τόσο καλή ακρίβεια όσο και ανάκληση.
- Ποσοστό σφάλματος (Error rate): επίσης γνωστό ως ποσοστό λανθασμένης ταξινόμησης, είναι ένα μέτρο του πόσο συχνά το μοντέλο κάνει λανθασμένες προβλέψεις. Υπολογίζει το ποσοστό των λανθασμένα ταξινομημένων περιπτώσεων (ψευδώς θετικές και ψευδώς αρνητικές) επί του συνολικού αριθμού των περιπτώσεων και ένα χαμηλότερο ποσοστό σφάλματος είναι επιθυμητό δείχνοντας έτσι την απόδοση του μοντέλου.

Τέλος, η υλοποίηση του Βήματος προγραμματιστικά, φαίνεται στον κώδικα του Παραρτήματος Α ως Διεργασία 6, ενώ στα δύο Σχήματα που ακολουθούν γίνεται μια σύνοψη των βημάτων της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Το Σχήμα 42 είναι το οργανόγραμμα της μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας με όλα τα βήματα σε GIS και Python (του δεύτερου τμήματος της γενικής μεθοδολογίας -Σχήμα 23- δηλαδή μετά την απόκτηση δεδομένων και την προ-επεξεργασία με Φωτογραμμετρία) ενώ το Σχήμα 43 έχει τη λογική του Διαγράμματος Ροής (Flowchart/Pipeline) όλων των προγραμματιστικών βημάτων που γίνονται στο περιβάλλον του Spyder με υλοποιήσεις αλγορίθμων της Python.

		Πρόβλεψη (Predicted Class)		
		Σωστό Positive	Λάθος Negative	
Πραγματική (Actual Class)	Σωστό Positive	Αληθώς Θετικά True Positive TP	Ψευδώς Αρνητικά False Negative FN Σφάλμα τύπου 2	Sensitivity $\frac{TP}{(TP+FN)}$ ή Recall κλάσης 1
	Λάθος Negative	Ψευδώς Θετικά False Positive FP Σφάλμα τύπου 1	Αληθώς Αρνητικά True Negative TN	Specificity $\frac{TN}{(TN+FP)}$ ή Precision κλάσης 0
		Precision $\frac{TP}{(TP+FP)}$	Negative Predictive Value $\frac{TN}{(TN+FN)}$ ή Recall κλάσης 0	Accuracy $\frac{TP+TN}{(TP+TN+FP+FN)}$

f1-score	$2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$
----------	---

f-avg	$\frac{f1-score (κλάση 0) + f1-score (κλάση 1)}{2}$
-------	---

error rate	$\frac{FP+FN}{(TP+TN+FP+FN)} = 1 - Accuracy$
------------	--

Σχήμα 41 – Πίνακας Σύγκρισης και Μετρικές Πηγή: Ίδια Επεξεργασία

## Μεθοδολογία Ανάλυσης Εικόνας για ανίχνευση ρωγμών με εργαλεία GIS και Python



Ορισμός περιοχής μελέτης και επιλογή πλάκας σκυροδέματος μέσω αποκοπής από τον αρχικό Ορθοφωτοχάρτη



Μετατροπή της νέας RGB εικόνας σε κλίμακα του γκρι (grayscale)



Εφαρμογή διάμεσου φίλτρου (median filter) στην εικόνα κλίμακας του γκρι



Ενδεδειγμένος έλεγχος της φιλτραρισμένης εικόνας για τον οπτικό εντοπισμό ρωγμών και ψηφιοποίηση αυτών



Οριοθέτηση πολυγώνου (ζώνης ρωγμών) που καλύπτει τις προς μελέτη ρωγμές και δημιουργία νέας εικόνας εισόδου



Εφαρμογή κατάτμησης της εικόνας με την μέθοδο της τοπικής κατωφλίωσης Otsu και την προσαρμοστική (Local Threshold) και επιλογή βέλτιστου αποτελέσματος



Διόρθωση οπτικών σφαλμάτων εικόνας μέσω αφαίρεσης θορύβου παραγόμενου από την κατωφλίωση, με εκ νέου χρήση κατωφλίου εμβαδού για αποκοπή τμημάτων



Επεξεργασία εικόνας με τελεστές/πράξεις μαθηματικής μορφολογίας (συστολή-erosion και διαστολή-dilation)



Εντοπισμός ρωγμών στην δυαδική (binary) εικόνα και μετατροπή ψηφιδωτών (raster) δεδομένων ρωγμών σε διανυσματικά (vectors) ως πολύγωνα και ομαλοποίηση (smooth)



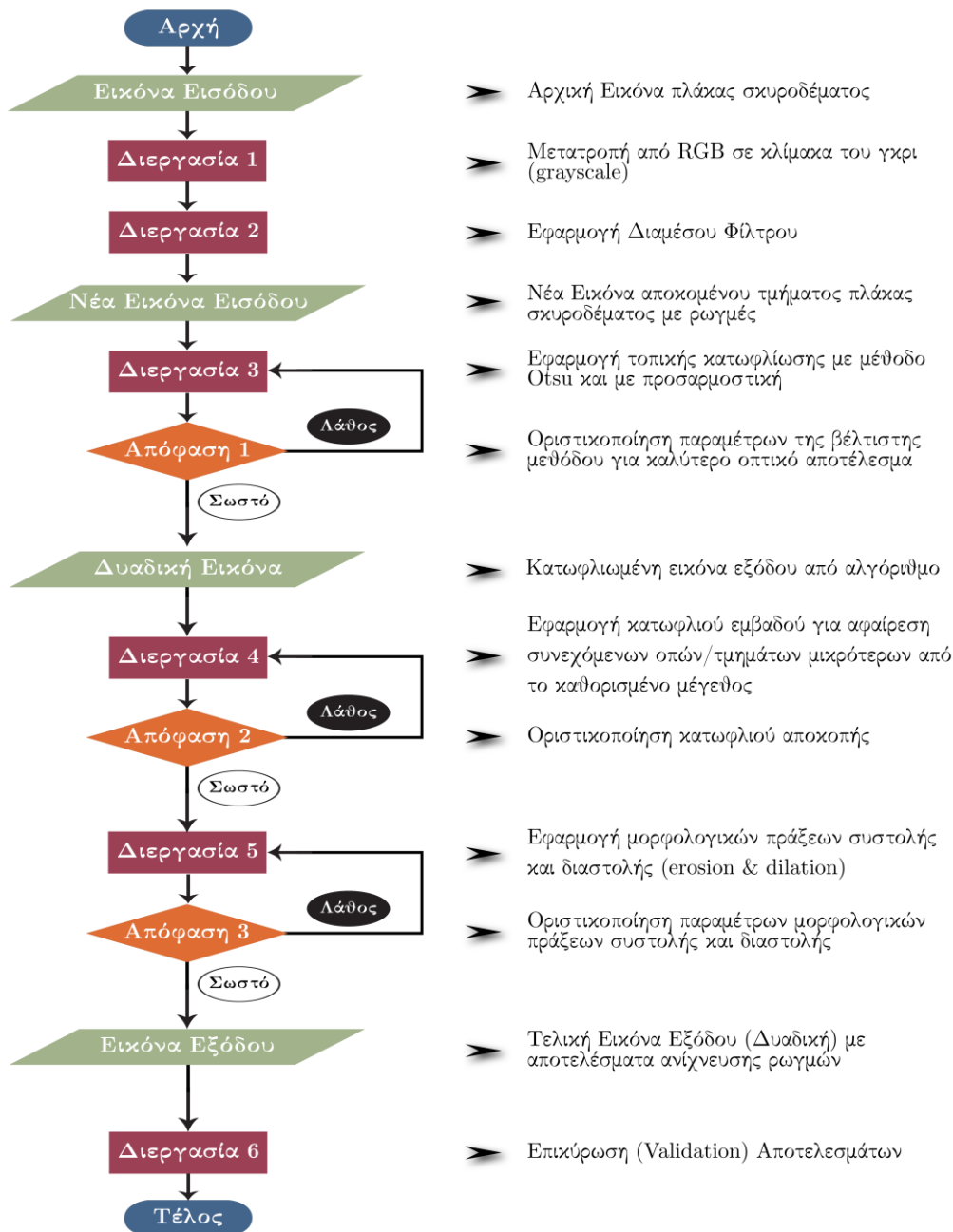
Μετατροπή διανυσματικών δεδομένων (vectors) από πολύγωνα σε γραμμές με αλγόριθμο σκελετοποίησης (skeletonize) και ομαλοποίησης (smooth)



Παρουσίαση και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων, εξαγωγή στατιστικών στοιχείων για τις επιλεγμένες ρωγμές και επικύρωση αποτελεσμάτων

Σχήμα 42 – Μεθοδολογία Ανάλυσης Εικόνας για ανίχνευση ρωγμών με εργαλεία GIS και Python Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

### Διάγραμμα Ροής Βημάτων Προγραμματισμού (Python) για την Ανάλυση Εικόνας



Σχήμα 43 - Διάγραμμα Ροής Βημάτων Προγραμματισμού (Python) για την Ανάλυση Εικόνας Πηγή: Ιδία Επεξεργασία





# 4

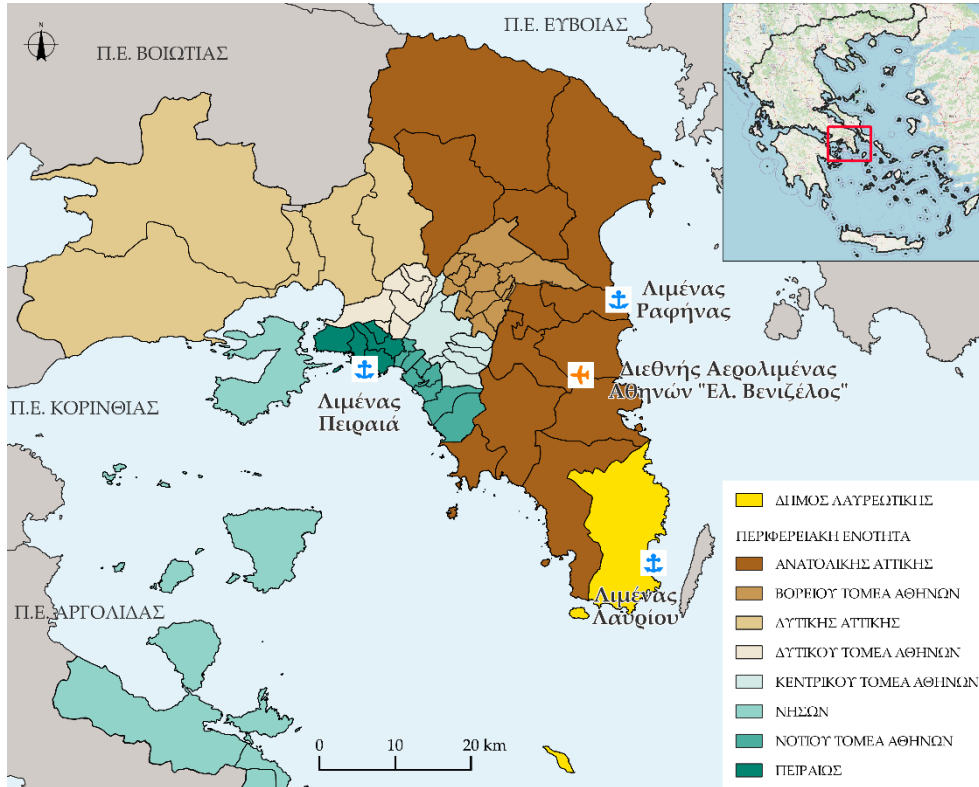
## Μελέτη Περίπτωσης – Λιμένας Λαυρίου

### 4.1 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνεται ως μελέτη περίπτωσης οι υφιστάμενες λιμενικές υποδομές του Λιμένα Λαυρίου και ειδικότερα τα τμήματα των πλακών σκυροδέματος του τερματικού σταθμού ακτοπλοΐας.

Το λιμάνι του Λαυρίου γεωγραφικά βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Περιφέρειας Αττικής, στην Π.Ε. Ανατολικής Αττικής και πιο συγκεκριμένα στο Δήμο Λαυρεωτικής. Απέχει οδικώς 60 χλμ. από το κέντρο της Αθήνας, 53 χλμ. από το λιμάνι της Ραφήνας, 65 χλμ. από το λιμάνι του Πειραιά και περίπου 35 χλμ. από το Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος».

Η Δήμος Λαυρεωτικής αποτελείται από τις Δημοτικές Ενότητες Λαυρεωτικής, Αγίου Κωνσταντίνου και Κερατέας και σύμφωνα με την παλιά οριοθέτηση του (μόνο Δ.Ε. Λαυρεωτικής) από το Πρόγραμμα «Καποδίστριας» κάλυπτε σε μήκος περίπου 15 χλμ., ενώ με το Πρόγραμμα «Καλλικράτης» η ακτογραμμή πλέον αγγίζει τα 63 χλμ. σε ένα μέτωπο που εκτείνεται λίγο μετά από τη θέση Χειλίστρα έως και τη θέση Χάρακας. Η έκταση του Δήμου είναι 176.87 km<sup>2</sup> ενώ ο πληθυσμός βάσει της Απογραφής του 2021 είναι 25199 κάτοικοι (Ελληνική Στατιστική Αρχή ΕΛΣΤΑΤ, 2023).



Εικόνα 4 - Θέση του Δήμου Λαυρεωτικής και του Λιμένα Λαυρίου στην Αττική Πηγή: Ιδία Επεξεργασία



Εικόνα 5 - Μεταφορικές Υποδομές σύνδεσης του Λιμένα Λαυρίου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

#### 4.1.1 Λιμένας Λαυρίου

Ο λιμένας Λαυρίου είναι χαρακτηρισμένος ως Λιμάνι Εθνικής & Διεθνούς εμβέλειας σύμφωνα με την ΚΥΑ Αριθμ.8315.2/02/07 και αποτελεί μαζί με άλλα πέντε λιμάνια της χώρας τμήμα του δευτερεύοντος Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών (Μαραγκουδάκης, 2018). Ο λιμένας είναι μικτής χρήσης, όπως και η πλειονότητα των ελληνικών λιμένων, με τις χρήσεις του να περιλαμβάνουν την ακτοπλοϊκή συγκοινωνία προς τα νησιά του Αιγαίου, εμπορικές δραστηριότητες γενικού φορτίου μέσω πλοίων Ro-Ro, ελλιμενισμό αλιευτικών και τουριστικών σκαφών (yachting), όπως επίσης και ελλιμενισμό κρουαζιερόπλοιων, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια το λιμάνι αποτελεί Home Port κρουαζιέρας μικρού και μεσαίου μεγέθους πλοίων, αποφέροντας σημαντικά κέρδη στην ευρύτερη περιοχή.

Στις Εικόνες 6 και 7, φαίνεται ο λιμένας Λαυρίου από 2 διαφορετικές πανοραμικές λήψεις.



Εικόνα 6 - Λιμένας Λαυρίου (ανατολική λήψη) Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023)



Εικόνα 7 - Λιμένας Λαυρίου (δυτική λήψη) Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023)

Στην Εικόνα 8 φαίνεται η κάτοψη του Λιμένα όπως απεικονίζεται από το εργαλείο Google Earth, καθώς και οι χρήσεις του ανά τμήμα. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ταυτόχρονα και η οριογραμμή της χερσαίας λιμενικής ζώνης, όπως αυτή προέκυψε βάσει των αποφάσεων (Απόφαση Αριθμ.3413.30/03/01):

- Την αριθμ.34/2001 πράξη της Λιμενικής Επιτροπής Λαυρίου και τα τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:2000 «Επέκταση-τροποποίηση Χερσαίας Ζώνης Λιμένος Λαυρίου»
- Την αριθμ.40/2000 πράξη της Λιμενικής Επιτροπής Λαυρίου και το τοπογραφικό διάγραμμα κλίμακας 1:2000 της 28/6/2000 που εγκρίθηκαν με την αριθμ.08/Δ.Τ.Α./15993/8.8.2000 απόφαση του Διευθυντή της Τοπικής Αυτοδιοίκησης και Διοίκησης Ανατολικής Αττικής «Εξομοίωση χώρων με ζώνη λιμένα-λιμενίσκου Λεγρενών»
- Την αριθμ.41/2000 πράξη της Λιμενικής Επιτροπής Λαυρίου και το τοπογραφικό διάγραμμα κλίμακας 1:2000 της 31/7/2000 που εγκρίθηκαν με την αριθμ.08/Δ.Τ.Α./15992/8.8.2000 απόφαση του Διευθυντή της Τοπικής Αυτοδιοίκησης και Διοίκησης Ανατολικής Αττικής «Εξομοίωση χώρων με ζώνη λιμένα-λιμενίσκου Βρομοπουσίου»
- Συμπληρωματικά, την αριθμ.06/13-4-2006 απόφαση της Επιτροπής Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Λιμένων (Ε.Σ.Α.Λ.) «Επικαιροποίηση της Μελέτης Χωροταξικής Οργάνωσης του Γενικού Προγραμματικού Σχεδίου

(Master Plan) Λιμένα Λαυρίου-Τροποποίηση Ρυμοτομικού Σχεδίου στην περιοχή των Οικοδομικών Τετραγώνων 1, 2 και 3»



Εικόνα 8 - Χρήσεις Λιμένα Λαυρίου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Η λιμενική ζώνη όπως γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 8 σχεδόν ταυτίζεται με την παραλιακή ζώνη και εκτείνεται ως τα όρια του πολεοδομικού ιστού της πόλης του Λαυρίου. Στην σύμβαση παραχώρησης που υπογράφηκε στις 30-12-2002 μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και του «Οργανισμού Λιμένος Λαυρίου Ανώνυμη Εταιρεία» (ΟΛΛ Α.Ε.), ορίζεται πως ο ΟΛΛ είναι υπεύθυνος για την εκμετάλλευση των εγκαταστάσεων του λιμένα Λαυρίου έναντι μισθώματος για 40 έτη.

Επιπλέον, μια πρόσφατη αναβάθμιση του λιμένα είναι η έγκριση του πρώτου Υδάτινου Πεδίου κατόπιν αίτησης που υπέβαλε ο «Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου Α.Ε.» στο Γενικό Επιτελείο Ναυτικού (ΓΕΝ), η οποία και εγκρίθηκε αρμοδίως από το ΓΕΝ σε συνεργασία με τη Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας (ΑΠΑ) και το Υπουργείο Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής. Ο στόχος είναι το Υδάτινο Πεδίο να εξυπηρετήσει ανάγκες μετακίνησης τουριστών αλλά και κατοίκων της ευρύτερης περιοχής του Λαυρίου προς τα νησιά, κυρίως, των Κυκλάδων, δημιουργώντας τη θετική συνέργεια κρουαζιερόπλοιων με υδροπλάνα για

περιγηγητικές πτήσεις (Sightseeing flights) (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023). Η εν λόγω έγκριση παρέχει τη δυνατότητα στο λιμένα Λαυρίου να πραγματοποιούνται βάσει νόμου καθημερινά μέχρι έξι ζεύγη πτήσεων (προσθαλάσωση – αποθαλάσωση), ανά αεροπορική εταιρεία υδροπλάνων ενώ πολύ σημαντικό είναι πως επιτρέπεται η επιπλέον εκτέλεση πτήσεων γενικής αεροπορίας, αεροδιακομιδής, πυρόσβεσης και έρευνας & διάσωσης, από και προς των υπόλοιπων αδειοδοτημένων Υδατοδρομιών ή και χερσαίων αεροδρόμιων (με τη χρήση αμφίβιων υδροπλάνων) (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023).

#### 4.1.2 Υφιστάμενες Υποδομές

Οι υποδομές του Λιμένα Λαυρίου περιλαμβάνουν τις ακόλουθες λιμενικές εγκαταστάσεις (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023):

- 1) Το βορειοανατολικό και το νοτιοανατολικό μόλο
- 2) Τα κρηπιδώματα ακτοπλοΐας
- 3) Το αλιευτικό καταφύγιο
- 4) Τα κρηπιδώματα του τμήματος σκαφών αναψυχής του λιμένα
- 5) Τα κρηπιδώματα του εμπορικού τμήματος του λιμένα

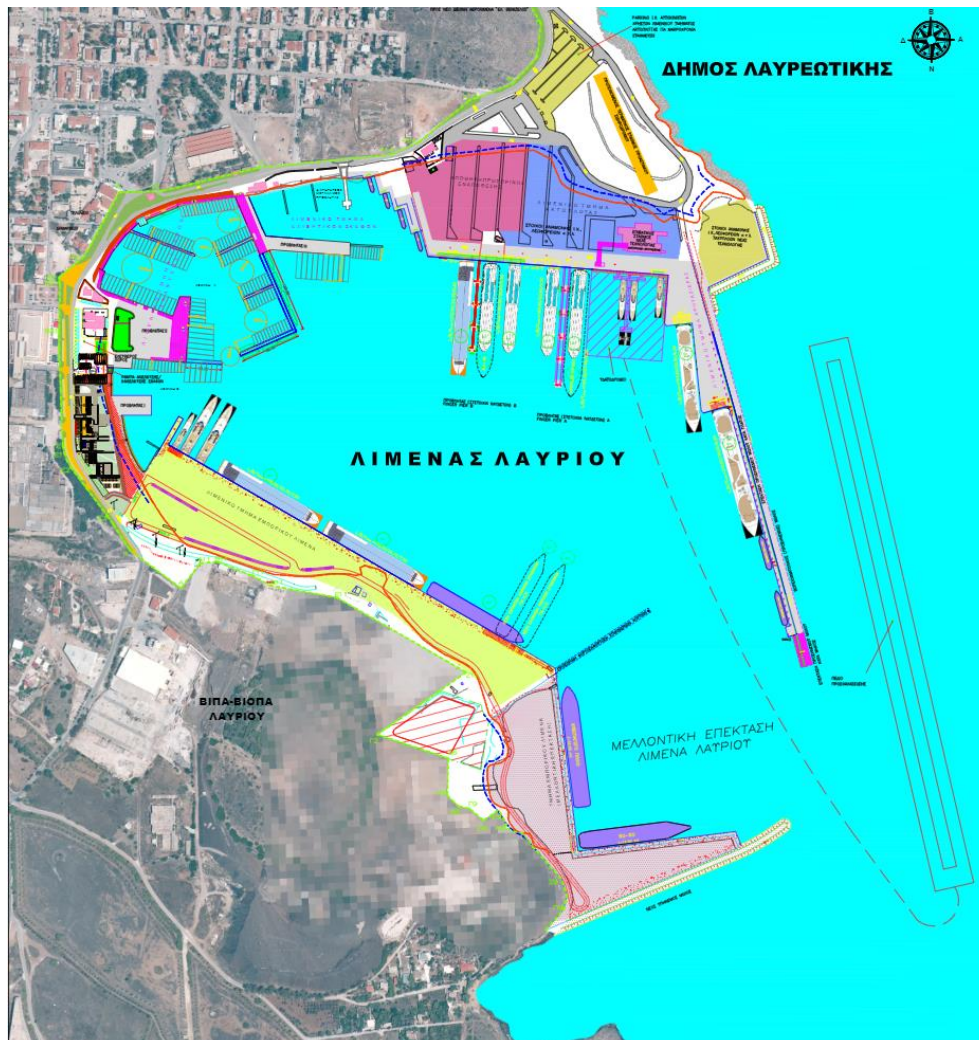
Σύμφωνα με το Γενικό Προγραμματικό Σχέδιο (Master Plan) του λιμένα κρίνονται απαραίτητα κάποια έργα λιμενικών υποδομών, προϋπολογισμού 45 εκατ. €, λόγω της έκθεσης του λιμένα στα καιρικά φαινόμενα, αλλά και λόγω της ορθολογικής αξιοποίησης των λιμενικών δραστηριοτήτων που πρέπει να υφίσταται. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν:

- Κατασκευή νότιου Υπήνεμου μόλου
- Μικρή επέκταση του βόρειου λιμενοβραχίονα
- Επεκτάσεις του βόρειου λιμενικού χώρου προς τη θάλασσα
- Υποδομές Χερσαίας ζώνης – κυκλοφοριακές ρυθμίσεις

Ορισμένες τεχνικές λεπτομερείς του λιμένα Λαυρίου είναι πως περιλαμβάνει κρηπιδώματα με συνολικό μήκος 2200 m, με την είσοδο του λιμανιού να έχει πλάτος 206 m, τη λιμενολεκάνη να έχει διάμετρο 350 m και βάθος 12m, ενώ τα νέα κρηπιδώματα του Τομέα Ακτοπλοΐας έχουν μήκος 250 m (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023). Το προς μελέτη τμήμα της ακτοπλοΐας φιλοξενείται στα κρηπιδώματα του βορειοανατολικού τομέα του λιμανιού, διαθέτοντας 9 θέσεις/ράμπες πρυμνοδέτησης, ενώ δύο σύγχρονα finger

piers προσφέρουν τη δυνατότητα πλάγιο-πρυμνοδέτησης για έως και τέσσερα πλοία (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023).

Ο βορειοανατολικός προσήνεμος μόλος μήκους 350 μ. προσφέρεται για την πλαγιοδέτηση τουλάχιστον δύο πλοίων ταυτόχρονα, εξυπηρετώντας επίσης τα πλοία κρουαζιέρας, στη διάθεση των οποίων υπάρχει Επιβατικός Σταθμός εμβαδού 2700 m<sup>2</sup> με όλες τις υποδομές απαραίτητων ελέγχων (διαβατηριακός, αστυνομικός, τελωνειακός) που υπαγορεύονται από τη συνθήκη ΣΕΝΓΚΕΝ και τον Κώδικα ISPS (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, έργα αναβάθμισης και βέλτιστης αξιοποίησης των υφιστάμενων λιμενικών υποδομών θα παρέχουν ένα ακόμη πιο ασφαλές μέρος ελλιμενισμού και ταχείας φορτοεκφόρτωσης των πλοίων.



Εικόνα 9- Γενικό Προγραμματικό Σχέδιο (Master Plan) λιμένα Λαυρίου Πηγή: (Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου, 2023)

Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται σε τμήματα των πλακών σκυροδέματος του τερματικού σταθμού ακτοπλοΐας που εμφανίζουν ρωγμές, η επίσκεψη στο Λιμένα Λαυρίου για μια προκαταρκτική οπτική επισκόπηση επικεντρώθηκε αποκλειστικά στην περιοχή διερεύνησης του τμήματος της ακτοπλοΐας. Η επιτόπια αυτοψία πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πιο συγκεκριμένα από την κ. Τσάιμου (2020) στο πλαίσιο συγγραφής της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας της.

Στο τμήμα της ακτοπλοΐας τα υφιστάμενα κρηπιδώματα έχουν συνολικό μήκος περίπου 460 m, συμπεριλαμβάνοντας στο μήκος αυτό και τα τεθλασμένα κρηπιδώματα πρόσδεσης πλοίων νέας τεχνολογίας. Οι ράμπες εξυπηρέτησης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων είναι πέντε (5) ενώ επιπλέον δύο (2) ράμπες (προς το Αλιευτικό Καταφύγιο) χρησιμοποιούνται για τα φορτηγά πλοία τύπου Ro-Ro (Εικόνα 11). Στην

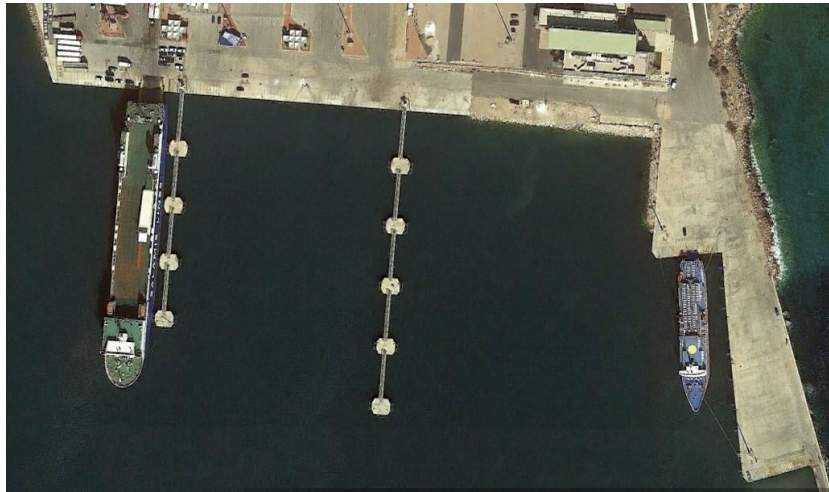
Εικόνα 12 φαίνεται τμήμα ενός από τα δύο σύγχρονα finger piers. Ανατολικά της τελευταίας ράμπας Ε/Γ-Ο/Γ δεν υφίσταται κρηπίδωση, έχει εφαρμοστεί όμως θωράκιση με φυσικούς ογκόλιθους με μήκος περί τα 112 m (Εικόνα 13).

Στο χώρο εντός της λιμενικής ζώνης, η οποία είναι περιφραγμένη βάσει του διεθνή κώδικα για την Ασφάλεια των Πλοίων και Λιμενικών Εγκαταστάσεων (International Code for the Security of Ships and Port Facilities, ISPS Code), βρίσκεται το Λιμεναρχείο Λαυρίου και οι τελωνειακές αρχές, όπως επίσης και αυτοματοποιημένο πάρκινγκ αυτοκινήτων, χώρος ενοικίασης ΙΧ αυτοκινήτων και τα γραφεία έκδοσης εισιτηρίων και εξυπηρέτησης επιβατών και επισκεπτών.

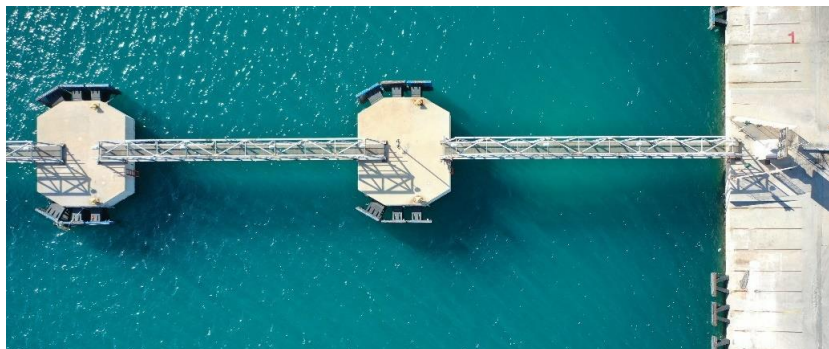


Εικόνα 10 - Άποψη τομέα ακτοπλοΐας (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020)

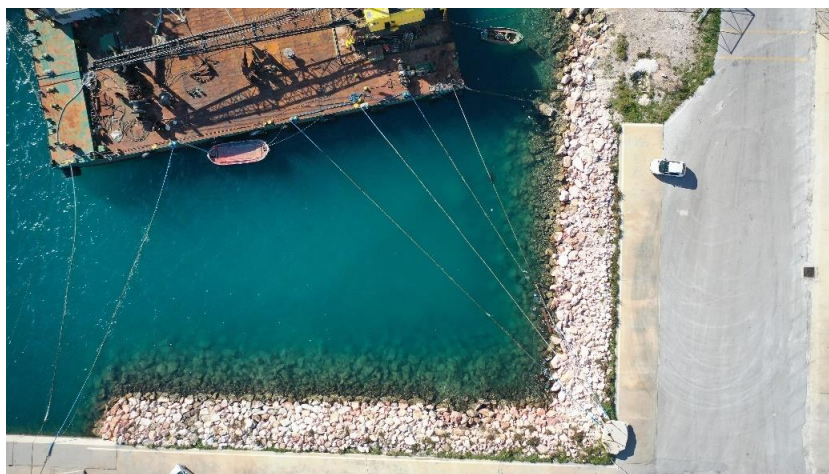




Εικόνα 11 - Άποψη του τομέα ακτοπλοΐας, με κατειλημμένη τη μια θέση για Ro-Ro δυντικά, έτος αναφοράς 2014  
Πηγή: Google Earth



Εικόνα 12 - Άποψη finger piers του λιμένα από εικόνα που ελήφθησε κατά την πτήση του UAV Πηγή:(Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022)



Εικόνα 13 – Άποψη θωράκισης ανατολικά της τελευταίας ράμπας Ε/Γ-Ο/Γ από εικόνα που ελήφθησε κατά την πτήση του UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022)

## 4.2 Συλλογή Δεδομένων Λαυρίου για Ανάλυση Εικόνας

Για να μπορέσει να υλοποιηθεί η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω και ένα Πρόγραμμα SHM βασισμένο σε image-based τεχνικές και ειδικότερα σε UAV-based Τηλεπισκόπηση μέσω Φωτογραμμετρίας, να βρει εφαρμογή στο λιμένα Λαυρίου, πρέπει να γίνουν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες απόκτησης/συλλογής δεδομένων που θα αποτυπώνουν την υφιστάμενη κατάσταση. Το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με την εταιρεία NIREAS ENGINEERING ([www.nireaseng.com](http://www.nireaseng.com)) και τον κ. Π. Σαρταμπάκο (πιστοποιημένος πιλότος UAS με αριθμό μητρώου EL-UPL5715xxxx για το χειρισμό του πτητικού μέσου) πραγματοποίησε εναέριες καταγραφές με στόχο τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων δεδομένων για τις υφιστάμενες υποδομές του υπό εξέταση τομέα ακτοπλοΐας κατά το διάστημα 2020-2021.

### 4.2.1 Έρευνα Πεδίου και Περιγραφή Εξοπλισμού

Για τις ανάγκες των εναέριων καταγραφών χρησιμοποιήθηκε ένα Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) της εταιρείας NIREAS ENGINEERING, τύπου MAVIC 2 pro που κατασκευάζεται από την κινεζική εταιρεία τεχνολογίας DJI, το οποίο και διαθέτει οπτικό σύστημα που λαμβάνει σήματα από όλες τις κατευθύνσεις.

Το συγκεκριμένο UAV είναι τετρακόπτερο, αρκετά ταχύ και ανθόρυβο και μπορεί να πετάξει σε οριζόντια απόσταση έως και 18 km ανεμπόδιστα ενώ καθ' ύψος μπορεί να φτάσει έως τα 500 m (μετρημένα σε ιδανικές συνθήκες χωρίς αέρα). Βασικό του χαρακτηριστικό είναι ο εξοπλισμός με αισθητήρες αναγνώρισης εμποδίων και στις έξι (6) πλευρές του με τεχνολογία αποφυγής σύγκρουσης μπροστά και πίσω (Εικόνα 14), επιτρέποντάς του να πετάει γύρω από τα εμπόδια με ευκολία σύμφωνα με τον κατασκευαστή (DJI, 2020).

Το MAVIC 2 Pro έχει το πλεονέκτημα να χρησιμοποιεί τόσο το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) όσο και το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GLONASS), οπότε συνδέεται με αρκετούς δορυφόρους. Επιπλέον, χρησιμοποιεί μια μπαταρία τεσσάρων κυψελών ιόντων λιθίου-πολυμερούς με χωρητικότητα 3850 mAh που διαρκεί έως και 31 λεπτά πτήσης χωρίς άνεμο με σταθερή ταχύτητα 25 km/h.



Εικόνα 14 – (α) Η τεχνολογία ανίχνευσης εμποδίων (αισθητήρες) του MAVIC 2 Pro Πηγή: (Corrigan, 2020) (β) UAV MAVIC 2 στο πεδίο Pro Πηγή: Εργαστήριο Λιμενικών Έργων ΕΜΠ

Η ενσωματωμένη του κάμερα υψηλής ευκρίνειας, μπορεί να καταγράψει βίντεο με ανάλυση 4K και μπορεί να τραβήξει φωτογραφίες έως 20 megapixel, με δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της κάμερας που χρησιμοποιήθηκε κατά την πτήση του UAV (Πίνακας 2).

Πίνακας 2 - Χαρακτηριστικά κάμερας για τη συλλογή στοιχείων κατά την πτήση του UAV Πηγή: (DJI, 2020)

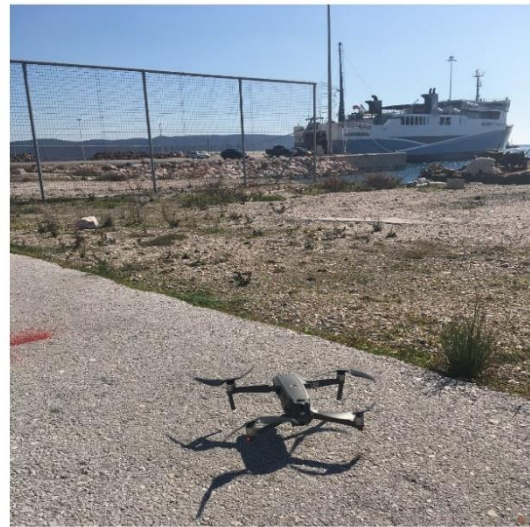
Μοντέλο Κάμερας	Ανάλυση	Εστιακή Απόσταση	Μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel)
Hasselblad L1D-20c (10.26 mm)	5472 x 3648	10.26 mm	2.41 x 2.41 $\mu\text{m}$

Για να αξιοποιηθεί ορθά το UAV και να καταρτιστεί μια βάση δεδομένων στο πλαίσιο του Προγράμματος Παρακολούθησης της υποδομής αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν τέσσερις (4) πτήσεις στο διάστημα μεταξύ Φεβρουαρίου 2020 και Ιουλίου 2021. Για να πραγματοποιηθούν οι πτήσεις αυτές ήταν υποχρεωτικό να παραχωρηθεί ειδική άδεια από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) και να εφαρμοστεί ένα πρωτόκολλο πτήσης περιλαμβάνοντας:

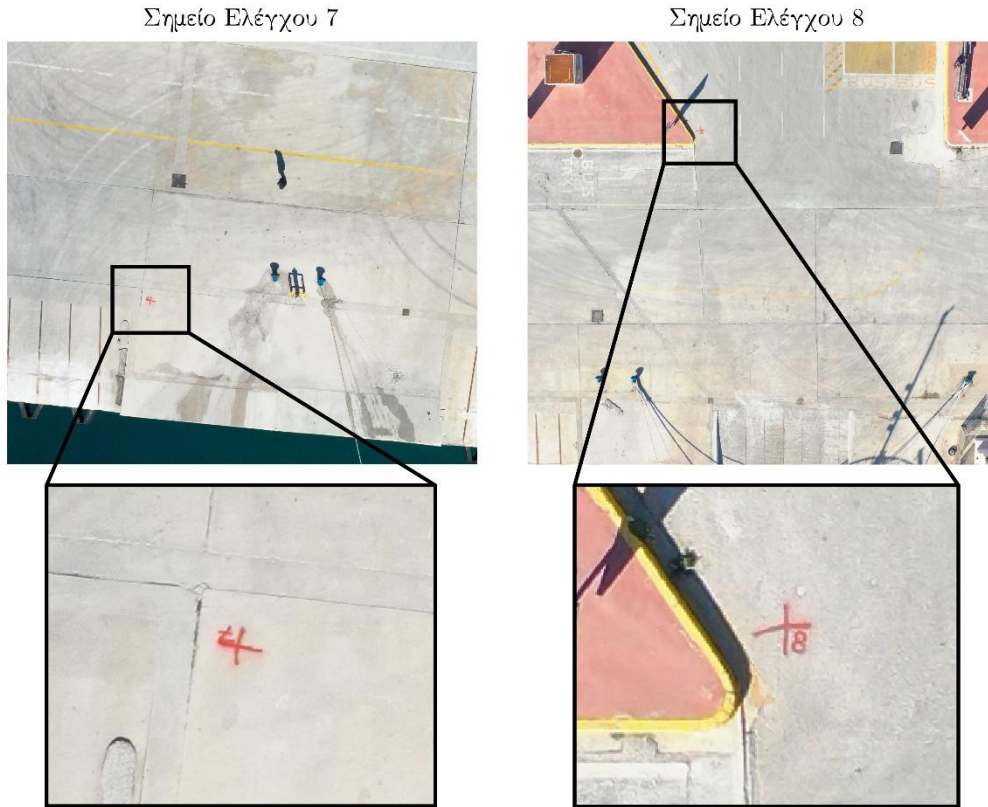
- Σχέδιο πτήσης
- Άδεια πτητικής λειτουργίας ΣμηΕΑ
- Ιστορικό αιτημάτων πτήσης
- Άδεια εκμετάλλευσης ΣμηΕΑ
- Πιστοποιητικό ειδικού μητρώου ΣμηΕΑ
- Ασφαλιστήριο συμβόλαιο

Οι πτήσεις (Εικόνα 15) πραγματοποιήθηκαν από τον κ. Π. Σαρταμπάκο, παρουσία της επιβλέπουσας της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, Καθηγήτριας ΕΜΠ και

Διευθύντριας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων κας. Β. Τσουκαλά, όπως επίσης και της συνεπιβλέπουσας της παρούσας διπλωματικής, Υποψήφιας Διδάκτορα ΕΜΠ κας. Χ. Τσάιμου. Κατά τις εργασίες πεδίου και ύστερα από την αναγνώριση της περιοχής μελέτης, έπρεπε να οριστούν περιμετρικά της υποδομής και εντός της επιφάνειας της περιοχής που διερευνάται ορισμένα Σημεία Ελέγχου, με αύξοντα αριθμό από 1 έως 8 (Εικόνα 16), των οποίων οι συντεταγμένες ορίστηκαν με τοπογραφικές μεθόδους. Σημειώνεται επίσης πως επετεύχθη η απαιτούμενη επικάλυψη τόσο μετωπικά όσο και εγκάρσια για τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα καθώς η επιφάνεια του σκυροδέματος αποτελεί μια ειδική συνθήκη.



Εικόνα 15 - Στιγμιότυπα κατά την απογείωση και την προσγείωση του UAV Πηγή: Εργαστήριο Λιμενικών Έργων ΕΜΠ



Εικόνα 16 - Σημεία Ελέγχου Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Τα χαρακτηριστικά πτήσης του UAV για καθεμία από τις τέσσερις (4) χρονικές περιόδους καταγραφής παρατηρούνται παρακάτω (Πίνακας 3).

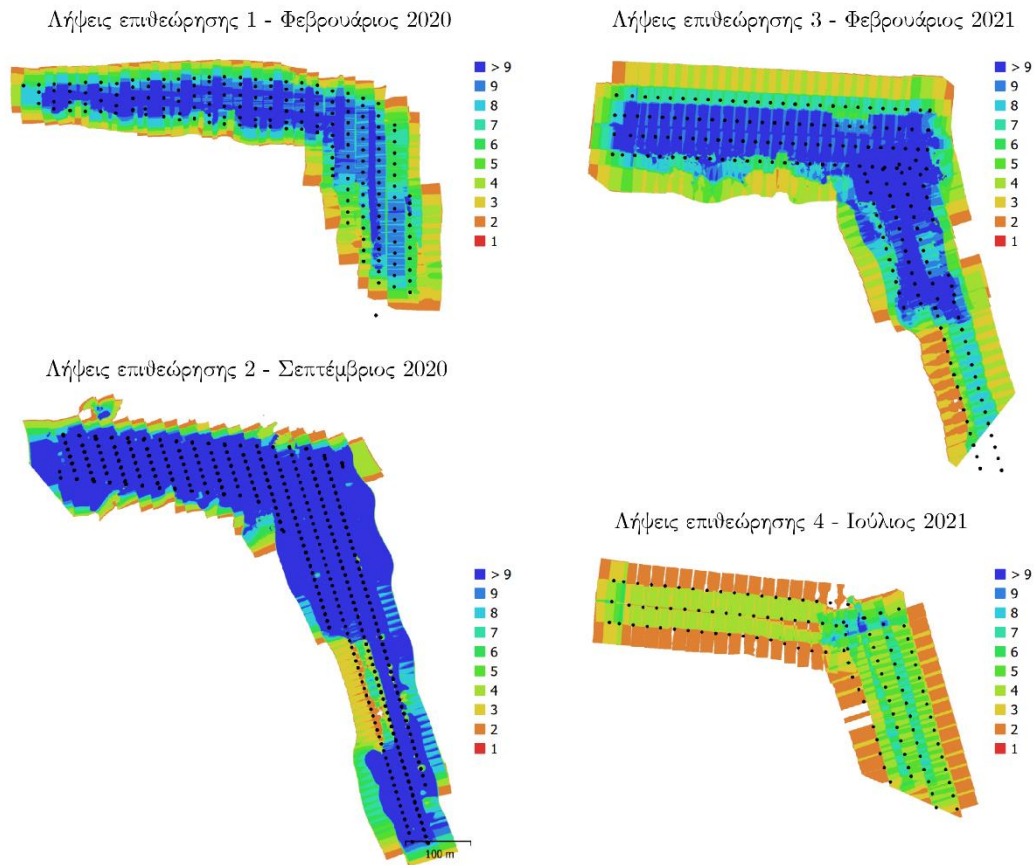
Πίνακας 3 – Βασικά χαρακτηριστικά διαδικασίας πτήσεων όπως αυτά καταγράφηκαν στην Αναφορά Επεξεργασίας Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b)

Ημερομηνία Πτήσης/Λήψης	Φεβ 2020	Σεπ 2020	Φεβ 2021	Ιουλ 2021
Ονομασία Λήψης	ISI 1	ISI 2	ISI 3	ISI 4
Αριθμός εικόνων (Number of images )	224	567	203	147
Ύψος πτήσης (Flying altitude )	48	55.7	75.7	56.1
Ανάλυση εδάφους (Ground resolution )	1.06 cm/pix	1.21 cm/pix	1.66 cm/pix	1.17 cm/pix
Περιοχή κάλυψης (Coverage area )	0.0604 km <sup>2</sup>	0.146 km <sup>2</sup>	0.146 km <sup>2</sup>	0.0901 km <sup>2</sup>
Σταθμοί κάμερας (Camera stations )	183	561	199	127
Σημεία σύνδεσης (Tie points )	301,014	614,081	292,814	246,704
Προβολές (Projections )	913,362	2,696,205	1,014,155	631,919

Σφάλμα αναπαράστασης (Reprojection error)	1.22 pix	0.915 pix	0.814 pix	0.796 pix
--	----------	-----------	-----------	-----------

#### 4.2.2 Δεδομένα Φωτογραμμετρίας

Οι εικόνες που πάρθηκαν από τις πτήσεις του UAV μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία αναλύθηκαν περαιτέρω βάσει της φωτογραμμετρίας που αναπτύχθηκε στην υπό-ενότητα 3.1.2 έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι τέσσερις (4) Ορθοφωτοχάρτες της περιοχής με κωδικές ονομασίες ISI 1,2,3,4 (In-Situ Inspection δηλαδή «Επί-τόπου» επιθεώρηση), οι οποίες αποτελούν και τα ακατέργαστα/πρωτογενή δεδομένα (raw data) της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 17 - Θέσεις λήψεων και κατηγοριοποίηση ανάλογα με την κάλυψη της περιοχής από αριθμό αεροφωτογραφιών Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b)

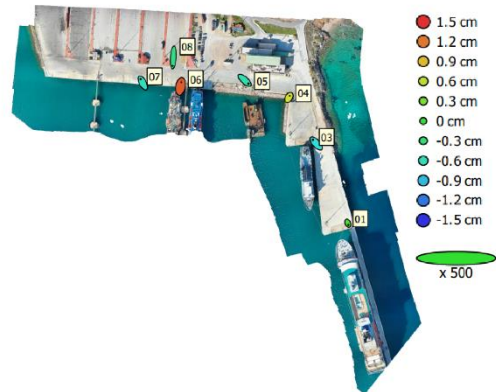
Όπως αναφέρθηκε και δείχθηκε (Εικόνα 16) και παραπάνω για την πτήση του UAV καθορίστηκαν τα Σημεία Ελέγχου στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης. Στην Εικόνα 18

φαίνονται οι θέσεις τους στο χώρο συνοδευόμενες από χρωματική διαφοροποίηση ανάλογα με το εκτιμώμενο σφάλμα των συντεταγμένων.

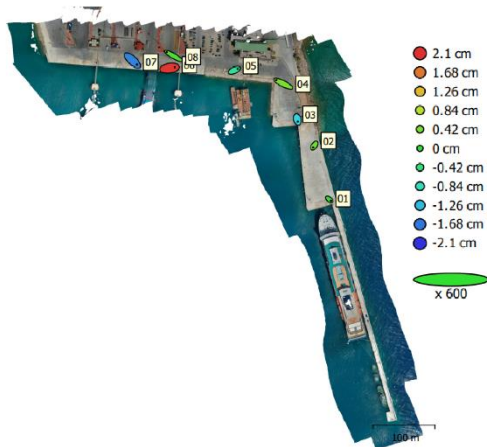
Σημεία ελέγχου επιθεώρησης 1 - Φεβρουάριος 2020



Σημεία ελέγχου επιθεώρησης 3 - Φεβρουάριος 2021



Σημεία ελέγχου επιθεώρησης 2 - Σεπτέμβριος 2020



Σημεία ελέγχου επιθεώρησης 4 - Ιούλιος 2021



Εικόνα 18 - Θέσεις Σημείων Ελέγχου και εκτιμώμενο σφάλμα των συντεταγμένων Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b)

Αντίστοιχα παρατίθεται αναλυτικά περισσότερες πληροφορίες (Πίνακας 4) για τα σφάλματα αυτά κατά τις διευθύνσεις X (κατεύθυνση προς ανατολή), Y (κατεύθυνση προς βορρά) και Z (υψόμετρο), τα οποία στην Εικόνα 18 απεικονίζονται για τα X,Y με διαφορετικό άξονα έλλειψης και για το Z με διαφορετικό χρώμα. Παραπάνω πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία και τα αποτελέσματα του Πίνακα 4, μπορεί κάποιος να βρει στην έρευνα της Tsaimou et al. (2022).

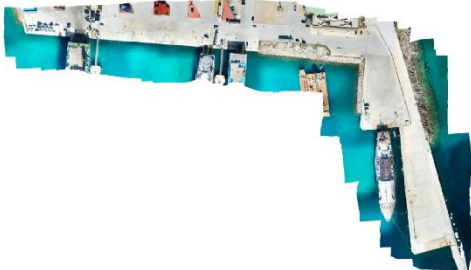
Πίνακας 4 - Πίνακας συντεταγμένων Σημείων Ελέγχου – Εκτιμώμενα σφάλματα Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b)

Λήψη	A/A σημείου αναφοράς	Σφάλμα κατά X (cm)	Σφάλμα κατά Y (cm)	Σφάλμα κατά Z (cm)	Συνολικό σφάλμα (cm)
ISI 1	01	0.409721	-0.366631	0.0693716	0.554168
	02	-0.99578	-0.352948	0.534396	1.18395

	03	0.219425	-0.834598	-0.709646	1.11727
	04	-1.30564	2.17087	-0.744673	2.64044
	05	2.50419	-0.0159055	0.792994	2.62679
	06	-	-	-	-
	07	2.07429	0.929301	-0.732431	2.38804
	08	-2.90766	-1.52479	0.676976	3.35228
	Σύνολο	1.77041	1.12485	0.651604	2.19641
ISI 2	01	0.857117	-0.708413	-0.0632102	1.11377
	02	-0.648377	-1.00469	0.37358	1.25274
	03	0.290839	-1.07054	-1.12281	1.5784
	04	-3.63888	1.80335	0.445758	4.08561
	05	1.63631	0.779452	-0.64312	1.92319
	06	2.74336	0.397915	2.05553	3.45103
	07	2.3944	-2.2356	-1.60276	3.6469
	08	-3.63006	2.06082	0.172466	4.17781
	Σύνολο	2.33439	1.41068	1.05121	2.92309
ISI 3	01	0.350701	-0.985261	0.127999	1.05362
	02	-	-	-	-
	03	-1.97447	2.14526	-0.732132	3.0061
	04	0.625256	0.998232	0.690969	1.3656
	05	2.16648	-2.00646	-0.549274	3.00353
	06	0.437732	2.53842	1.30512	2.88765
	07	-1.21586	2.28958	-0.602517	2.66148
	08	-0.386367	-4.98569	-0.353173	5.01309
	Σύνολο	1.2493	2.595	0.70939	2.96614
ISI 4	01	-2.17269	-0.679568	-0.0798513	2.27789
	02	-	-	-	-
	03	3.60152	0.935234	-0.1789	3.72526
	04	-3.21039	2.68066	0.458137	4.20743
	05	4.57034	-2.1573	-0.118582	5.0553
	06	0.0793213	6.87009	0.435505	6.88433
	07	-1.98047	3.2713	0.43091	3.84829
	08	-0.890278	-10.9273	-1.0201	11.0109
	Σύνολο	2.76734	5.21648	0.489647	5.92534

Έτσι, λαμβάνοντας τα παραπάνω προκύπτουν μέσω του προγράμματος Agisoft Metashape (v.1.6.4) (Agisoft LLC, 2020), με το οποίο πραγματοποιήθηκε η φωτογραμμετρία από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ, οι Ορθοφωτοχάρτες στην Εικόνα 19 για την περιοχή μελέτης δηλαδή το τμήμα της ακτοπλοΐας και το βορειοανατολικό μόλο που θα αποτελέσουν τα πρωτογενή δεδομένα για τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Εικόνας για την ανίχνευση των ρωγμών.



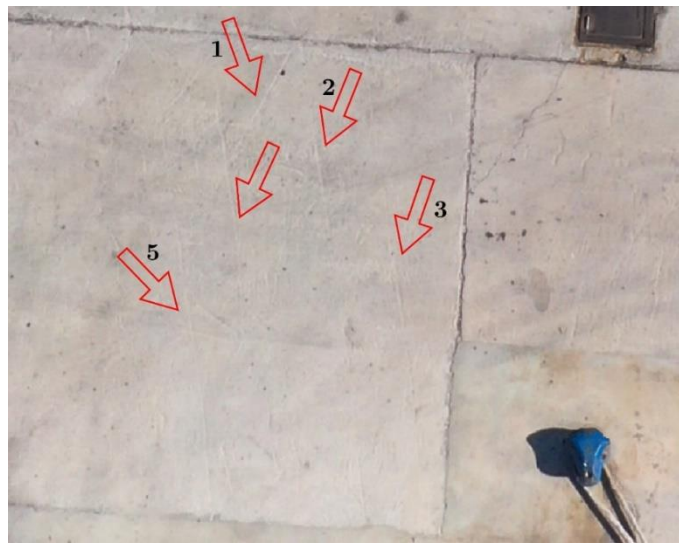
Ορθοφωτοχάρτης «Επί τόπου» επιθεώρησης 1 -  
In-Situ Inspection - ISI 1Ορθοφωτοχάρτης «Επί τόπου» επιθεώρησης 3 -  
In-Situ Inspection - ISI 3Ορθοφωτοχάρτης «Επί τόπου» επιθεώρησης 2 -  
In-Situ Inspection - ISI 2Ορθοφωτοχάρτης «Επί τόπου» επιθεώρησης 4 -  
In-Situ Inspection - ISI 4

Εικόνα 19 - Ορθοφωτοχάρτες περιοχής μελέτης Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b)

Οι παραγόμενοι Ορθοφωτοχάρτες που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα των Tsaimou et al. (2022), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, βρίσκονται σε μορφή GeoTIFF, δηλαδή σε μια εμπλουτισμένη με γεωχωρική πληροφορία TIFF μορφή. Οι πρόσθετες πληροφορίες ή αλλιώς μεταδεδομένα (metadata) περιλαμβάνουν την προβολή, το σύστημα συντεταγμένων και ορισμένα σημεία αναφοράς που είναι απαραίτητο να υπάρχουν για τον καθορισμό της ακριβούς χωρικής αναφοράς του αρχείου. Έτσι, αξιοποιώντας το λογισμικό QGIS γίνεται η οπτικοποίηση των ορθοφωτοχαρτών στη σωστή τους θέση στο χώρο και μπορεί να ξεκινήσει η εκτενής επεξεργασία. Χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές αναδειγματοληψίας (resampling) (Bilinear ή Cubic) σε κάθε ορθοφωτοχάρτη, μπορεί να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων στην οθόνη του Η/Υ λόγω της μεγαλύτερης ομαλοποίησης (Tsaimou et al., 2023).

Αυτός είναι και ο τρόπος παρατήρησης σημαντικών και εμφανών φθορών στις πλάκες σκυροδέματος της λιμενικής υποδομής, όπως είναι για παράδειγμα η τοπική αποκόλληση τμήματος σκυροδέματος στην επιφάνεια. Από την παρατήρηση κάθε Ορθοφωτοχάρτη για

την περιοχή μελέτης, προκύπτουν σημαντικά στοιχεία για φθορές, είτε δομικές που υποδηλώνουν έντονη παρουσία φαινομένων υποβάθμισης είτε γραμμικές επιφανειακές που συγχέονται ως ρωγμές αλλά οφείλονται σε φθορά της ανωδομής από διαφορετικά αίτια όπως π.χ. από σύρσιμο από κάποιο μηχάνημα ή από κάποιο φορτίο ή αν βρίσκεται πολύ κοντά στον κρηπιδότοιχο ακόμη και από τον καταπέλτη (μπουκαπόρτα) του πλοίου. Στην Εικόνα 20 παρατηρείται ένα από τα συνηθέστερα σφάλματα ανάγνωσης και κατανόησης μιας εικόνας, όπου πολύ σωστά ένας ερευνητής θα διατύπωνε από τον οπτικό έλεγχο του Ορθοφωτοχάρτη πως πρόκειται για φυσική φθορά και συνεπώς μάλλον για ρωγμή. Ωστόσο, κάτι τέτοιο απέχει από την πραγματικότητα όπως θα διαπιστωθεί στην Εικόνα 22 κατά την επιτόπια οπτική επισκόπηση.



Εικόνα 20 - Παράδειγμα (1) εντοπισμού τεχνητής φθοράς από την οπτική επισκόπηση στον Ορθοφωτοχάρτη στην πλάκα σκυροδέματος από την πτήση UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022)

Η Εικόνα 21 από την άλλη αποτελεί παράδειγμα με αντίθετη σημασία από αυτό στην Εικόνα 20, καθώς η οπτική ανάγνωση της εικόνας αποδίδει τις ακανόνιστες αυτές γραμμές σε ρωγμή, πόρισμα που επιβεβαιώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.

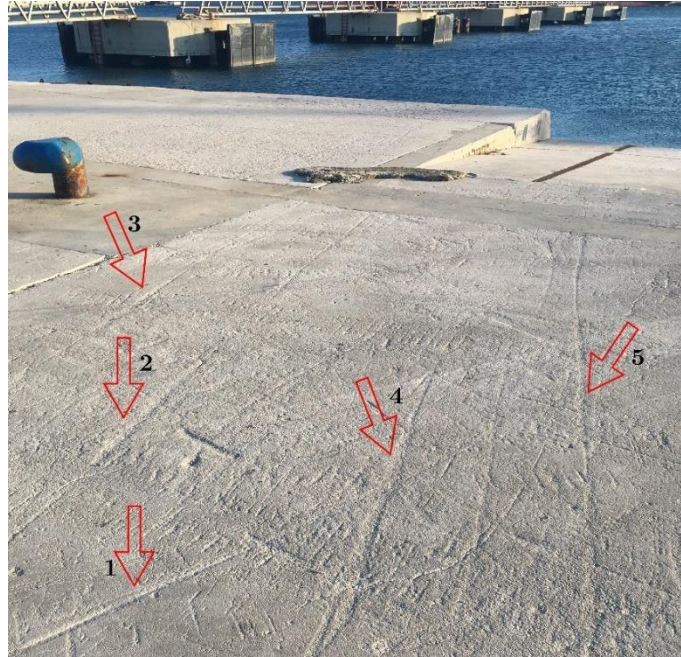


Εικόνα 21 - Παράδειγμα (2) εντοπισμού φυσικής φθοράς από την οπτική επισκόπηση στον Ορθοφωτοχάρτη στην πλάκα σκυροδέματος από την πτήση UAV Πηγή: (Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, 2022)

#### 4.2.3 Δεδομένα Οπτικής Επισκόπησης

Κατά την οπτική επισκόπηση εντοπίστηκαν σημεία σημαντικής φθοράς στην επιφάνεια της ανωδομής του τομέα ακτοπλοΐας. Οι φθορές στις Εικόνες 20 και 21 όπως αυτές φαίνονται στους Ορθοφωτοχάρτες αντιστοιχούν στην πραγματικότητα στις φθορές που απεικονίζονται στις Εικόνες 22 και 23, αντίστοιχα, οι οποίες ελήφθησαν κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων.

Στην Εικόνα 22 φαίνονται αυτά τα γραμμικά συρσίματα που υποβαθμίζουν μεν την υποδομή, όμως δεν αποτελούν ρωγμές και άρα δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη στη φάση ανίχνευσης.



Εικόνα 22 - Παράδειγμα εντοπισμού φθορών από την οπτική επισκόπηση που δεν σχετίζονται με την εμφάνιση ρωγμών (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020)



Εικόνα 23 - Παράδειγμα εντοπισμού ρωγμών από την οπτική επισκόπηση (λήψη φωτογραφίας κατά την επιτόπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020)

Τέλος, σε όλη την επιφάνεια της εξεταζόμενης περιοχής είναι έντονη η παρουσία ρωγμών μεγάλης κλίμακας, περί τα 30mm πλάτους και μικρής, περί τα 10 mm πλάτους και μικρότερες, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 24, καθιστώντας την ανίχνευση τους πρόκληση καθώς μετά βίας εντοπίζονται κάποιες από αυτές από το ανθρώπινο μάτι.



Εικόνα 24 - Παραδείγματα ρωγμών (λήψη φωτογραφίας κατά την επίτοπια επιθεώρηση της ομάδας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, Φεβρουάριος, 2020)



# 5

## Αποτελέσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας για την ανάλυση της εικόνας με σκοπό την ανίχνευση ρωγμών, που εφαρμόζεται για τη μελέτη περίπτωσης του Λιμένα Λαυρίου.

### 5.1 Ορισμός Περιοχής Μελέτης και Πλάκας Σκυροδέματος

Στην Εικόνα 25 αποτυπώνεται η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης για τον τομέα της Ακτοπλοΐας του Λιμένα Λαυρίου.



Εικόνα 25 – Περιοχή μελέτης (Τομέας Ακτοπλοΐας)

Πρόκειται για μια περιοχή που εκτείνεται από το τελείωμα του κρηπιδότοιχου έως και τα όρια των 4 νησίδων που διαχωρίζουν το τμήμα φορτοεκφόρτωσης των πλοίων από τους χώρους στάθμευσης και αναμονής. Είναι μια έκταση με περίμετρο περί τα 410 m και με εμβαδόν περί τις 5100 m<sup>2</sup>.

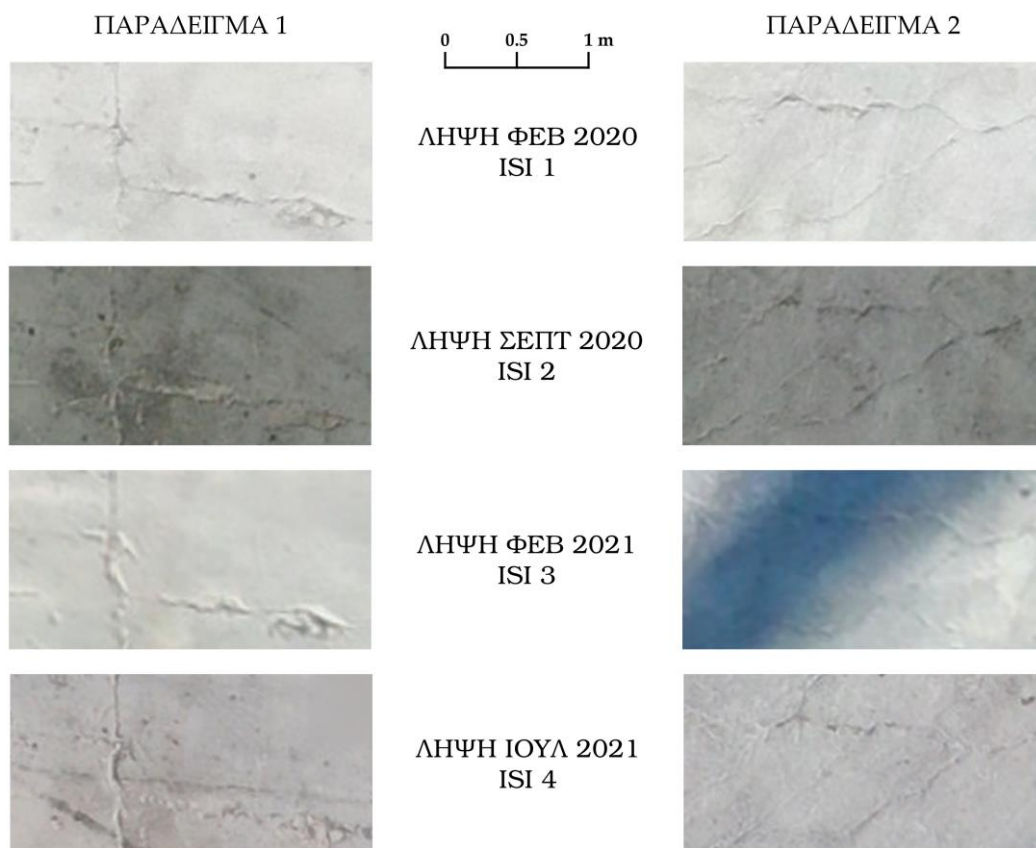
Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε τμήματα τα οποία ορίζονται από τις πλάκες σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φάση ψηφιοποίησης των ορίων κάθε πλάκας παρατηρήθηκε πως υπάρχει ανομοιομορφία σε μεγέθη. Ψηφιοποιήθηκαν συνολικά 40 πολύγωνα που υποδεικνύουν πλάκες μεταξύ αρμών με συνολική έκταση 4278 m<sup>2</sup> (τμήμα των 5100 m<sup>2</sup> αντιστοιχεί σε ασφαλτικό οδόστρωμα προς το χώρο στάθμευσης), μέγιστη επιφάνεια πλάκας 513 m<sup>2</sup> και ελάχιστη 3 m<sup>2</sup>. Σε κάθε πολύγωνο αποδίδεται ένας αλφαριθμητικός κωδικός αναλόγως της σειράς από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Με δεδομένες πλέον τις εικόνες που αποκόπηκαν από τον Ορθοφωτοχάρτη στα όρια του πολυγώνου της περιοχής μελέτης, έχει μικρύνει αρκετά το μέγεθος του αρχείου του αρχικού Ορθοφωτοχάρτη και είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο.

Στο σημείο αυτό επιλέγεται η ανάλυση μιας πλάκα σκυροδέματος που έντονες ρωγμές. Στην Εικόνα 27 τεκμηριώνεται η επιλογή της πλάκας με κωδικό A7, η οποία τυγχάνει να είναι και η μεγαλύτερη σε επιφάνεια, καθώς με μόλις 2 ενδεικτικά παραδείγματα διαφαίνεται η έντονη παρουσία ρωγμών και στις 4 εικόνες/λήψεις, οι οποίες διατηρούν ενιαία κλίμακα (1/50). Στην Εικόνα 28 φαίνεται η αποτύπωση ολόκληρης της πλάκας σκυροδέματος για κάθε λήψη του UAV.





Εικόνα 26 – Οριοθέτηση πλακών σκυροδέματος της περιοχής μελέτης



Εικόνα 27 – Παραδείγματα αιτιολόγησης επιλογής πλάκας σκυροδέματος μελέτης



ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



ΛΗΨΗ ΦΕΒ 2020  
ISI 1

ΛΗΨΗ ΣΕΠ 2020  
ISI 2



ΛΗΨΗ ΦΕΒ 2021  
ISI 3

ΛΗΨΗ ΙΟΥΛ 2021  
ISI 4

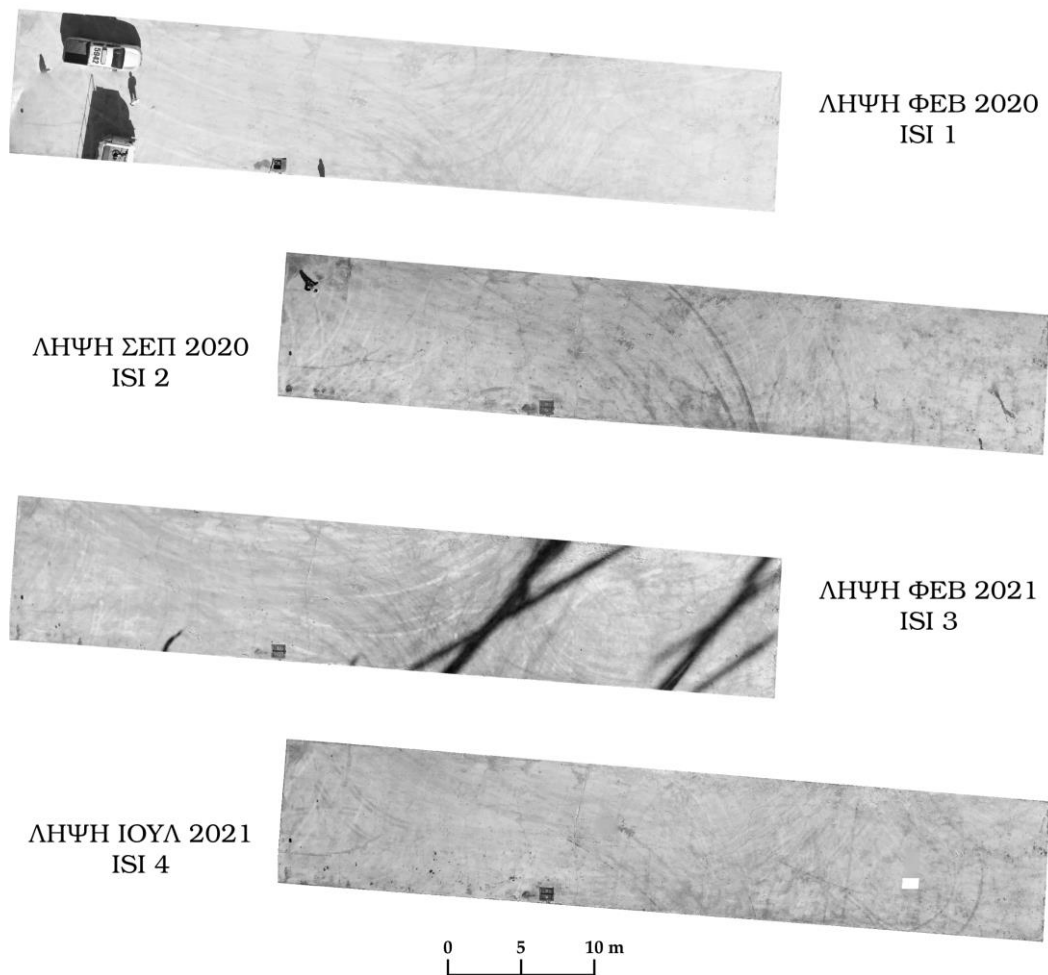


Εικόνα 28 - Αποτίπωση ολόκληρης πλάκας σκυροδέματος μελέτης

Οι εικόνες που αναφέρονται ως λήψεις στην Εικόνα 28 διατηρούν τον προσανατολισμό (βορράς προς τα επάνω) και την κλίμακα (1/500).

## 5.2 Μετατροπή RGB Εικόνας σε Κλίμακα του Γκρι

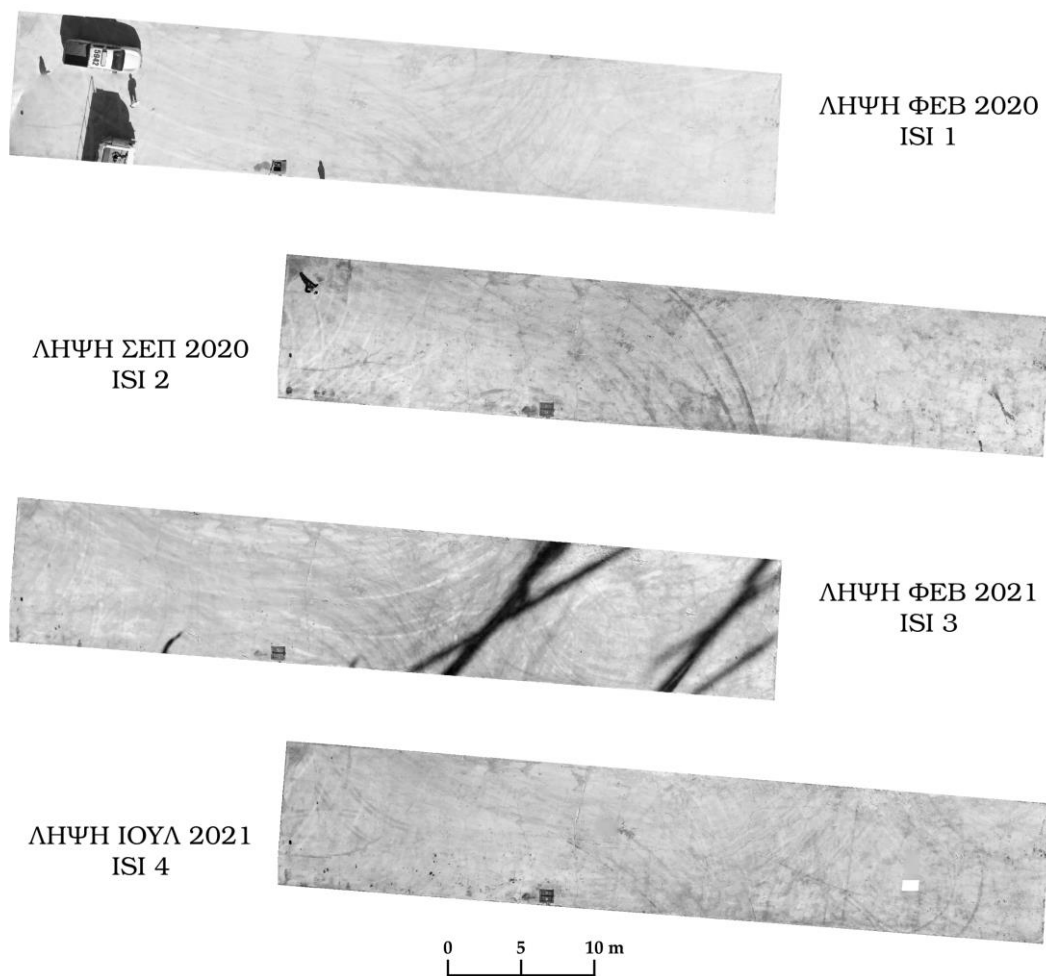
Μετά τον ορισμό της περιοχής μελέτης, ακολουθεί η μετατροπή κάθε εικόνας που περιλαμβάνεται στην Εικόνα 28 σε κλίμακα του γκρι. Όπως γίνεται αντιληπτό επειδή το περιβάλλον της εικόνας είναι από μόνο του ήδη σε τόνους του γκρι λόγω του χρωματισμού της πλάκας σκυροδέματος, πρέπει να βρεθεί ένα τρόπος ώστε να είναι εμφανής η διαδικασία. Έτσι, κατά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων στο QGIS επιλέγεται σαν εύρος τιμών οπτικοποίησης όχι το  $[0,255]$  αλλά το  $[\min, \max]$  κάθε εικόνας. Στην Εικόνα 29 που παρατίθενται στη συνέχεια για κάθε επιμέρους εικόνα/λήψη διατηρείται ο προσανατολισμός και η κλίμακα (1/500).



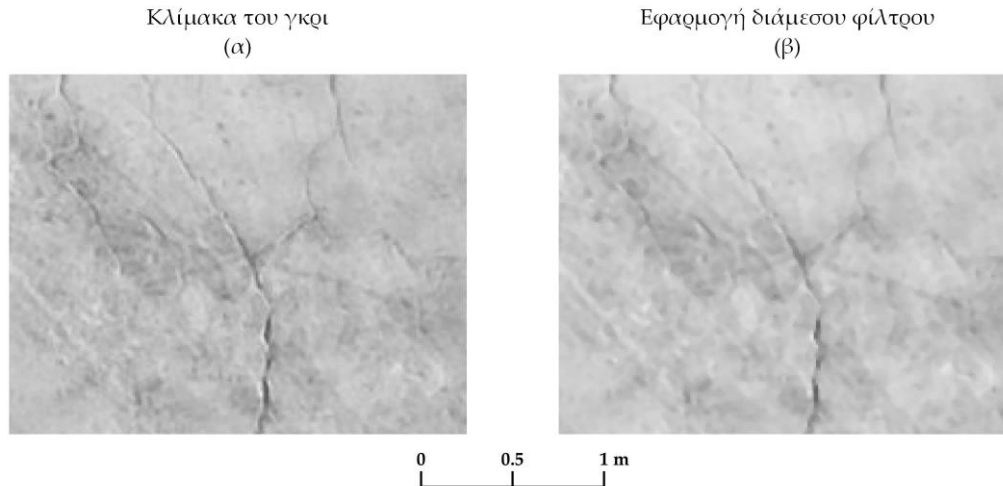
Εικόνα 29 – Αποτελέσματα μετατροπής σε κλίμακα του γκρι

### 5.3 Εφαρμογή Διάμεσου Φίλτρου

Στη συνέχεια γίνεται η εφαρμογή του διάμεσου φίλτρου (median filter) στα αποτελέσματα του Βήματος 2. Επειδή οι διαστάσεις του φίλτρου που έχει επιλεγεί είναι  $3 \times 3$  αυτό σημαίνει πως παρεμβαίνει σε πολύ μικρά τμήματα υπό-εικόνας κάθε φορά για τη μείωση του θορύβου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 30 που ακολουθεί ενώ αποσπάται ένα τμήμα από μια εικόνα/λήψη ώστε να γίνει η απαραίτητη μεγέθυνση και να φανεί η εφαρμογή του φίλτρου (Εικόνα 31). Προκειμένου να είναι εμφανής η διαφορά στις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων επιλέγεται ως τεχνική αναδειγματοληψίας (resampling) αυτή του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor).



Εικόνα 30 - Αποτελέσματα εφαρμογής διαμέσου φίλτρου



Εικόνα 31 – Παράδειγμα εξομάλυνσης/μείωσης του θορύβου (α) εικόνα κλίμακας του γκρι, (β) εικόνα με εφαρμογή διάμεσου φίλτρου

Είναι χαρακτηριστικό επίσης πως μετά την εφαρμογή του φίλτρου οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές για κάθε εικόνα διαφοροποιούνται και είναι λογικό αφού το φίλτρο δρα με τέτοιο τρόπο που μειώνει το θόρυβο σε μια εικόνα αντικαθιστώντας τις ακραίες τιμές εικονοστοιχείων με πιο αντιπροσωπευτικές τιμές από τη γειτονιά. Ως αποτέλεσμα, η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της μέγιστης τιμής εάν οι ακραίες τιμές ήταν υψηλότερες από τη διάμεσο ή σε αύξηση της ελάχιστης τιμής εάν οι ακραίες τιμές ήταν χαμηλότερες από τη διάμεσο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αλλαγές στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές δεν υποδηλώνουν απαραίτητα απώλεια πληροφοριών ή ποιότητας στην εικόνα. Τα αποτελέσματα για την εφαρμογή στην πλάκα σκυροδέματος μελέτης είναι αυτά που παρατίθενται στη συνέχεια στον Πίνακα Πίνακας 5.

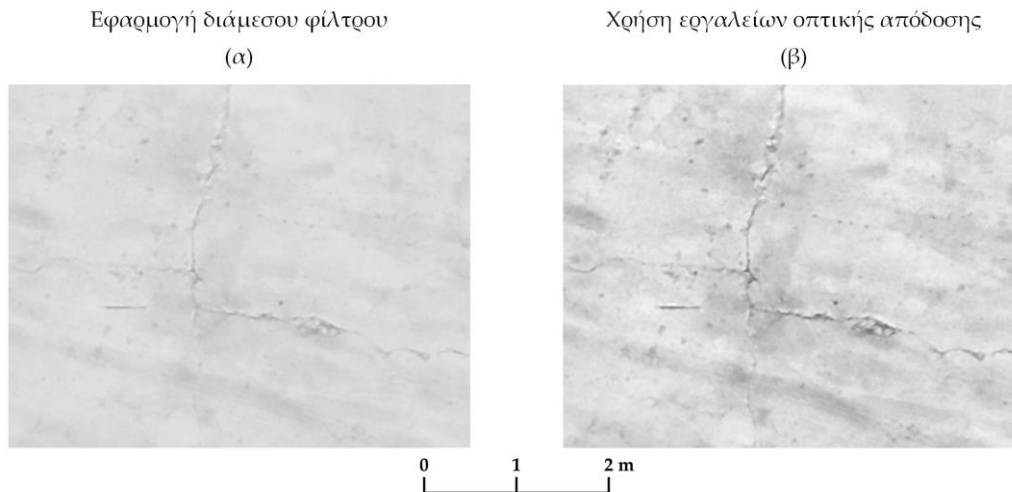
Πίνακας 5 – Πίνακας σύγκρισης ακραίων τιμών

Εικόνα αναφοράς	Κλίμακα του γκρι		Εφαρμογή διάμεσου φίλτρου	
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
ISI 1	3.374	255	8.021	255
ISI 2	17.673	180.245	21.249	167.017
ISI 3	74.044	245.892	79.428	240.458
ISI 4	58.033	221.626	61.299	213.74

#### 5.4 Οπτικός Εντοπισμός και Ψηφιοποίηση Ρωγμών

Με τη χρήση εργαλείων οπτικής απόδοσης στις εικόνες του Βήματος 3 και πιο

συγκεκριμένα μείωση της φωτεινότητας (brightness), αύξηση της αντίθεσης (contrast) και μείωση του δείκτη gamma πραγματοποιούνται σημαντικές αλλαγές στην οπτικοποίηση που καθιστούν εφικτή και σε μεγαλύτερο βαθμό ευκολότερη τη ψηφιοποίηση των ρωγμών στις εικόνες. Στην Εικόνα 32 φαίνεται ένα παράδειγμα της διαδικασίας οπτικής απόδοσης με πειραματισμό σε τιμές.



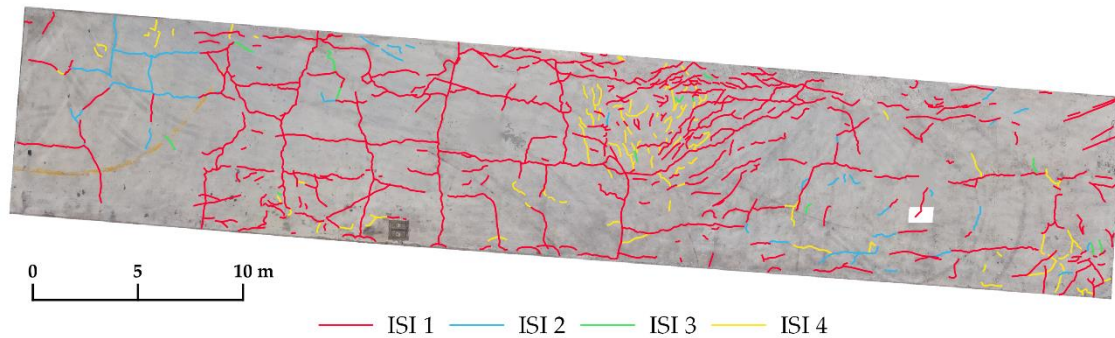
Εικόνα 32 – Παράδειγμα χρήσης εργαλείων οπτικής απόδοσης (α) εικόνα με εφαρμογή διάμεσου φίλτρου, (β) εικόνα με χρήση εργαλείων οπτικής απόδοσης

Ύστερα από αρκετούς πειραματισμούς στις τιμές για καθεμία από τις 4 εικόνες, προκύπτει η ψηφιοποίηση των ρωγμών σε ολόκληρη την πλάκα σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, στην Εικόνα 33 φαίνονται με υπόβαθρο την ISI 4:

- με κόκκινο χρώμα οι ρωγμές που είναι εμφανείς στην ISI 1,
- με μπλε χρώμα οι ρωγμές που είναι εμφανείς στην ISI 2,
- με πράσινο χρώμα οι ρωγμές που είναι εμφανείς στην ISI 3,
- με κίτρινο χρώμα οι ρωγμές που είναι εμφανείς στην ISI 4.

Σημειώνεται πως κάθε χρώμα πέραν του κόκκινου αναπαριστά μόνο τις επιπλέον ρωγμές που έχουν προκύψει μετά την ημερομηνία της προηγούμενης λήψης, δηλαδή οι ρωγμές με μπλε χρώμα είναι εκείνες που εμφανίστηκαν στο μεσοδιάστημα των λήψεων ISI 1 με ISI 2. Αντίστοιχα συμβαίνει και με τα υπόλοιπα χρώματα και λήψεις. Επισημαίνεται επίσης πως λόγω της παρουσίας αυτοκίνητου και βυτιοφόρου φορτηγού (που αναπτύσσει και μεγάλη σκιά) στην ISI 1 στο δυτικό τμήμα της (Εικόνα 28), ρωγμές που μπορεί να βρίσκονται στα σημεία αυτά είναι αδύνατο να ψηφιοποιηθούν και γι' αυτό πρώτη φορά

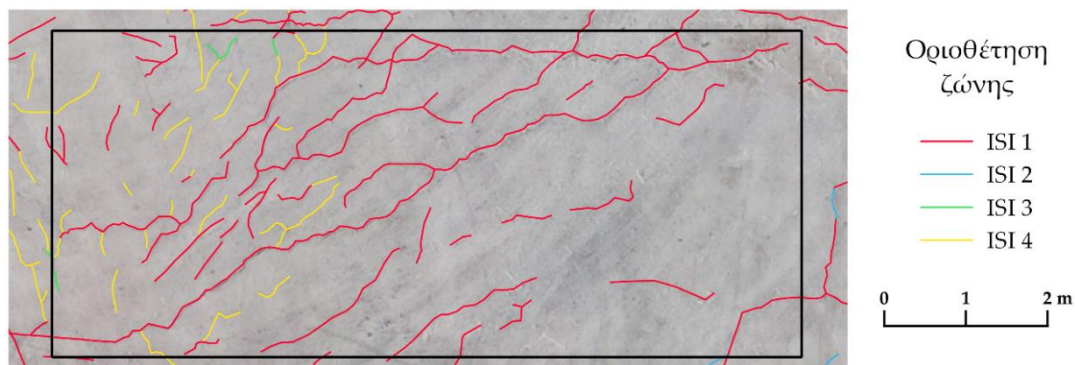
εμφανίζονται στην αμέσως επόμενη λήψη δηλαδή την ISI 2. Αντίστοιχο πρόβλημα συμβαίνει και στην ISI 3 όπου λόγω της σκιάς από τα κατάρτια του ιστοφόρου που βρισκόταν τη στιγμή εκείνη αγκυροβολημένο στο λιμάνι, είναι δύσκολο να καταγραφούν οι ρωγμές.



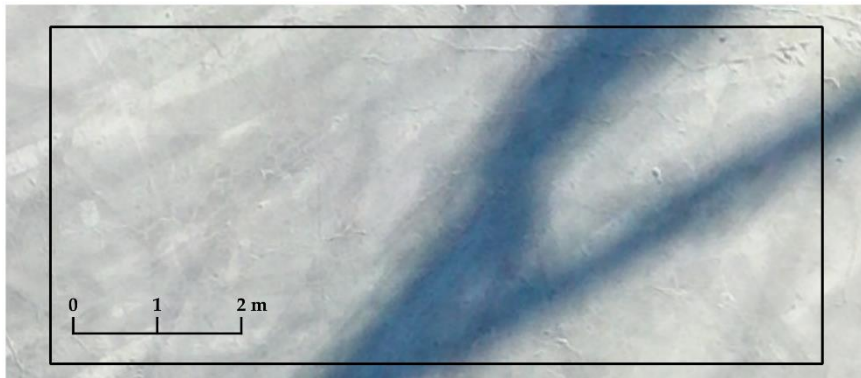
Εικόνα 33 – Ψηφιοποίηση ρωγμών

## 5.5 Οριοθέτηση Ζώνης Ρωγμών

Από τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης αλλά και από τη μέχρι τώρα επεξεργασία προκύπτουν δύο βοηθητικά στοιχεία για τη συνέχεια. Πρώτον υπάρχει ένα τμήμα στην πλάκα σκυροδέματος που παρουσιάζει έντονο πρόβλημα ρωγμών και το οποίο φαίνεται πως στο πέρασμα του χρόνου εξελίσσεται (Εικόνα 34). Το συγκεκριμένο τμήμα αποτελεί και τη ζώνη οριοθέτησης για τη συνέχεια της μεθοδολογίας. Μέσω του κλειστού πολυγώνου της ζώνης γίνεται αποκοπή κάθε εικόνας από το βήμα 3, ώστε να παραχθούν 3 νέες εικόνες εισόδου για τη συνέχεια στα παρακάτω βήματα. Προκύπτουν 3 εικόνες, καθώς όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, στην επιλεγμένη ζώνη εμπίπτει η σκιά από τα κατάρτια (ISI 3) καθιστώντας το έργο της ανάλυσης της εικόνας ανέφικτο λόγω και της σημαντικής διαφοράς στο ύψος πτήσης συγκριτικά με τις υπόλοιπες λήψεις. Συνεπώς τα βήματα από εδώ και στο εξής συνεχίζονται μόνο με το περιχομμένο τμήμα των ISI 1,2,4.



Εικόνα 34 - Οριοθέτηση ζώνης ρωγμών για δημιουργία νέων εικόνων εισόδου



Εικόνα 35 – Αιτιολόγηση αποκλεισμού ISI 3 από τη συνέχεια της μεθοδολογίας ανίχνευσης

## 5.6 Εφαρμογή Κατάτμησης με Τοπική Κατωφλίωση

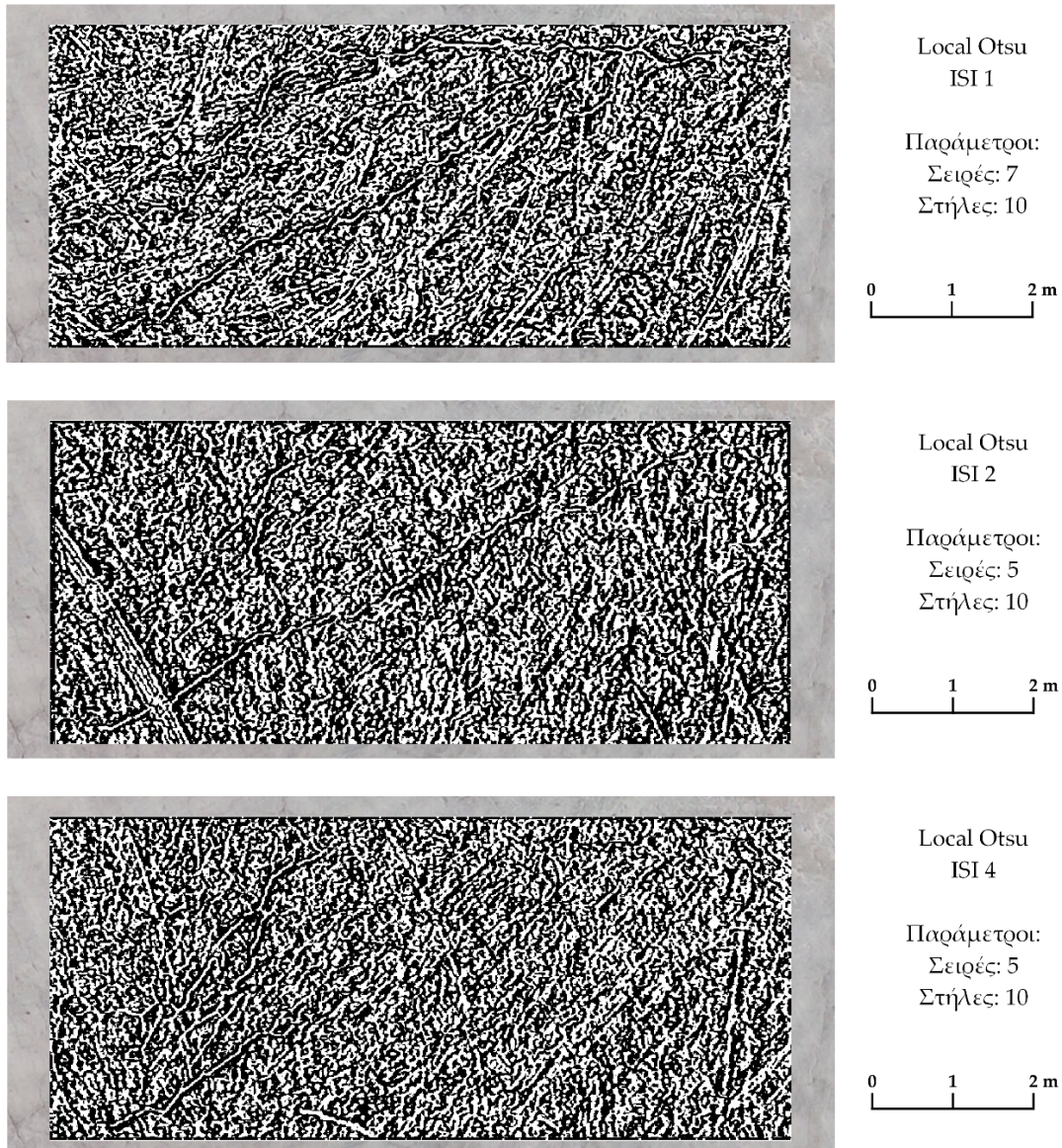
Από το Βήμα 5 έχει δημιουργηθεί το τελικό σύνολο δεδομένων με 3 εικόνες για ανάλυση, συνεπώς σ' αυτές εφαρμόζεται τοπική κατωφλίωση με τις δύο μεθόδους. Όπως επεξηγήθηκε και παραπάνω στην κατωφλίωση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η επιλογή των παραμέτρων καθώς πρόκειται για το πρώτο σημαντικό βήμα της μεθοδολογίας για τη ανίχνευση των ρωγμών και τη μετατροπή της εικόνας σε δυαδική μορφή.

Για τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, οι τιμές των παραμέτρων που απαιτεί κάθε αλγόριθμος προκειμένου να «τρέξει» επιλέχθηκαν ύστερα από πολλαπλά πειράματα αυξομείωσης τους. Ειδικότερα, η τιμή για το παράθυρο του δομικού στοιχείου δηλαδή το πόσα pixels θα λάβει υπόψη σαν υπό-περιοχή της εικόνας η κατωφλίωση χρειάστηκε αρκετό χρόνο για να προσδιοριστεί, ώστε να καλύπτει τις ρωγμές σε όλο το φάσμα τους κρατώντας τις λεπτομέρειες αλλά και επιπλέον να μην διατηρεί σε υψηλά επίπεδα το θόρυβο από διάφορα άλλα χαρακτηριστικά της εικόνας (Boiangiu et al., 2011) που αναπαρίστανται με σκουρόχρωμους τόνους που τείνουν ή είναι μαύρου χρώματος.

Έτσι, στην περίπτωση της τοπικής κατωφλίωσης με την υλοποίηση της προσαρμοστικής μεθόδου (local threshold) χρησιμοποιήθηκαν τιμές για περιοχές των 19, 23, 27 εικονοστοιχείων αντίστοιχα για κάθε εικόνα/λήψη, αφού το δομικό στοιχείο που επιλέγεται είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (rectangle) ή τετράγωνο όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση ενώ για την τιμή του παράγοντα προσαρμογής (offset) επιλέχθηκε να είναι ίση με 3. Στην περίπτωση της κατωφλίωσης με τη μέθοδο Otsu, οι παράμετροι καθορισμού είναι σε πρώτη φάση το σχήμα του δομικού στοιχείου και στη συνέχεια οι παράμετροι του για μέγεθος γραμμών και στηλών. Η επιλογή έγινε αφού εφαρμόστηκαν πρώτα όλα τα δομικά στοιχεία: κύκλου, έλλειψης, ορθογωνίου, τετραγώνου, γραμμής, και παρατηρήθηκε πως για τις εικόνες/λήψεις τα δομικά στοιχεία που ανιχνεύουν τις ρωγμές πιο αποδοτικά είναι ορθογώνια με διαστάσεις 7x10, 5x10 και



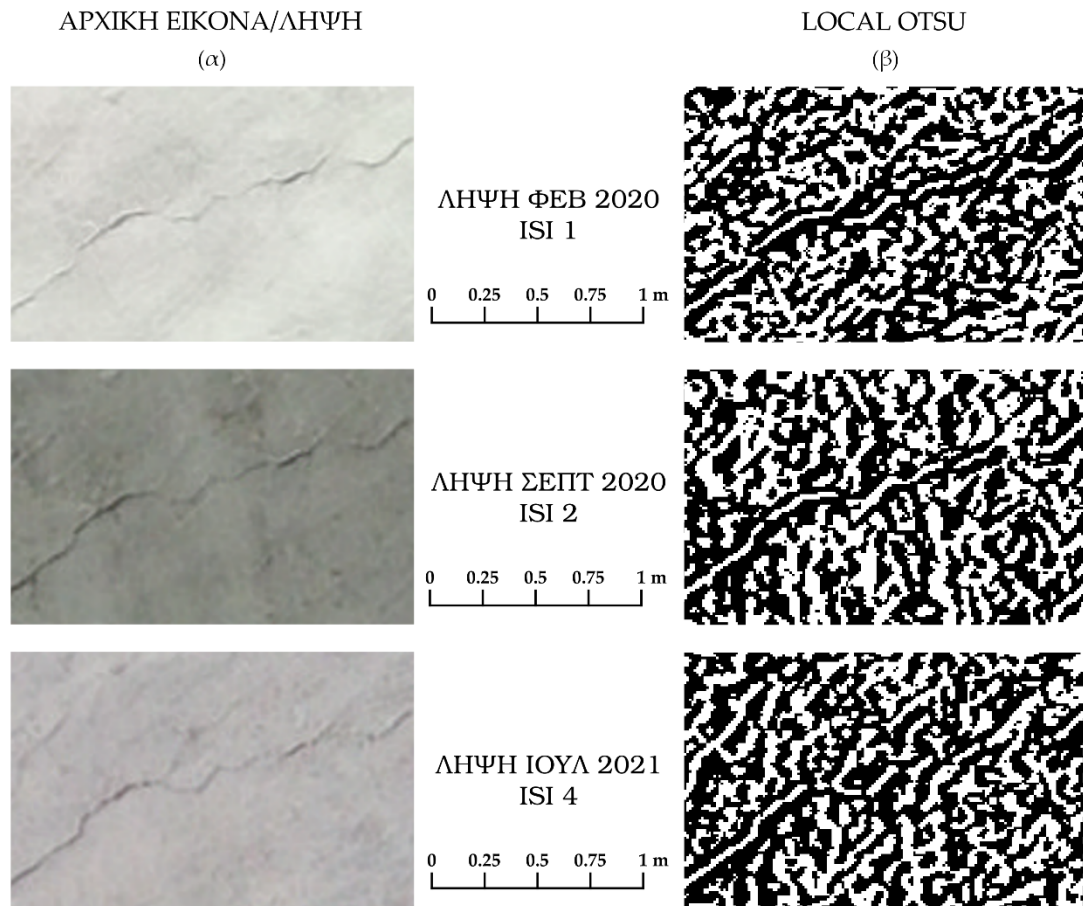
5x10 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 36, 37, 38 και 39.



Εικόνα 36 – Αποτελέσματα αλγορίθμου Local Otsu για τις 3 εικόνες/λήψεις

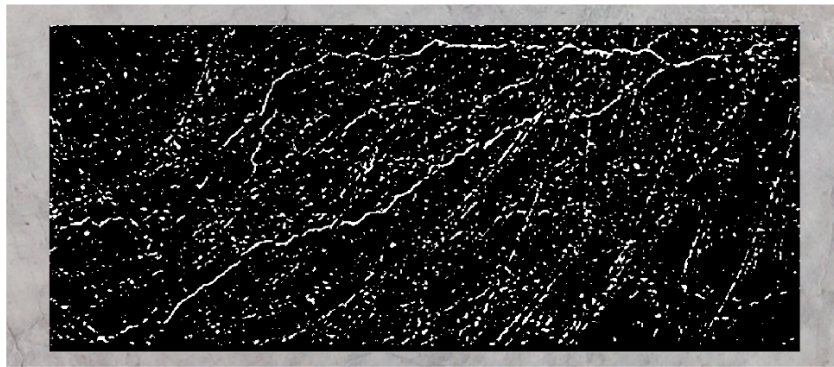
Από τα παραπάνω αποτελέσματα στην Εικόνα 36, παρατηρείται πως οι εμφανείς ρωγμές έχουν ανιχνευτεί αρκετά ικανοποιητικά (λευκό χρώμα), όμως το πρόβλημα της μεθόδου εντοπίζεται στο ότι δημιουργείται έντονος θόρυβος από λευκά εικονοστοιχεία που τα περισσότερα από αυτά δημιουργούν ομάδες εικονοστοιχείων που δεν αποτυπώνουν ρωγμές αλλά ανταποκρίνονται στα κριτήρια της κατωφλίωσης (Εικόνα 37). Δοκιμάζοντας διαφορετικές μικρότερης περιοχής τιμές τα αποτελέσματα περιελάμβαναν και πάλι εκτεταμένο θόρυβο ενώ και στην αντίθετη περίπτωση με μεγαλύτερες περιοχές στα αποτελέσματα υπήρχε οπτικοποίηση ακόμη μεγαλύτερων ομάδων λευκών εικονοστοιχείων

καθιστώντας αδύνατη την ανίχνευση.



Εικόνα 37 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος από *Local Otsu*

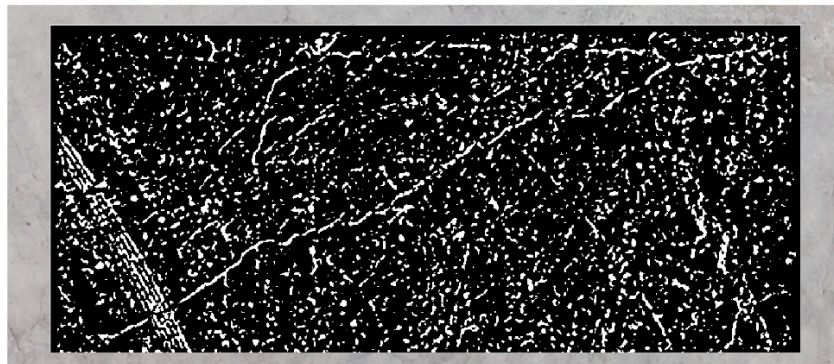
Αντιθέτως, στα αποτελέσματα που ακολουθούν (Εικόνες 38 και 39) και αναφέρονται στην προσαρμοστική μέθοδο (*local threshold*), η οποία είναι και πιο απλή, υπάρχει παρουσία θορύβου αλλά όχι στο βαθμό που παρατηρείται στην εφαρμογή της *Otsu*. Οι ρωγμές προσδιορίζονται σε αρκετά καλό βαθμό και ιδίως στα μεγάλα ενιαία τμήματα, οπότε οπτικά δεν δημιουργείται τόση σύγχυση παρά μόνο σε περιοχές που παρατηρείται παρουσία μαύρων αποτυπωμάτων από ελαστικά (εικόνα/λήψη ISI 2 κάτω δεξιά).



Local Threshold  
ISI 1

Παράμετροι:  
Παράθυρο: 19  
Offset: 3

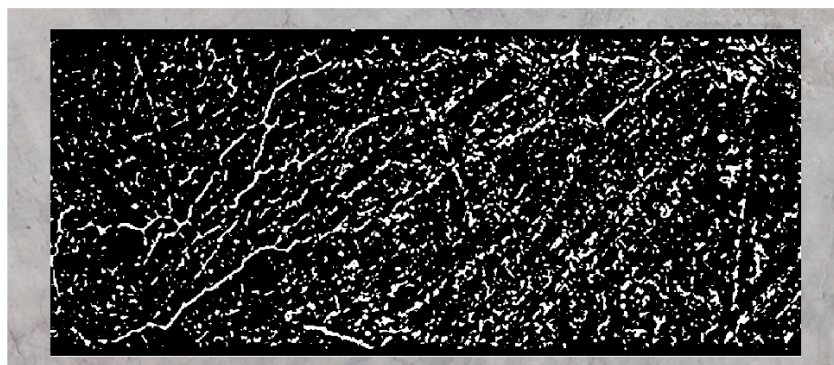
0 1 2 m



Local Threshold  
ISI 2

Παράμετροι:  
Παράθυρο: 23  
Offset: 3

0 1 2 m



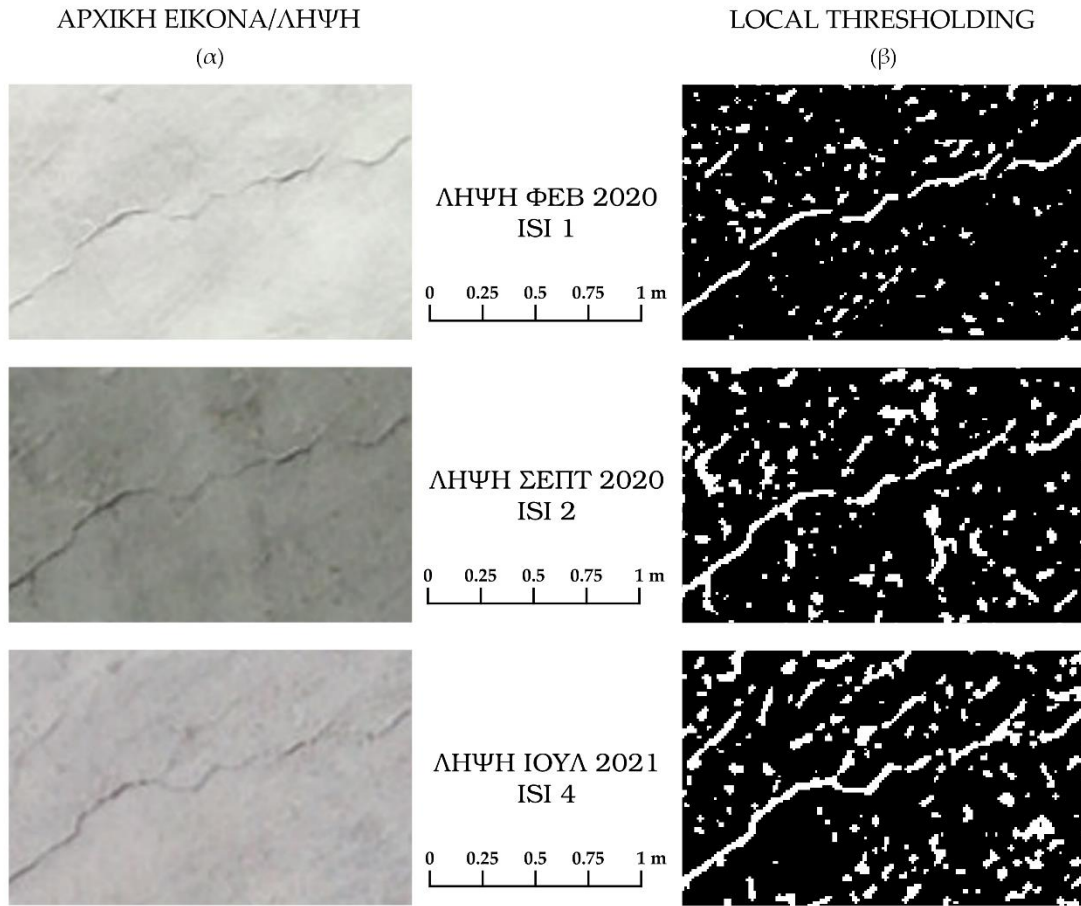
Local Threshold  
ISI 4

Παράμετροι:  
Παράθυρο: 27  
Offset: 3

0 1 2 m

Εικόνα 38 - Αποτελέσματα αλγορίθμου Local Threshold για τις 3 εικόνες/λήψεις

Στο ίδιο παράδειγμα εστίασης με την Εικόνα 37, η Εικόνα 39 δείχνει να επιβεβαιώνει την παραπάνω διαπίστωση περί θορύβου και την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής.



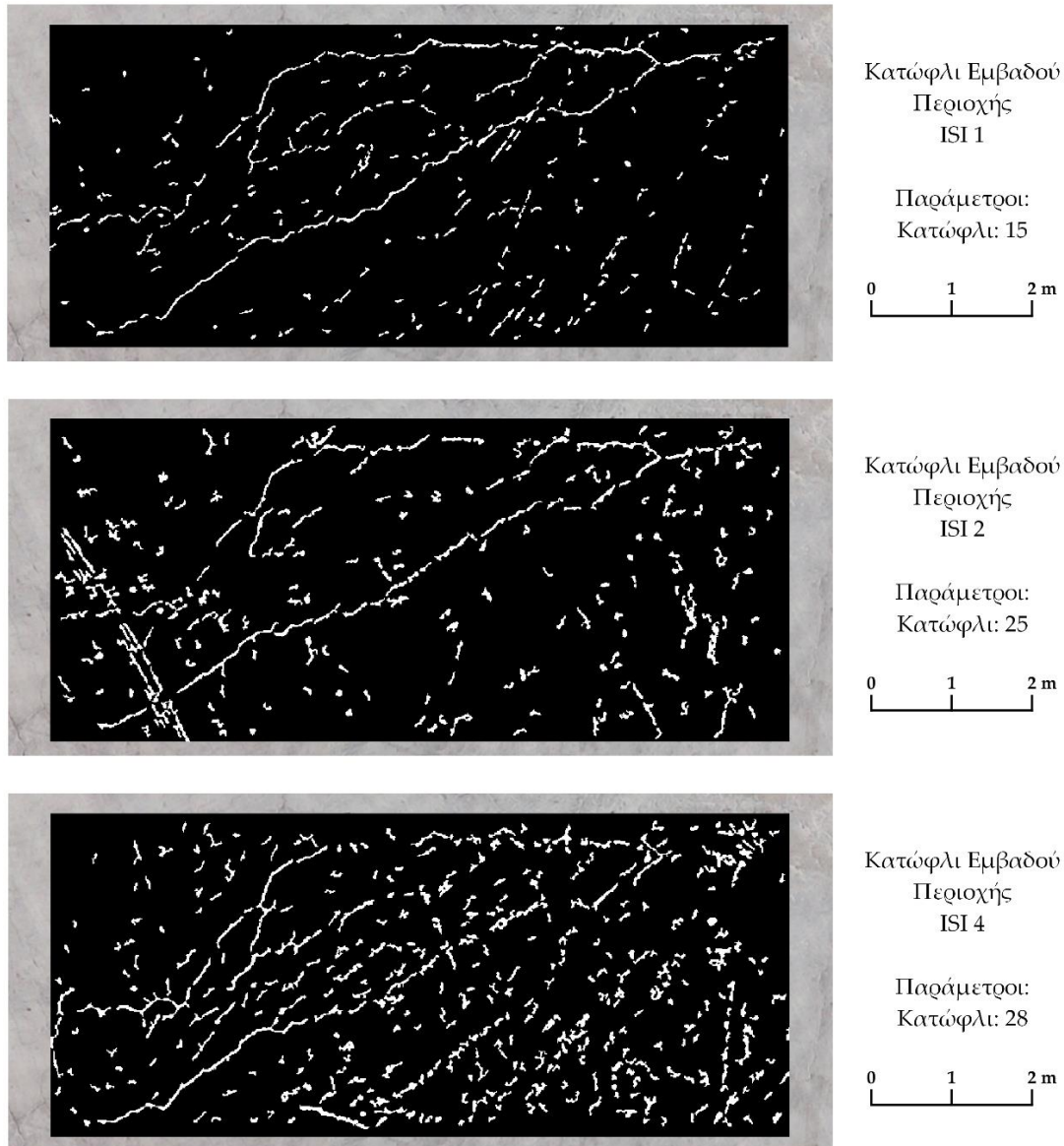
Εικόνα 39 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος από *Local Threshold*

Με επιτυχημένη πλέον την κατάτμηση της εικόνας μέσω των τεχνικών κατωφλίωσης και δεδομένου πως συγκρινόμενες οι δύο τεχνικές, η *Local Threshold* αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα, για τα επόμενα βήματα της μεθοδολογία θα διατηρηθούν τα 3 αρχεία των αποτελεσμάτων της ως εικόνες εισαγωγής (input images).

## 5.7 Διόρθωση Οπτικών Σφαλμάτων Εικόνας – Αφαίρεση Θορύβου

Στο βήμα αυτό γίνεται μια σημαντική διεργασία για την αφαίρεση του θορύβου από τη δυαδική εικόνα και άρα την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή είναι μιας μορφής κατωφλίωση χρησιμοποιώντας μια τιμή βάσει του παρατηρούμενου εμβαδού των ομάδων εικονοστοιχείων (λευκά) που έχουν καταναμηθεί ως ρωγμές. Αυτό που παρατηρείται κατά την οπτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων της κατωφλίωσης του Βήματος 6 είναι ότι ο θόρυβος δεν περιλαμβάνει μόνο γραμμικά στοιχεία/ομάδες εικονοστοιχείων αλλά και σχημάτων που τείνουν σε κύκλο ή έλλειψη. Όπως στις

μεθοδολογίες των Chen et al. (2021) και των Dorafshan et al. (2019), η περιοχή αποκοπής καθορίζεται σύμφωνα με τον κανόνα της συνδεσιμότητας των οκτώ γειτονικών στοιχείων, η οποία εξετάζει τη συνδεσιμότητα των εικονοστοιχείων στην κατακόρυφη, οριζόντια ή διαγώνια κατεύθυνση, έτσι ώστε το εικονοστοιχείο  $(x, y)$  να συνδέεται με όλα τα εικονοστοιχεία  $(x \pm 1, y \pm 1)$ .



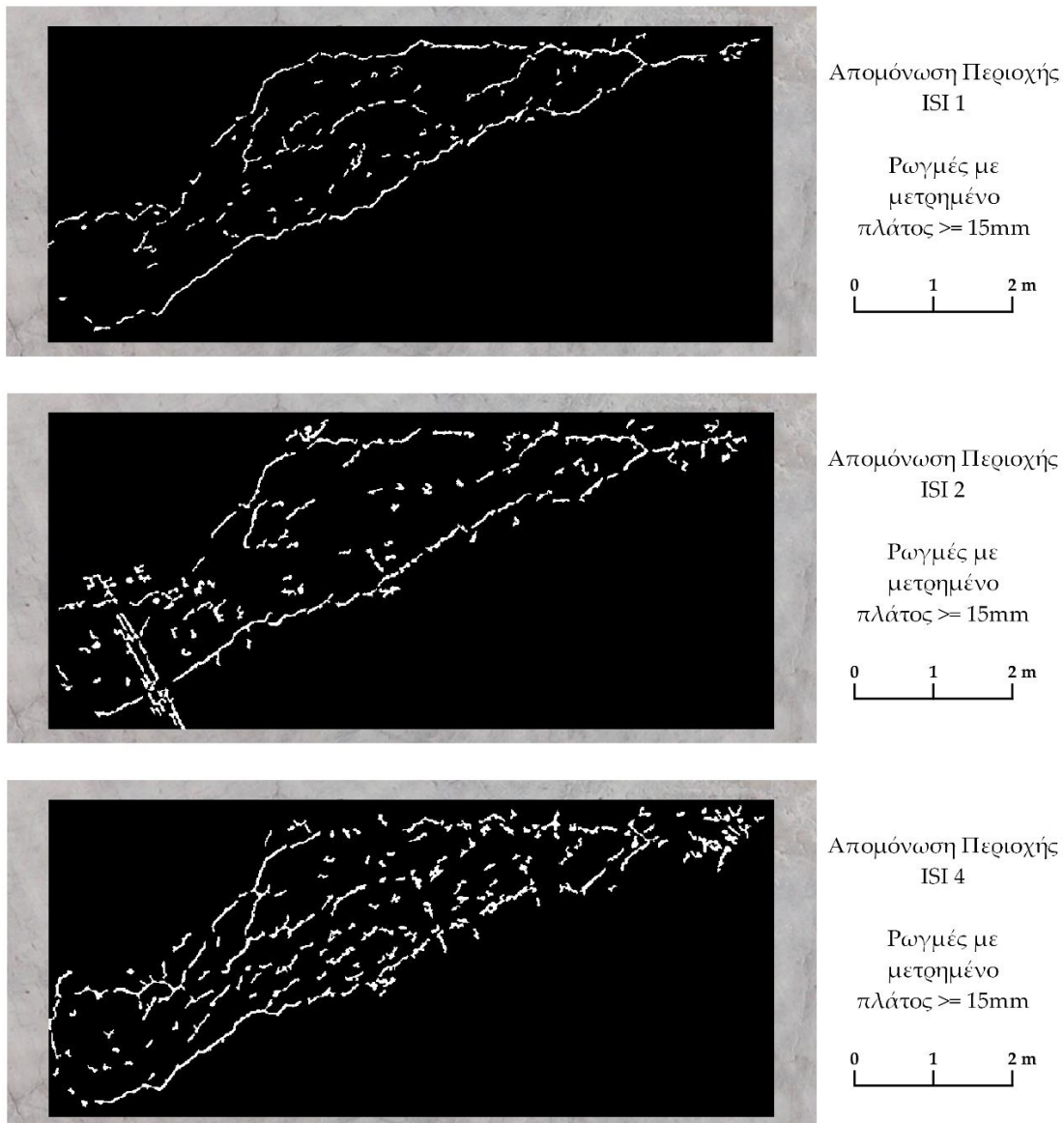
Εικόνα 40 - Αποτελέσματα αποθορυβοποίησης για τις 3 εικόνες/λήψεις

Για τις εικόνες/λήψεις χρησιμοποιείται κατώφλι για 15, 25 και 28 εικονοστοιχεία αντίστοιχα. Επιπλέον στο βήμα αυτό, μετά την αποθορυβοποίηση γίνεται εκ νέου οπτικός έλεγχος της εικόνας και βάσει των παρατηρήσεων που έχουν καταγραφεί από την επιτόπια επιθεώρηση και σύμφωνα με τις αρχικές παρατηρήσεις από τη ψηφιοποίηση των ρωγμών

διαπιστώνεται πως ρωγμές με πλάτος περίπου ίσο και μικρότερο των 15mm δεν είναι εμφανείς (invisible) ενώ και κάποιες ρωγμές περί τα 20mm πλάτους έχουν ορισμένα προβλήματα αναγνώρισης/ανάγνωσης, τουλάχιστον στις συγκεκριμένες λήψεις και για τις συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού. Πιο συγκεκριμένα, κάτι τέτοιο εντοπίζεται κατά βάση στις νοητές ζώνες που μπορούν να δημιουργηθούν από την κεντρική ρωγμή της επιλεγμένης περιοχής, που βρίσκεται στη διαγώνιο από την επάνω δεξιά γωνία και εκτείνεται προς την κάτω αριστερή, όπως επίσης και από τη ρωγμή που έχει ίδιο σημείο αφετηρίας, εκτείνεται προς την επάνω αριστερή γωνία και λίγο μετά τα μέσα της επιλεγμένης περιοχής αλλάζει κατεύθυνση προς την κάτω αριστερή γωνία λίγο παραπάνω από την πρώτη ρωγμή.

Στην έρευνα των Yang et al. (2018), διαπιστώνεται πως στις περισσότερες τεχνικές ανίχνευσης ρωγμών με ανάλυση εικόνας υπάρχει αδυναμία ανίχνευσης λεπτών, κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, ρωγμών, αφού είτε η κάμερα βρίσκεται πολύ μακριά από το δείγμα, είτε αντανακλάται φως και άρα οι ρωγμές δεν εμφανίζονται με σκοτεινούς τόνους. Σε μια εικόνα, το όριο μιας ρωγμής βρίσκεται σε ένα επίπεδο του γκρι μεταξύ σκοτεινών (που αντιστοιχεί στη ρωγμή) και ανοιχτόχρωμων τόνων (που αντιστοιχεί στην άθικτη επιφάνεια του σκυροδέματος), υποδεικνύοντας ότι μόνο ένα μέρος του γκριζου εικονοστοιχείου αντιστοιχεί σ' αυτή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όπως διατυπώνουν αρχικά στην έρευνα τους οι Yang et al. (2016) και επιβεβαιώνουν και στην μετέπειτα οι Yang et al. (2018), οι ρωγμές που είναι λεπτότερες από περίπου το ένα τρίτο ενός εικονοστοιχείου σε μια εικόνα δεν μπορούν να αναγνωριστούν.

Επειδή αξιολογείται το QGIS, οι μετρήσεις σε εικόνες μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν απευθείας στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 - ΕΓΣΑ'87, όπου είναι το σύστημα αναφοράς των εικόνων όπως προκύπτει από τη γεωχωρική πληροφορία, χωρίς να χρειάζεται κάποιος τύπος αναγωγής και αυτό είναι σημαντικό γιατί μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος και εντοπίζεται ευκολότερα το όριο οπτικής ανάγνωσης, το οποίο και χρησιμοποιείται ώστε να αποκοπούν εικονοστοιχεία εκτός της νοητής ζώνης (Εικόνα 41) και άρα να υπάρχει απομόνωση της περιοχής εντός. Ρωγμές με πλάτος περί τα 15mm εντός της ζώνης αυτής είναι πιο δύσκολο να αποκοπούν και παραμένουν στην εικόνα ώστε να δειχθεί και παρακάτω αν τελικά στα αποτελέσματα που εξάγονται έχουν ανιχνευτεί και αν ναι σε τι βαθμό αξιοπιστίας.



Εικόνα 41 - Αποτελέσματα ζώνης απομόνωσης ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις

## 5.8 Εφαρμογή Μορφολογικών Τελεστών

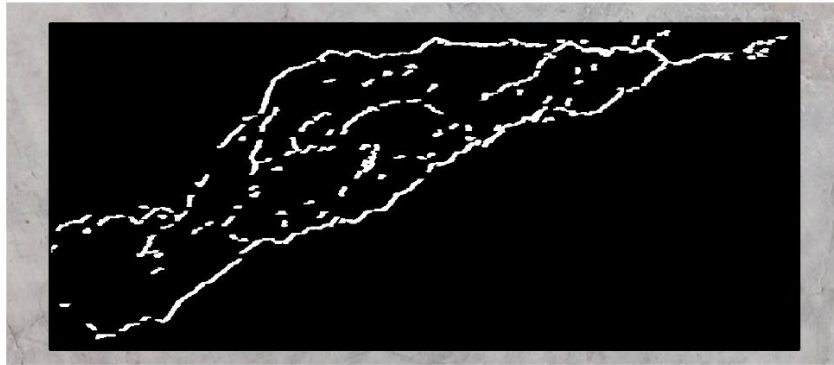
Στο βήμα αυτό γίνεται η χρήση των μορφολογικών τελεστών και πιο συγκεκριμένα της διαστολής και της συστολής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτό που μπορεί να επιτύχουν οι συγκεκριμένες μορφολογικές πράξεις είναι πολύ συγκεκριμένο για την ανίχνευση των ρωγμών καθώς ενισχύουν-συνδέουν ή εξαλείφουν εικονοστοιχεία και χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 42, η διαστολή επεκτείνει ή διαστέλλει τα όρια των περιοχών που έχουν ανιχνευτεί ως ρωγμές και συνεπώς χρησιμεύει

στη σύνδεση αποσπασματικών ή κατακερματισμένων τμημάτων ρωγμών που μπορεί να απεικονίζονται με ασυνέχειες ή με ανωμαλίες. Γειτονικά τμήματα που ταιριάζουν στο δομικό στοιχείο του τετραγώνου με  $3 \times 3$  διαστάσεις για κάθε εικόνα λήψης, πρακτικά μεγεθύνουν τη ρωγμή. Ωστόσο επειδή στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούνται ορισμένες ασυνέχειες σε τμήμα ρωγμών που δεν υπερκαλύπτονται από την εφαρμογή μιας επανάληψης της τεχνικής της διαστολής κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστούν παραπάνω επαναλήψεις. Πάλι με συνεχόμενους πειραματισμούς προκύπτει πως με τη δεύτερη επανάληψη αυτό είναι εφικτό χωρίς να δημιουργείται στην πλειονότητα των ρωγμών πρόβλημα θορύβου με πολλά επιπλέον εικονοστοιχεία στη δομή που θα διαταράξουν το πλάτος.

Στην Εικόνα 43, φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της τεχνικής της συστολής στην εικόνα που έχει προκύψει από τη διαστολή προηγουμένως. Η συστολή με τη σειρά της συρρικνώνει τα όρια κατά τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με τη σάρωση ενός δομικού στοιχείου. Και σ' αυτή την περίπτωση ύστερα από δοκιμές, η μορφή και οι συντελεστές του δομικού στοιχείου είναι ίδιες με αυτούς της διαστολής και επιτυγχάνουν στην απομάκρυνση μικρών, ψευδών αντικειμένων ή θορύβου που μπορεί να επηρεάσουν τον αλγόριθμο ανίχνευσης τα οποία έχουν απομείνει από τη διαστολή. Πρακτικά, αυτή η αραίωση οδηγεί στην ομοιομορφία του πλάτους στα αρχικά δεδομένα της εικόνας εισαγωγής, γι' αυτό και επαναλαμβάνεται δύο φορές, με τη διαφορά πως στην εικόνα εξόδου πλέον έχουν καλυφθεί τα κενά.

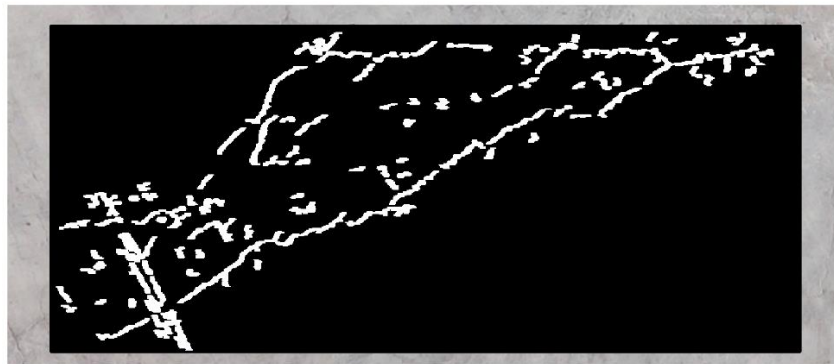




Διαστολή (dilation)  
ISI 1

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

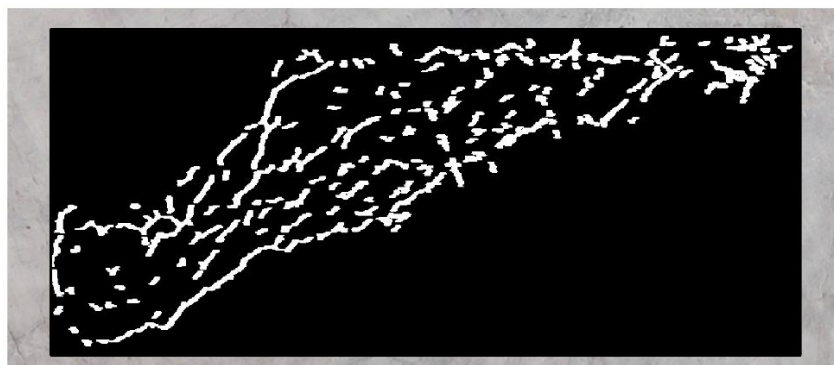
0 1 2 m



Διαστολή (dilation)  
ISI 2

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

0 1 2 m

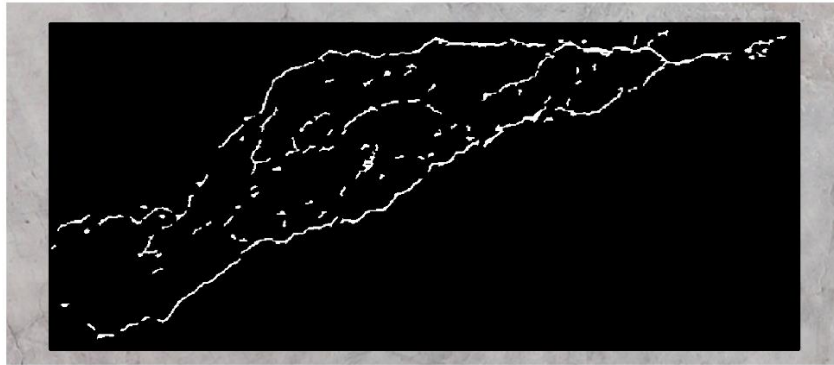


Διαστολή (dilation)  
ISI 4

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

0 1 2 m

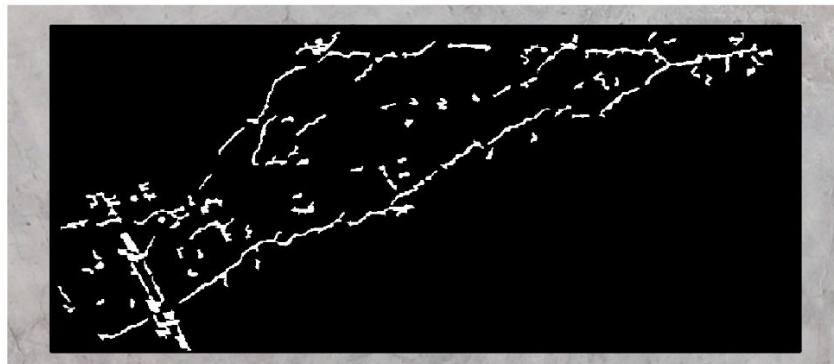
Εικόνα 42 - Αποτελέσματα διαστολής ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις



Συστολή (erosion)  
ISI 1

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

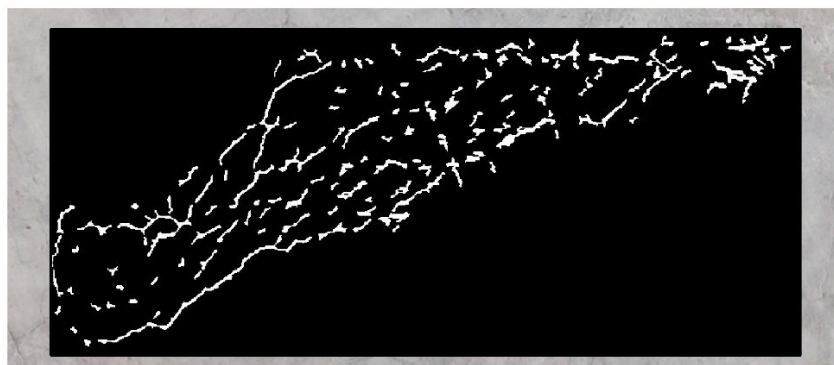
0 1 2 m



Συστολή (erosion)  
ISI 2

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

0 1 2 m



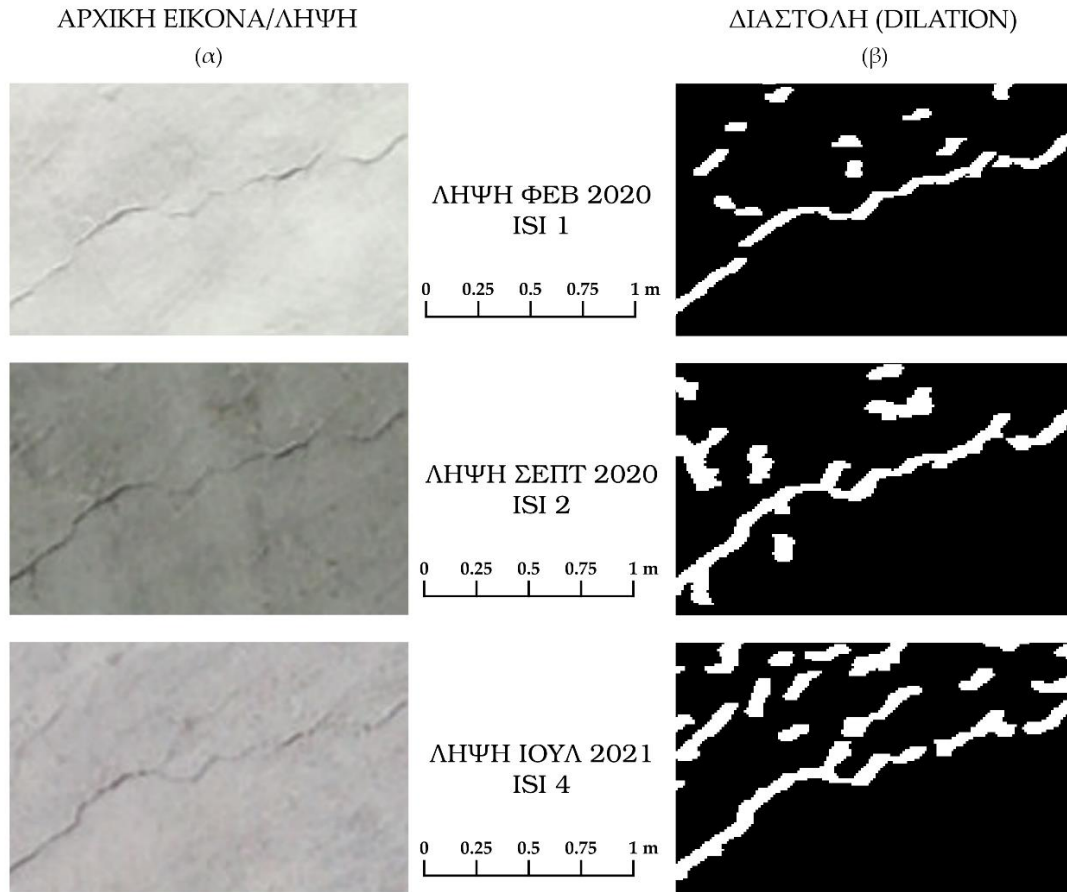
Συστολή (erosion)  
ISI 4

Παράμετροι:  
Δομικό Στοιχείο: 3  
Επανάληψη: 2

0 1 2 m

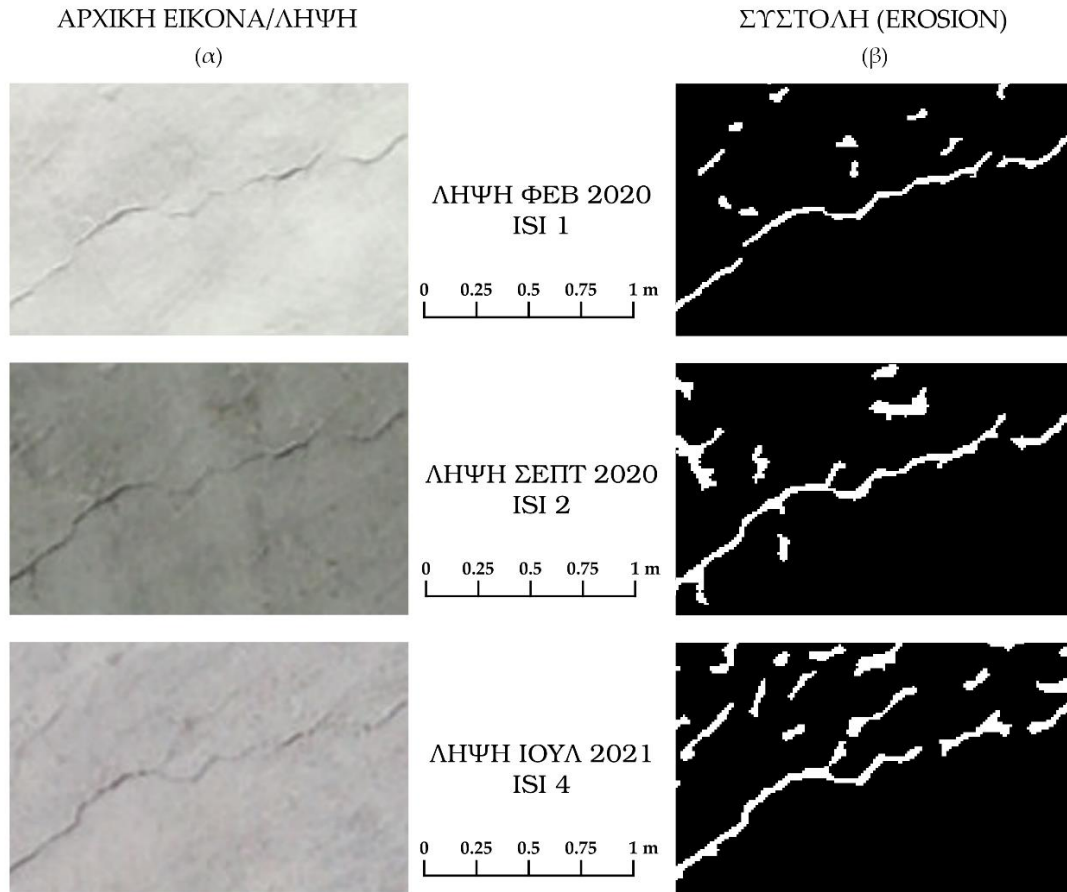
Εικόνα 43 - Αποτελέσματα συστολής ρωγμών για τις 3 εικόνες/λήψεις

Στις Εικόνες 44 και 45 φαίνονται εστιασμένα παραδείγματα για καθεμιά τεχνική ώστε να γίνει αντιληπτή η χρήση τους για την παρούσα μεθοδολογία.



Εικόνα 44 – Παράδειγμα αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικού τελεστή διαστολής για τις 3 εικόνες/λήψεις (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) εικόνα με διαστολή

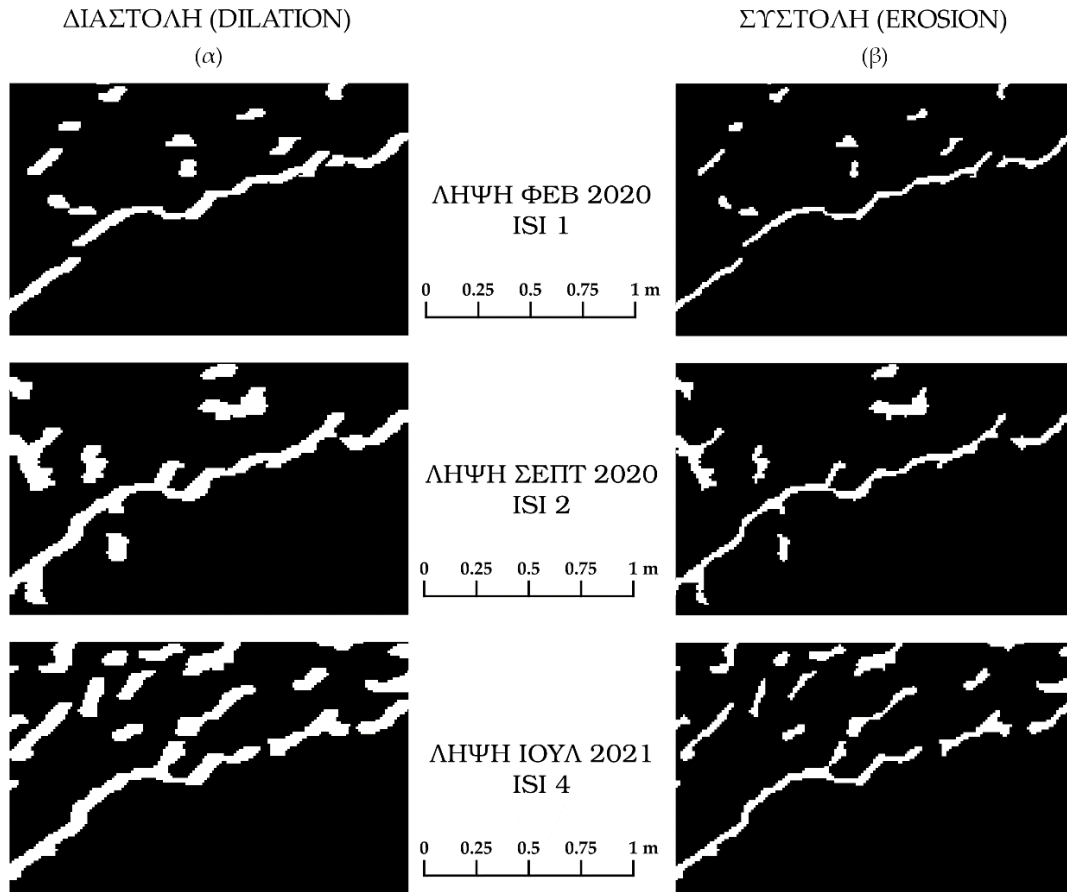
Στην Εικόνα 44, παραπάνω, γίνεται αντιληπτή η έννοια της διαστολής βάσει του πλάτους της ρωγμής καθώς συγκρινόμενες οι υπό-εικόνες μεταξύ τους για κάθε εικόνα/λήψη τότε είναι εμφανές πως η διαστολή πλησιάζει σχεδόν 2 φορές το εμφανές πλάτος στην αρχική εικόνα/λήψη.



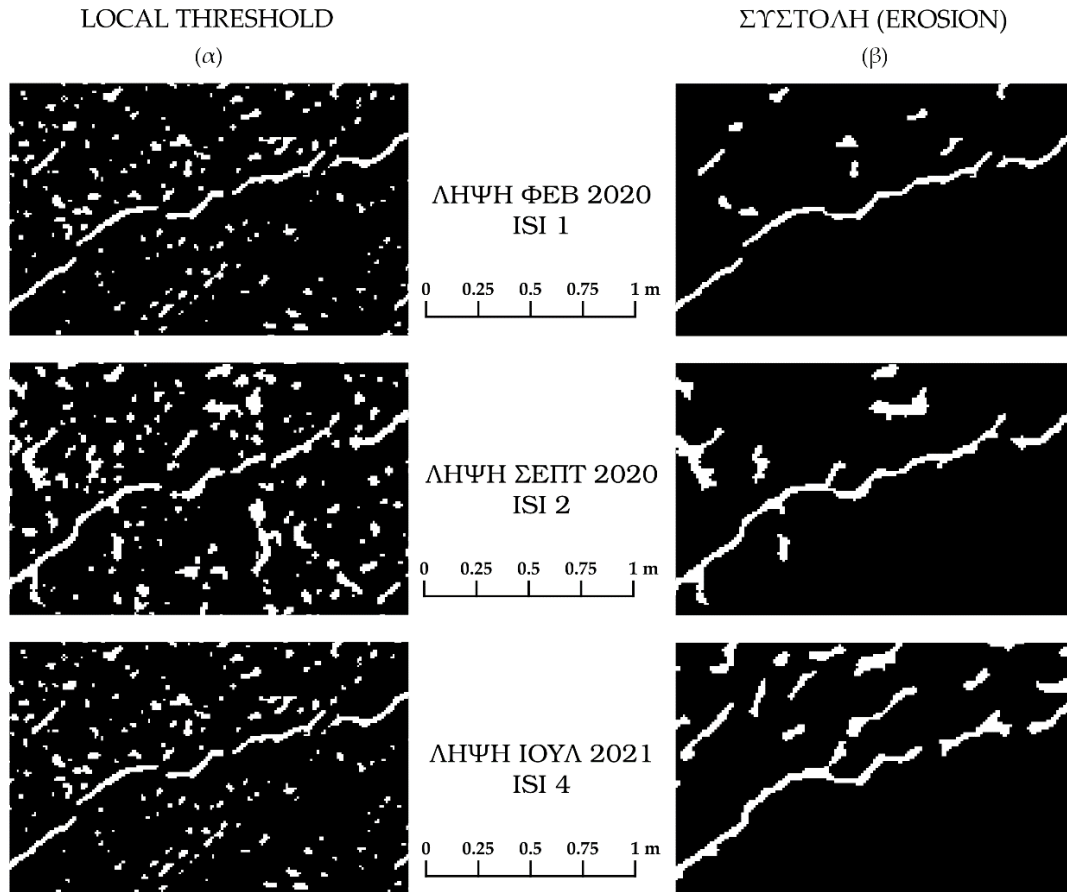
Εικόνα 45 - Παράδειγμα αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικού τελεστή συστολής για τις 3 εικόνες/λήψεις (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) εικόνα με συστολή

Στην Εικόνα 45, τα αποτελέσματα αποτυπώνουν την έννοια της συστολής δηλαδή της συρρίκνωσης των εντοπισμένων ρωγμών και τείνουν στα πραγματικά μεγέθη των ρωγμών σε πλάτος. Η διαφορά με τη διαστολή φαίνεται στην Εικόνα 46 ενώ κρίνεται πως τα βήματα ανάλυσης ως εδώ είναι σε μεγάλο βαθμό επιτυχημένα, όμως η τελική σύγκριση, παρουσίαση και αξιολόγηση θα γίνει στο Βήμα 11.

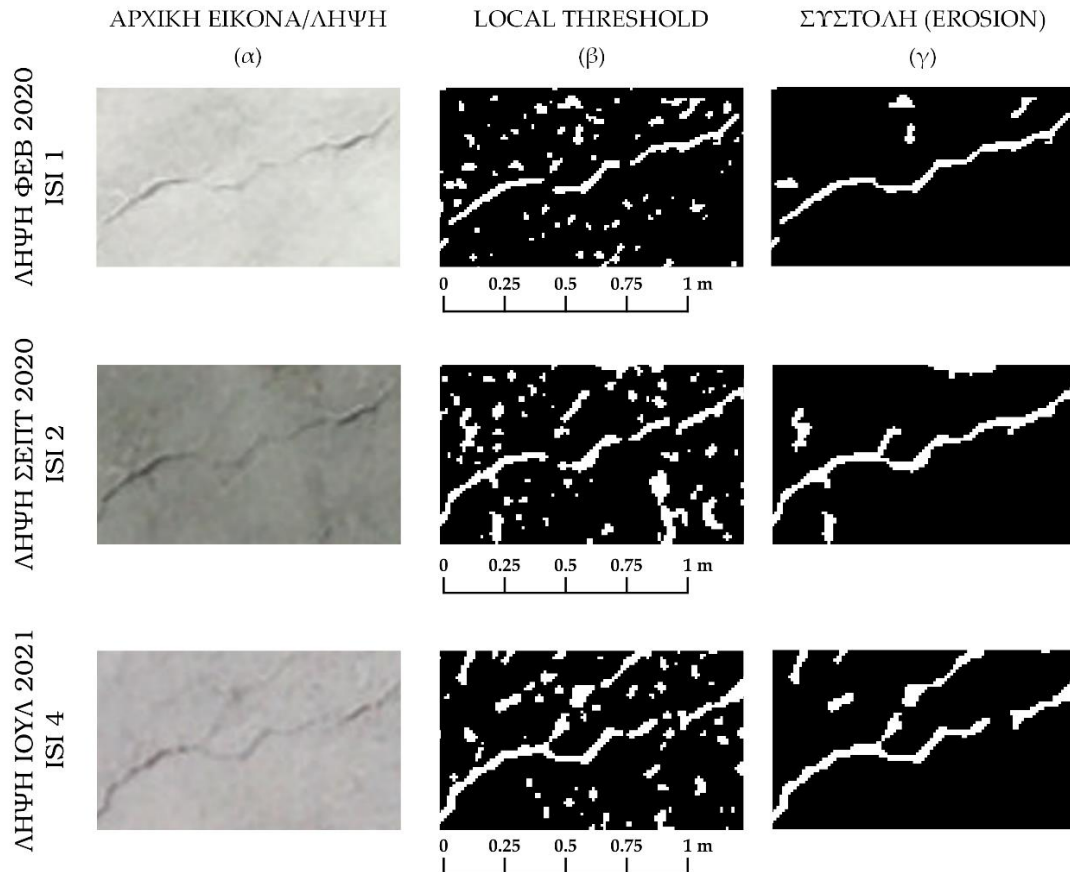
Στις Εικόνες 46, 47, 48 και 49 απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των δύο τεχνικών εμπλέκοντας και την αρχική εικόνα αλλά και το αποτέλεσμα της κατωφλίωσης από το Βήμα 6.



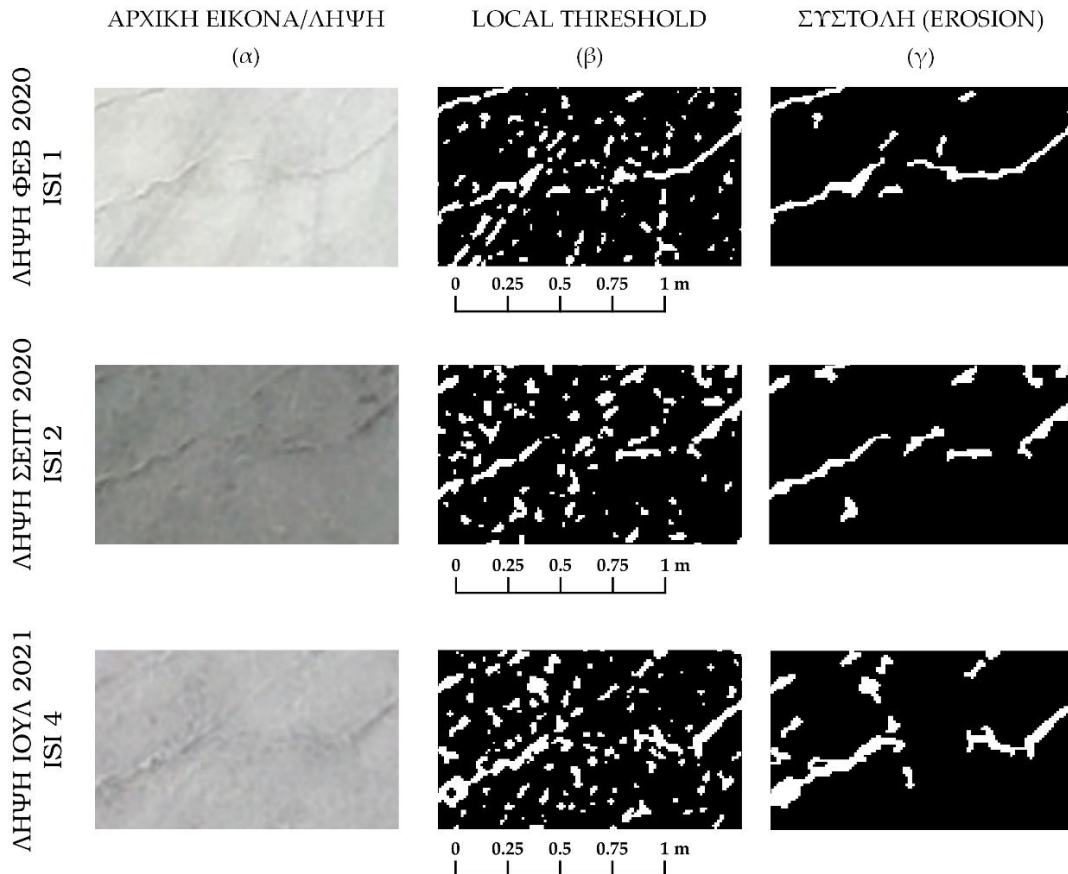
Εικόνα 46 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων εφαρμογής μορφολογικών τελεστών (α) διαστολή (β) συστολή



Εικόνα 47 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αποτελέσματος κατωφλίωσης *Local Threshold* και (β) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών



Εικόνα 48 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος κατωφλίωσης *Local Threshold* και (γ) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών (παράδειγμα 1)

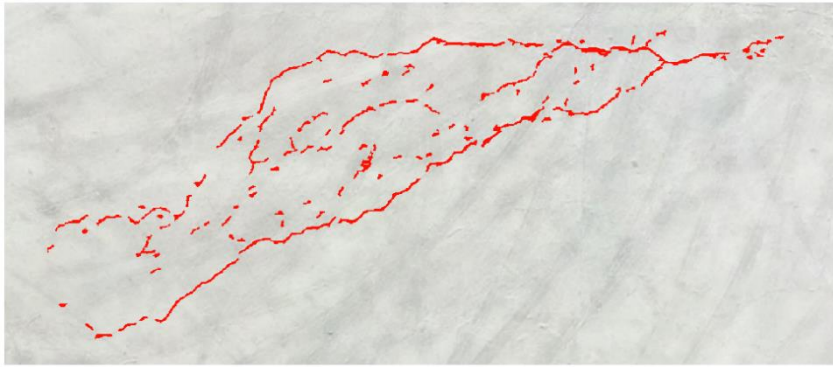


Εικόνα 49 - Παράλληλη οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σύγκρισης (α) αρχικής εικόνας/λήψης, (β) αποτελέσματος κατωφλίωσης Local Threshold και (γ) αποτελέσματος μορφολογικών τελεστών (παράδειγμα 1)

Οι Εικόνες 48 και 49 αποτελούν αντιπροσωπευτικές οπτικοποιήσεις του Βήματος 10 καθώς επιδεικνύουν πως κάθε βήμα της μεθοδολογίας συμβάλλει θετικά στην ανίχνευση με αποκορύφωμα τους μορφολογικούς τελεστές που συμπληρώνουν τα κενά/ασυνέχειες στα ενδεικτικά παραδείγματα κατά μήκος των μεγάλων τμημάτων εντοπισμένων ρωγμών.

Στην Εικόνα 50, φαίνονται τα αποτελέσματα της συστολής με τα επιλεγμένα χρώματα για κάθε ISI όπως στην Εικόνα 33 ώστε να υπάρχει πλήρης χαρτογράφηση των εντοπισμένων ρωγμών της εξεταζόμενης ζώνης χωρίς την παρουσία της κλάσης 0 που στις προηγούμενες εικόνες φαινόταν με μαύρο χρώμα. Στις Εικόνες 51 και 52 διατηρείται το ίδιο μοτίβο παραδειγμάτων μεταξύ αρχικής εικόνας και οπτικοποίηση ρωγμών με χρώματα.





Ανίχνευση Ρωγμών  
ISI 1

Οπτικοποίηση  
raster αρχείου  
(κατηγορία 1)

0 1 2 m



Ανίχνευση Ρωγμών  
ISI 2

Οπτικοποίηση  
raster αρχείου  
(κατηγορία 1)

0 1 2 m

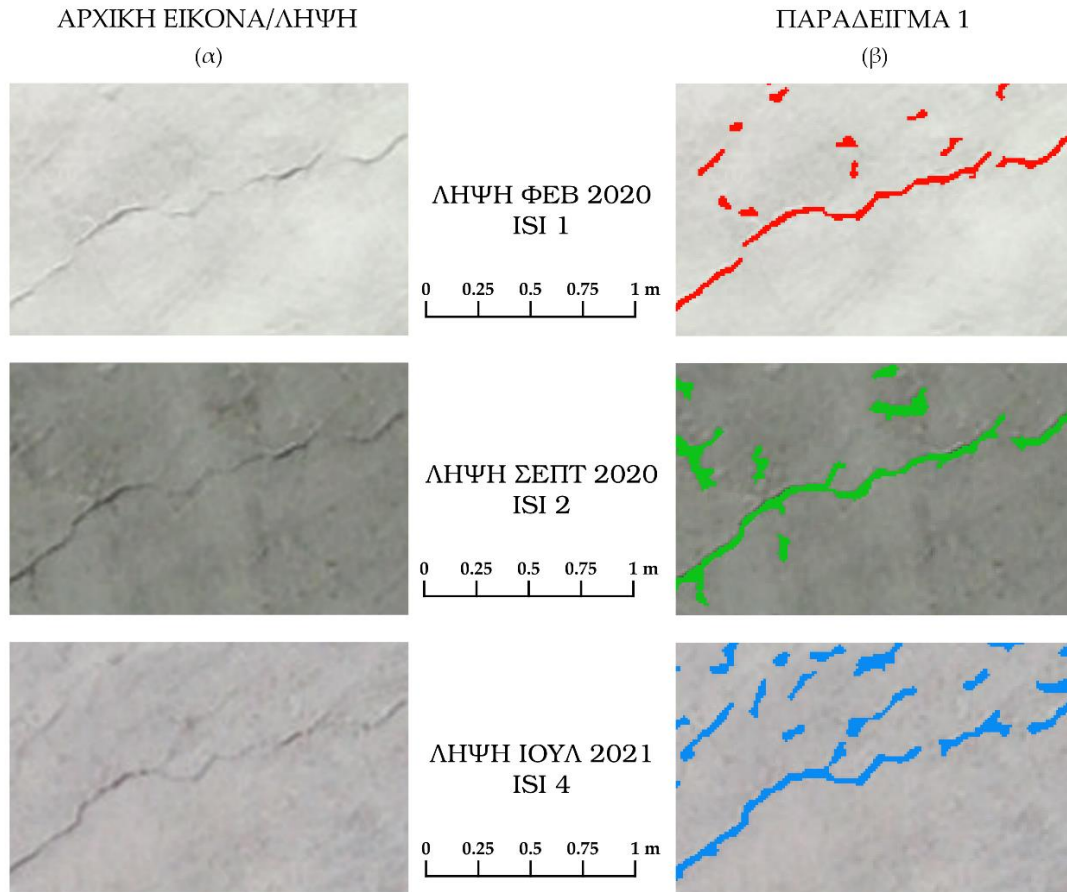


Ανίχνευση Ρωγμών  
ISI 4

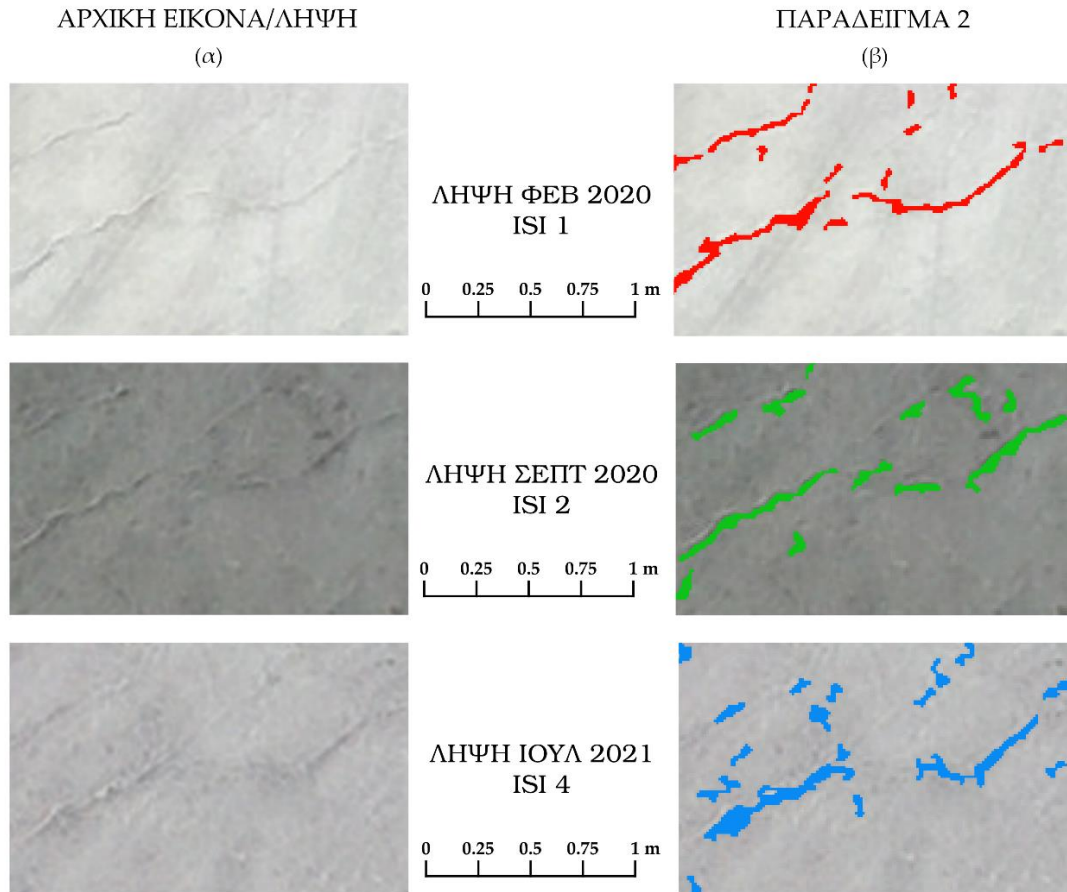
Οπτικοποίηση  
raster αρχείου  
(κατηγορία 1)

0 1 2 m

Εικόνα 50 – Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών με χρώμα σε κάθε εικόνα/λήψη



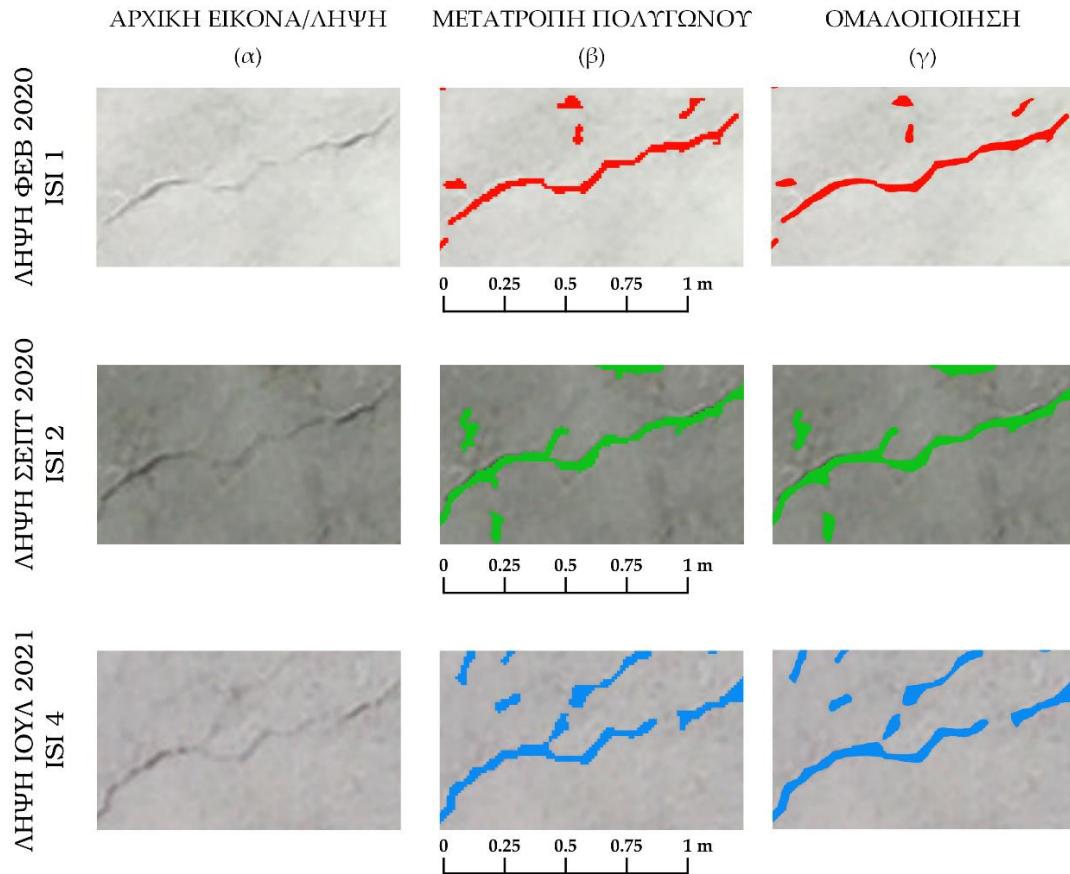
Εικόνα 51 - Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη και (β) εντοπισμένες ρωγμές με χρώμα



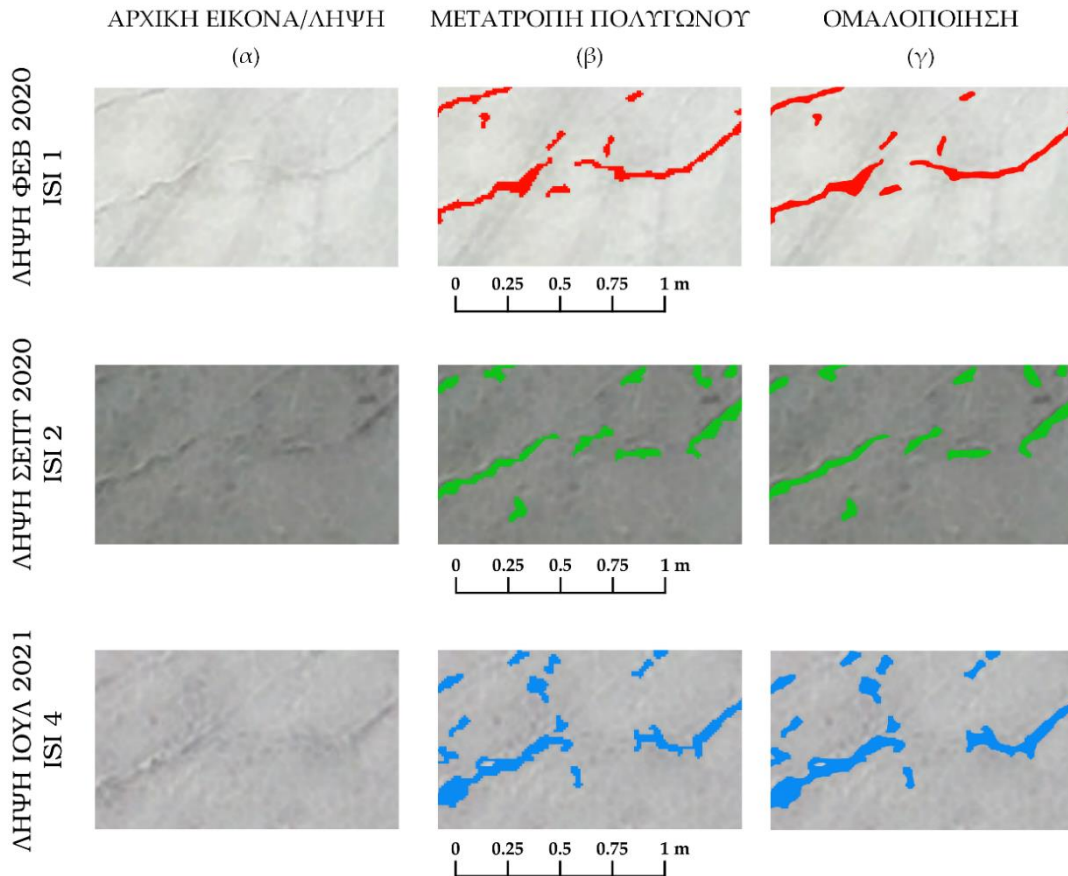
Εικόνα 52 - Οπτικοποίηση εντοπισμένων ρωγμών (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη και (β) εντοπισμένες ρωγμές με χρώμα

## 5.9 Μετατροπή Ψηφιδωτών Δεδομένων σε Διανυσματικά ως Πολύγωνα

Με τα αποτελέσματα πλέον διαθέσιμα, μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση τους αφού μετατραπούν πρώτα σε διανυσματικά δεδομένα δηλαδή σε μορφή πολυγώνων. Η διαδικασία είναι απλή στο QGIS και όπως παρατηρείται παρακάτω (Εικόνες 53 και 54) φαίνονται με τα ίδια χρώματα οπτικοποίησης τα διανυσματικά αρχεία έτσι όπως μετατράπηκαν σε πολύγωνα και στη συνέχεια μέσω αλγορίθμου ομαλοποιήθηκαν. Στην ενδιάμεση στήλη είναι εμφανής η οδοντωτή οριοθέτηση των πολυγώνων όπως ακριβώς δηλαδή είναι τα τετραγωνικά όρια των εικονοστοιχείων.



Εικόνα 53 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής εικόνας σε πολύγωνα (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή εικόνας σε πολύγωνο και (γ) ομαλοποίηση ορίων πολυγώνου

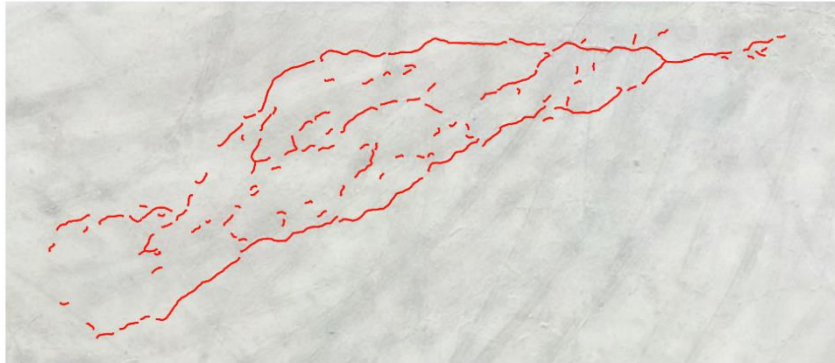


Εικόνα 54 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής εικόνας σε πολύγωνα (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή εικόνας σε πολύγωνα και (γ) ομαλοποίηση ορίων πολύγωνου

## 5.10 Μετατροπή μέσω Σκελετοποίησης και Ομαλοποίησης των Πολυγώνων σε Γραμμές

Αμέσως επόμενο βήμα είναι η μετατροπή των πολύγωνων σε γραμμικά στοιχεία και εκ νέου ομαλοποίηση τους. Στη διαδικασία αυτή αξιοποιείται ο αλγόριθμος σκελετοποίησης, με τα αποτελέσματά του να φαίνονται στη συνέχεια, εκ των οποίων η Εικόνα 55 δείχνει συνολικά τα αποτελέσματα για τις ρωγμές που έχουν ανιχνευτεί ενώ οι Εικόνες 56 και 57 εστιάζουν σε παραδείγματα όπου πρακτικά απαντάται το γιατί η εν λόγω μετατροπή είναι πολύ σημαντική για την αποτύπωση των ρωγμών. Σε τμήματα της εικόνας λόγω της εγγύτητας θορύβου και ρωγμής, η εφαρμογή των μορφολογικών πράξεων έχει επιφέρει μια συνένωση εικονοστοιχείων και άρα το πεπλατυσμένο σχήμα των εντοπισμένων ρωγμών γραμμικού τύπου έχει μετατραπεί σε ένα ακανόνιστο πολύγωνα αποδίδοντας έτσι πως είτε υπάρχει πράγματι μεγάλο άνοιγμα/πλάτος στο τμήμα αυτό, είτε στην επικρατέστερη περίπτωση έχει εντοπιστεί κάτι λανθασμένα. Σε μια τέτοια

περίπτωση η μετατροπή σε γραμμές επιλύει την οπτική ανάγνωση, προσδίδοντας ένα διαφορετικό και πολύ πιο απλοϊκό οπτικά σχήμα που τείνει στην αρχική νοητή γραμμή.



Οπτικοποίηση  
ρωγμών γραμμικά  
ISI 1

Αποτελέσμα  
σκελετοποίησης

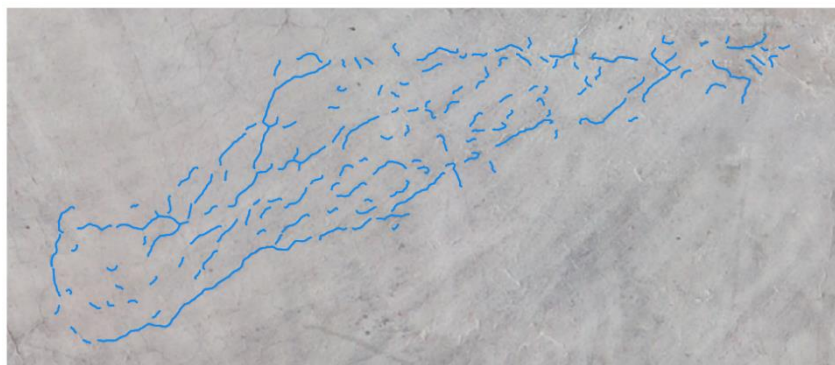
0 1 2 m



Οπτικοποίηση  
ρωγμών γραμμικά  
ISI 2

Αποτελέσμα  
σκελετοποίησης

0 1 2 m

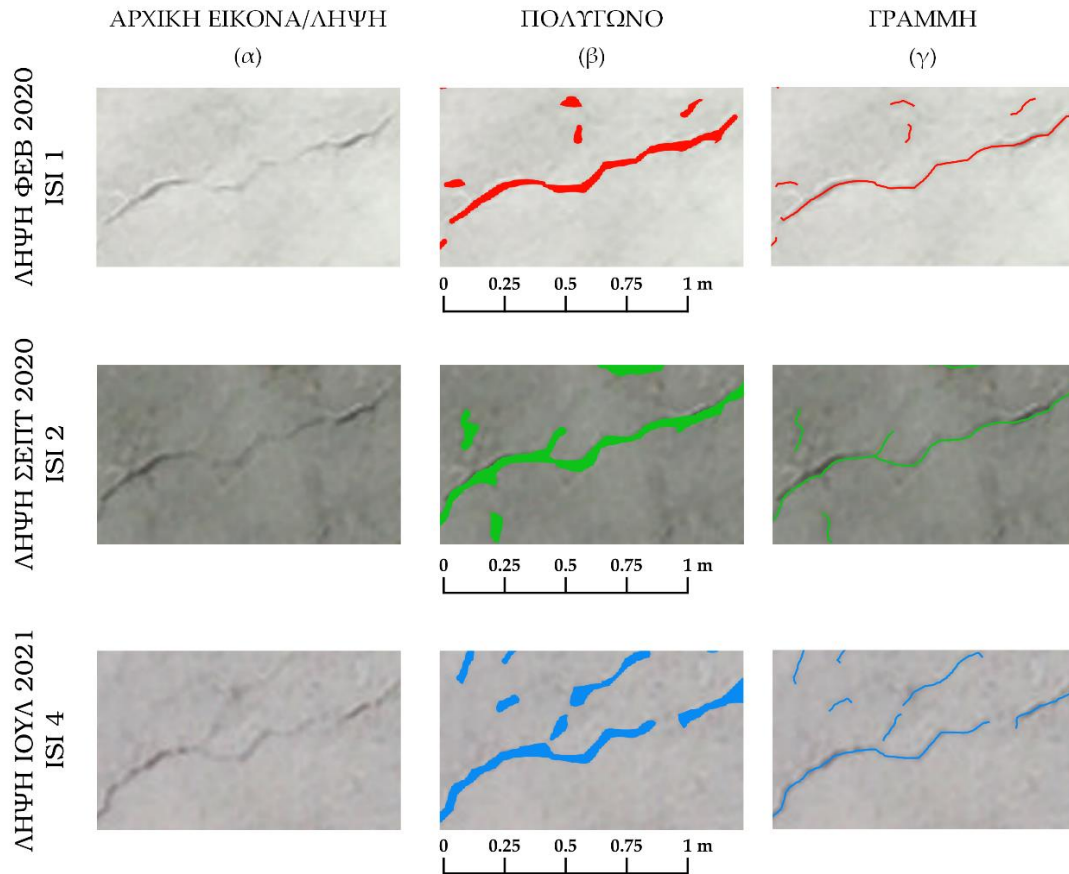


Οπτικοποίηση  
ρωγμών γραμμικά  
ISI 4

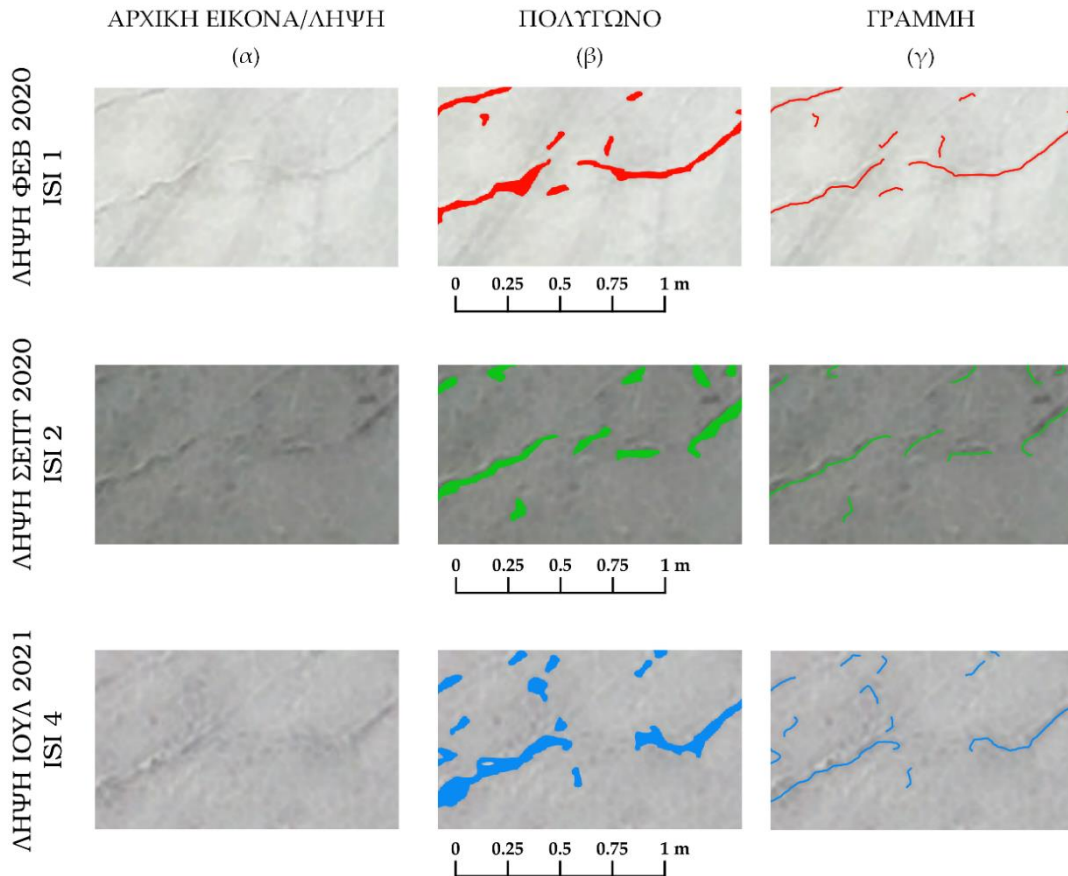
Αποτελέσμα  
σκελετοποίησης

0 1 2 m

Εικόνα 55 – Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολύγωνων σε γραμμές



Εικόνα 56 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολύγωνων σε γραμμές (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή πολυγώνου σε γραμμή και (γ) ομαλοποίηση γραμμών

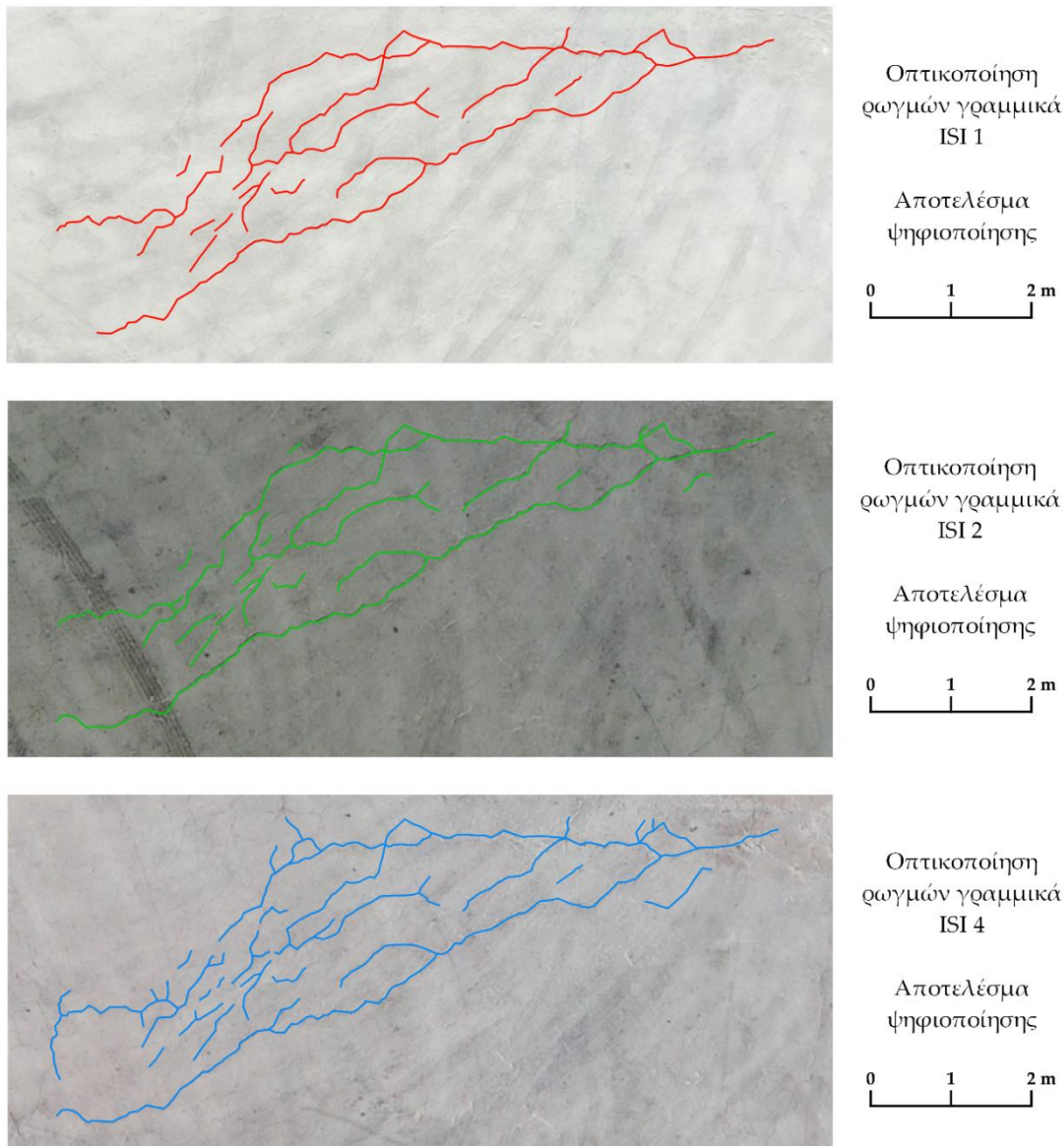


Εικόνα 57 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μετατροπής πολυγώνων σε γραμμές (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) μετατροπή πολυγώνου σε γραμμή και (γ) ομαλοποίηση γραμμών

### 5.11 Διαδικασία Παρουσίασης, Οπτικοποίησης, Επικύρωσης Αποτελεσμάτων και Εξαγωγής Στατιστικών Στοιχείων

Τελευταίο βήμα στη μεθοδολογία είναι η παρουσίαση, οπτικοποίηση και επικύρωση των τελικών αποτελεσμάτων ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η διαδικασία εντοπισμού των ρωγμών παρέχει την αξιοπιστία που απαιτείται. Προκειμένου να διαπιστωθεί αυτό πρέπει να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των ρωγμών που έχουν ψηφιοποιηθεί κατά το Βήμα 4 και των ρωγμών όπως προέκυψαν μετά και τη μορφολογική επεξεργασία στο Βήμα 8 από το μοντέλο δηλαδή της μεθοδολογίας. Στην Εικόνα 58 φαίνονται για την επιλεγμένη ζώνη οι ρωγμές όπως έχουν προκύψει από την ενδεδειγμένη οπτική επισκόπηση και την επιτόπια παρατήρηση.





Εικόνα 58 - Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ψηφιοποίησης ρωγμών

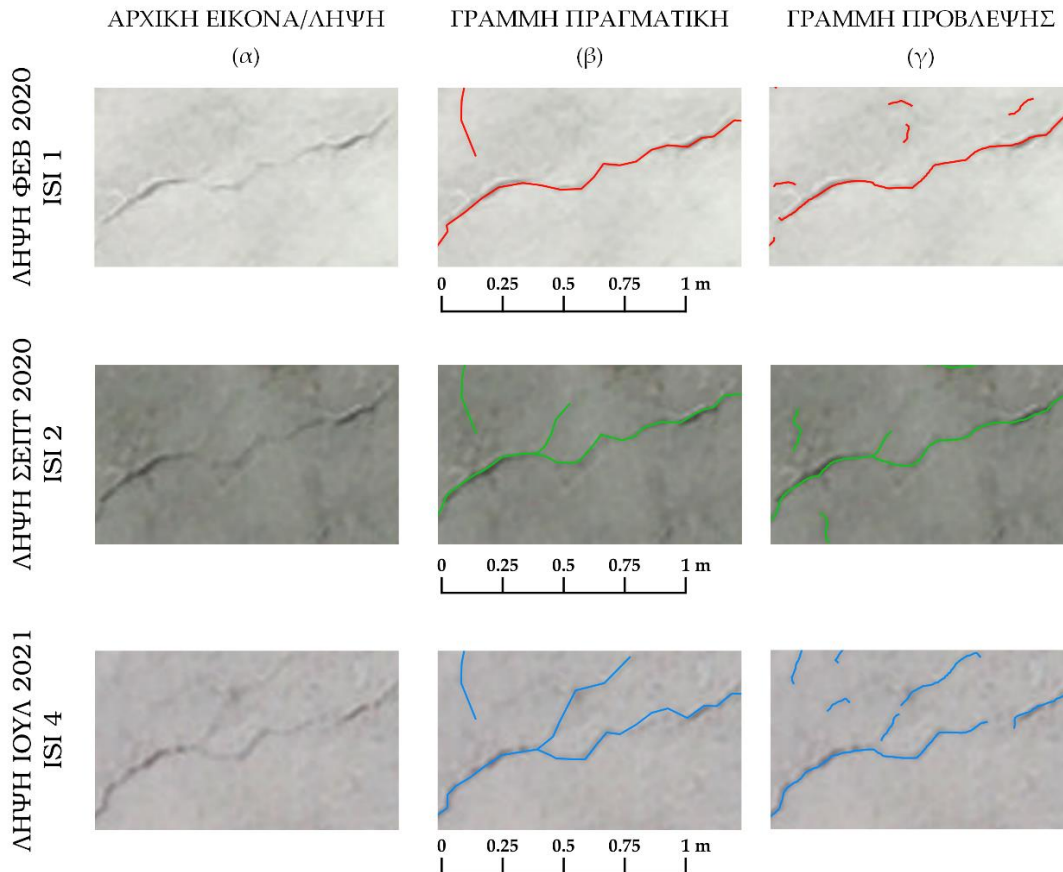
Στις Εικόνες 59 και 60 παρατηρούνται σε παράλληλη οπτικοποίηση τα αποτελέσματα για καθένα από τα δύο επιλεγμένα παραδείγματα όσον αφορά την πραγματικότητα (γραμμή πραγματική) και τη μεθοδολογία (γραμμή πρόβλεψης). Αυτό που παρατηρείται είναι:

- Στο παράδειγμα 1:
  - Στην ISI 1: τα αποτελέσματα προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη ψηφιοποιημένη ρωγμή ειδικά στην κατά μήκος της διαγωνίου ρωγμή με πλάτος περί τα 28mm. Αυτό συμβαίνει καθώς το μέγεθος της ρωγμής το επιτρέπει και είναι αρκετά εμφανής στην αρχική εικόνα/λήψη και τα εικονοστοιχεία διαφοροποιούνται σε τόνους από το υπόλοιπο τμήμα. Στην περίπτωση των

υπόλοιπων ρωγμών δεν υπάρχει ακριβής ανίχνευση καθώς πρόκειται για ρωγμές με πλάτος περί τα 15mm. Το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας σ' αυτή την περίπτωση κάτω από το όριο των 20mm δεν προσεγγίζει πιστά την πραγματικότητα καθώς οι ρωγμές δεν είναι εμφανείς και στην αρχική εικόνα ενώ για τη γραμμή πρόβλεψης υπάρχει προσθήκη 3 μικρών τμημάτων της τάξεως των 10-15cm μήκους που ανιχνεύονται λόγω της διαφοροποίησης των τόνων των εικονοστοιχείων με τα γειτονικά, χωρίς ωστόσο αυτό να δείχνει πως πρόκειται πράγματι για ρωγμές.

- Στην ISI 2: και εδώ η κατά μήκος της διαγωνίου ρωγμή έχει ανιχνευτεί με την απόλυτη ακρίβεια ενώ έχει εντοπιστεί τμήμα της κάθετης ρωγμής στην άνω αριστερή γωνία. Έχει εντοπιστεί επίσης τμήμα της ρωγμής που προκύπτει ως νέα εμφάνιση ρωγμής συγκριτικά με την ISI 1 λόγω των τόνων των εικονοστοιχείων στον κεντρικό τομέα της εικόνας. Η ίδια ρωγμή μετέπειτα στο πέρασμα του χρόνου φαίνεται πως αποδίδει ρωγμή μεγαλύτερου μήκους όπως εμφανίζεται στην ISI 4, συνεπώς το μοντέλο εντοπίζει και τη διάδοση ρωγμών (crack propagation).

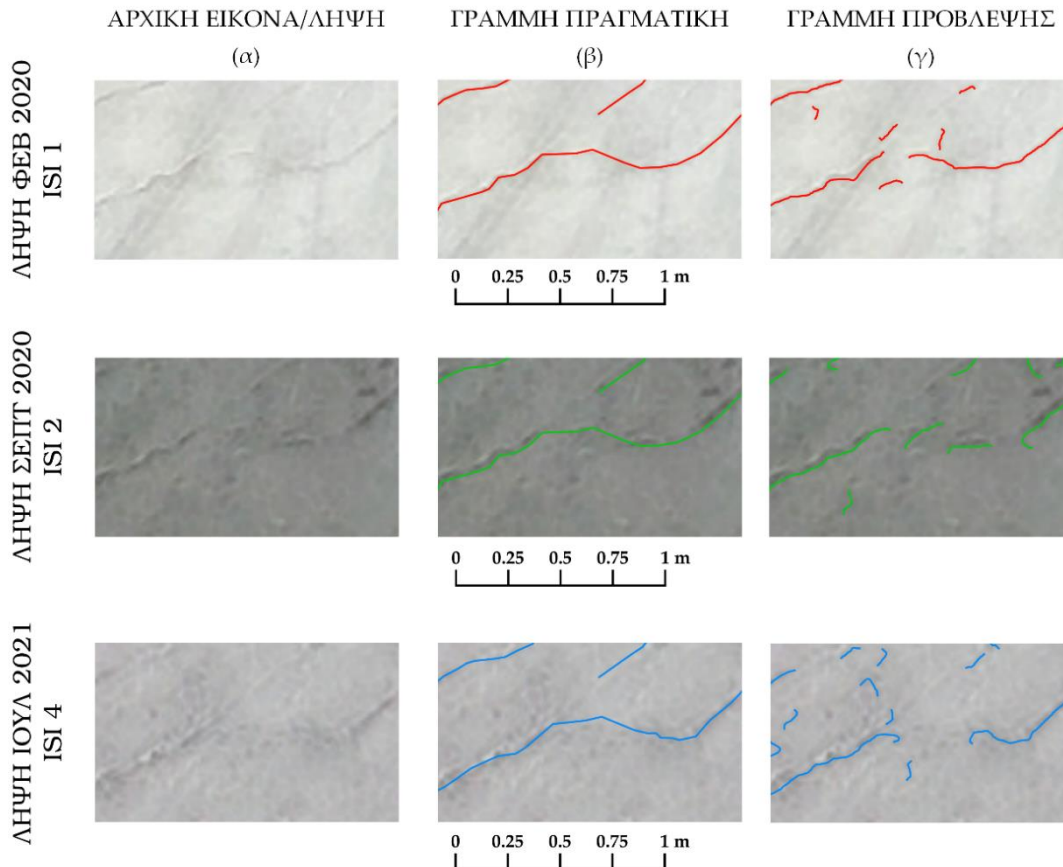
- Στην ISI 4: και σ' αυτή την περίπτωση η κύρια ρωγμή στη διαγώνιο εντοπίζεται με μεγάλη ακρίβεια ωστόσο σε ένα σημείο παρατηρείται μια ασυνέχεια (10cm) που οφείλεται στους χρωματικούς τόνους και δεν είναι εφικτό να καλυφθεί ούτε με τις μορφολογικές πράξεις διαστολής/ συστολής. Εντοπίζεται και το τμήμα της ρωγμής που επεκτείνεται βορειότερα συγκριτικά με την ISI 2, δηλαδή από το κέντρο του τμήματος προς την επάνω δεξιά γωνία, βέβαια με ορισμένες ασυνέχειες (4-5cm). Ίσως με την εφαρμογή περισσότερων των 2 επαναλήψεων στους μορφολογικούς τελεστές να ήταν εφικτή η πλήρωση αυτού του «σπασίματος των γραμμών», ωστόσο αυτό θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί τοπικά μόνο στο σημείο αυτό και όχι σε άλλα τμήματα της εικόνας που εξετάζεται. Έχουν εντοπιστεί επίσης ένα τμήμα της κάθετης ρωγμής στο ξεκίνημα της επάνω αριστερά αλλά και δύο εσφαλμένα τμήματα λόγω των τιμών των εικονοστοιχείων.



Εικόνα 59 – Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανίχνευσης ρωγμών μεθοδολογίας και καταγεγραμμένων ρωγμών (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) πραγματικές ρωγμές και (γ) ρωγμές εντοπισμένες από μεθοδολογία

- Στο παράδειγμα 2:
  - Στην ISI 1: τα αποτελέσματα ανίχνευσης στο συγκεκριμένο τμήμα είναι ικανοποιητικά αφού προσεγγίζουν με πιστότητα την πραγματική ρωγμή με κατεύθυνση από κάτω αριστερά προς τα επάνω δεξιά. Με λίγη παρατήρηση στην αρχική εικόνα/λήψη διαπιστώνεται πως η ασυνέχεια στη γραμμή από το μοντέλο οφείλεται σε τιμές των εικονοστοιχείων αφού παρόλο που υπάρχει ρωγμή, δεν έχει αποτυπωθεί με πιο σκουρόχρωμους τόνους και επικρατεί μια διακοπή του γραμμικού στοιχείου. Στα υπόλοιπα τμήματα ρωγμών αυτό στην επάνω αριστερή γωνία έχει προσδιοριστεί στον απόλυτο βαθμό ενώ και ένα ακόμη περί τα 10cm από τα συνολικά 25cm της εμφανούς ρωγμής καλύπτεται στο μεσαίο τμήμα. Και εδώ έχουν εντοπιστεί 4 στοιχεία λόγω των τιμών των εικονοστοιχείων που δεν αντιστοιχούν σε πραγματική ρωγμή με το μέσο μήκος τους να είναι περίπου 11cm.

- Στην ISI 2: η κεντρική ρωγμή όπως και στην ISI 1 εντοπίζεται μεν, σε μικρότερο βαθμό ωστόσο, καθώς η εικόνα ειδικά στο τμήμα κατά μήκος της ρωγμής παρουσιάζει ασυνέχειες με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει ανάγνωση ότι πρόκειται για μια ενιαία ρωγμή και όχι για 3 αποσπασματικές. Τα τμήματα όμως που παρουσιάζονται ενιαία με έντονους τόνους έχουν προσδιοριστεί ακριβέστατα όπως επίσης το ίδιο συμβαίνει στα δύο τμήματα των δυο άλλων πραγματικών ρωγμών. Μικροχαρακτηριστικά που έχουν κατηγοριοποιηθεί ως γραμμές ρωγμών οφείλονται σε θόρυβο και η ερμηνεία του είναι η ίδια με όσα αναφέρθηκαν στην περίπτωση της ISI 2 στο παράδειγμα 1, περί υγρών ή οποιουδήποτε άλλου υλικού θα μπορούσε να απεικονίζεται με σχεδόν μαύρο ή μαύρο χρώμα.
- Στην ISI 4: το αποτέλεσμα εδώ είναι και πάλι καλά προσεγγίσιμο με την έννοια πως από την αρχική εικόνα δεν υπάρχει πάλι ενιαίο μοτίβο χαρακτηρισμού της κεντρικής ρωγμής και γι' αυτό και στην τελική οπτικοποίηση διαπιστώνεται μια ασυνέχεια περί τα 33cm. Για τις δύο άλλες ρωγμές εντοπίζονται μονάχα τμήματά τους. Και εδώ δεδομένων των συνθηκών που επικρατούν στην αρχική εικόνα ο εντοπισμός είναι σε μεγάλο βαθμό επιτυχημένος αφού η εικόνα στα σημεία αυτά δεν είναι ευανάγνωστη και έχει αρκετές δυσκολίες το ανθρώπινο μάτι στην αναγνώριση.

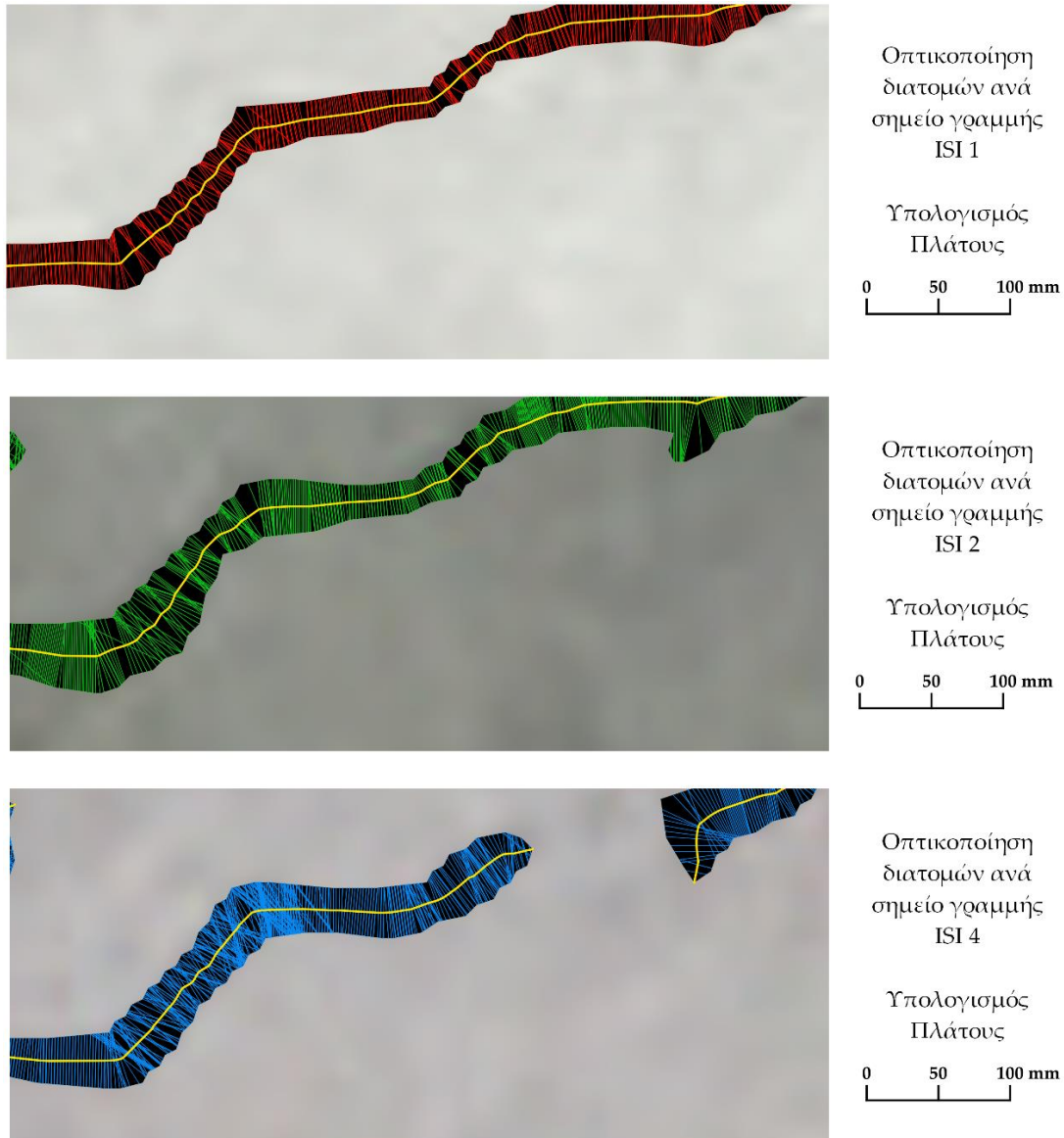


Εικόνα 60 - Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ανίχνευσης ρωγμών μεθοδολογίας και καταγεγραμμένων ρωγμών (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψης, (β) πραγματικές ρωγμές και (γ) ρωγμές εντοπισμένες από μεθοδολογία

Για να υπάρξει μια καλύτερη αποτίμηση της μεθοδολογίας κρίνεται σκόπιμο να υπάρξουν κάποιες μετρήσεις σχετικά με τα βασικά μεγέθη των ρωγμών, δηλαδή το μήκος και το πλάτος. Σχετικά με τον υπολογισμό του μήκους προκύπτει σχεδόν αυτοματοποιημένα από το QGIS για τα γραμμικά στοιχεία (πραγματικές γραμμές και γραμμές του μοντέλου ανίχνευσης) ενώ τα αποτελέσματα αθροίζονται ώστε να αποδοθεί ένας συνολικός αριθμός μήκους για ολόκληρη τη ζώνη μελέτης, όπως φαίνεται στα στοιχεία που ακολουθούν (Πίνακας 6). Σημαντική παρατήρηση είναι πως το συνολικό μήκος που αναφέρεται στη μεθοδολογία βασίζεται αποκλειστικά στην πρόσθεση των επιμέρους μηκών των ρωγμών που έχουν εντοπιστεί και ταξινομηθεί ορθώς.

Για την εύρεση του πλάτους χρησιμοποιείται μια απλή τεχνική με την χρήση τμημάτων διατομών επάνω στη γραμμή από την σκελετοποίηση ενώ τα όρια των γραμμών διατομών καθορίζονται από την περίμετρο του πολυγώνου όπως μετατράπηκε από τη δυαδική εικόνα στο Βήμα 8. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 6) ενώ η διαδικασία

υπολογισμού του πλάτους οπτικοποιημένη για ένα απομονωμένο τμήμα ρωγμής φαίνεται στην Εικόνα 61.



Εικόνα 61 - Παράδειγμα διαδικασίας υπολογισμού πλάτους ρωγμών

Στην Εικόνα 61 είναι εμφανής με κίτρινο χρώμα η γραμμή σκελετοποίησης δηλαδή η γραμμή που αποτυπώνει την εντοπισμένη ρωγμή στο κέντρο του πολυγώνου που την ορίζει και με μαύρο χρώμα οριοθετείται το πολύγωνο ύστερα από τη μετατροπή από εικόνα και την εξομάλυνση του. Με τα χρώματα που οπτικοποιούνται σε όλες τις προηγούμενες εικόνες οι ρωγμές για κάθε εικόνα/λήψη οπτικοποιούνται και εδώ οι διατομές υπολογισμού του πλάτους. Οι γραμμές έχουν προσανατολισμό κάθετο στη γραμμή σκελετοποίησης και ορίζονται σε κάθε σημείο της γραμμής.

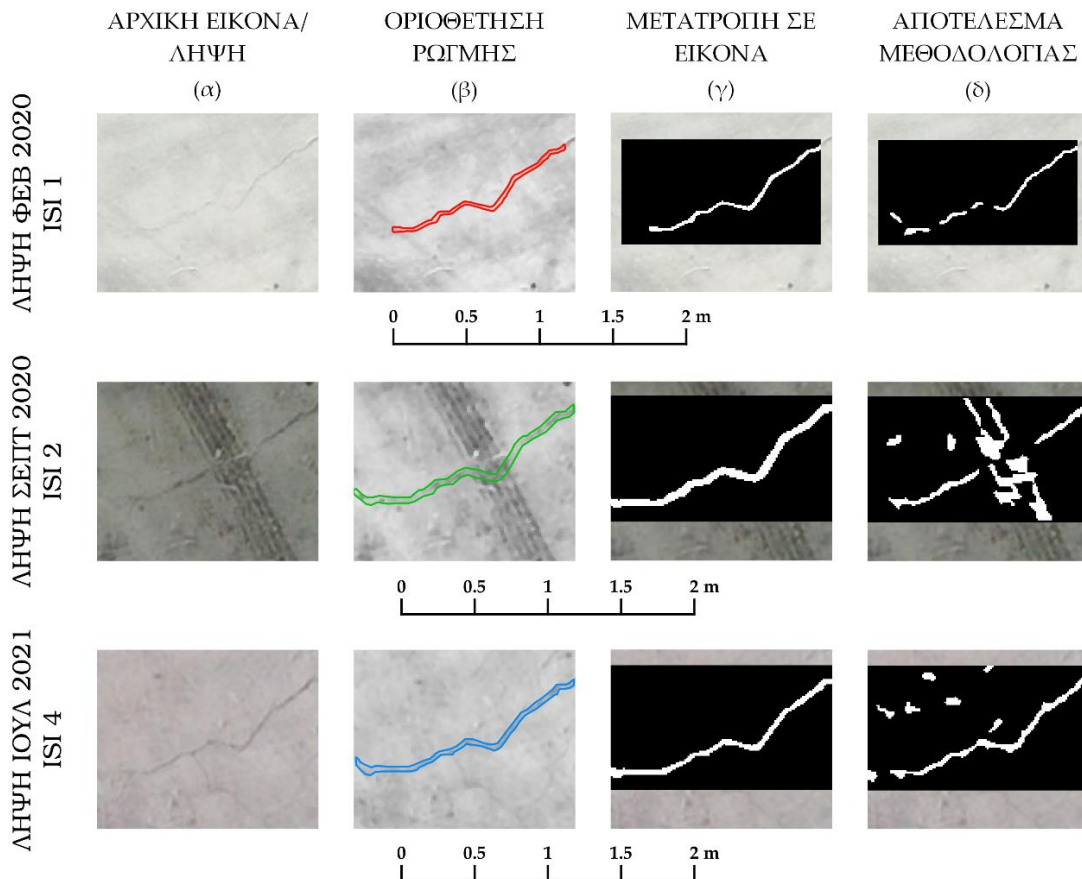
Πίνακας 6 – Πίνακας εξαγωγής υπολογισμών μήκους και πλάτους

Τύπος Ρωγμής	Εικόνα/ Λήψη	Μήκος	Στατιστικά Πλάτους			
		Σύνολο (m)	Ελάχιστο (mm)	Μέσο (mm)	Μέγιστο (mm)	Συγκέντρωση Τιμών (mm)
Ρωγμές Ψηφιοποίησης	ISI 1	34.19	8.3	24	39	≈20
	ISI 2	36.26	10	27	42	≈20
	ISI 4	41.89	10.5	31	49	≈20
Ρωγμές Σκελετοποίησης	ISI 1	23.65	14.4	28.5	82	23.8
	ISI 2	23.15	13.8	37.5	96	33.6
	ISI 4	27.88	15.2	36.5	89	32.3

Παρατηρείται στον Πίνακα Πίνακας 6 πως υπάρχει μια απόκλιση στα υπολογισμένα μεγέθη και αυτό οφείλεται στο ότι πολλές ρωγμές δεν είναι εμφανείς στις αρχικές εικόνες αφού δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση στις τιμές των εικονοστοιχείων μεταξύ των γειτονιών ώστε να μπορούν να εντοπιστούν ήδη από το βήμα της κατωφλίωσης. Η πλειονότητα των ρωγμών εντός της ζώνης που μελετάται είναι στην πραγματικότητα σε πλάτος 15 έως 35mm με ένα μεγάλο ποσοστό να συγκεντρώνεται περί τα 20mm και πάνω, με τα νούμερα των ρωγμών που ανιχνεύονται μέσω της μεθοδολογίας να είναι ικανοποιητικά καθώς η μέση απόκλιση των μετρούμενων τιμών ελάχιστης και μέσης τιμής κυμαίνεται από 4.8mm έως 6.8mm. Η μέγιστη τιμή δεν είναι απολύτως αξιόπιστη για τη σύγκριση καθώς μετά τις μορφολογικές πράξεις σε ορισμένα σημεία έχουν δημιουργηθεί κάποια αντικείμενα στις εικόνες που παρομοιάζονται με ελλείψεις και συνενώνονται με τα γραμμικά στοιχεία των ρωγμών. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο παρουσιάζεται και η τιμή γύρω από την οποία υπάρχει μεγάλο δείγμα ρωγμών.

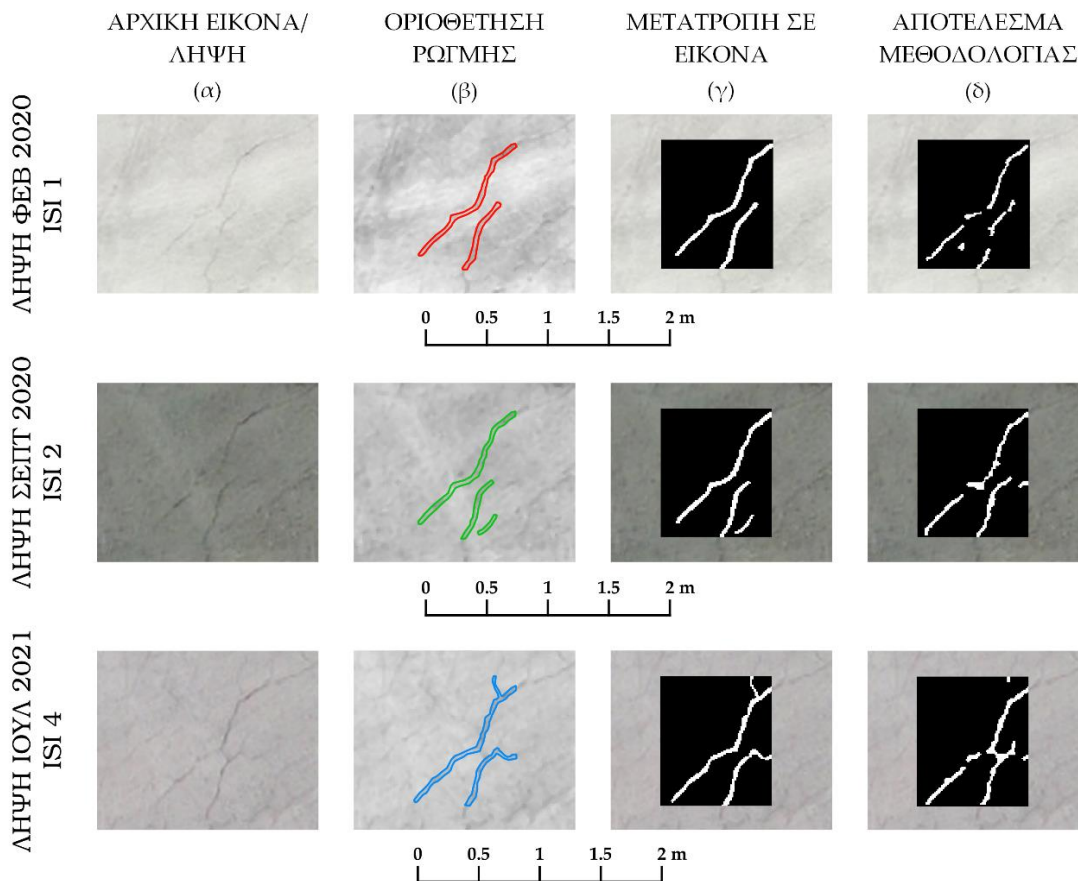
Σχετικά με το μήκος, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στις μετρήσεις που οφείλεται άμεσα στην ερμηνεία του πλάτους και συνάμα των τιμών των εικονοστοιχείων. Δηλαδή μπορεί πράγματι η μεθοδολογία να είναι ικανή να εντοπίσει ορισμένες ρωγμές με πλάτος περί τα 15mm που δεν αντανακλούν φως κατά τη στιγμή της λήψης όμως αυτό δεν σημαίνει πως κάθε μια τέτοια ρωγμή συμπεριφέρεται με το ίδιο τρόπο. Πολύ σημαντική παρατήρηση σ' αυτό είναι και πάλι η έννοια της γειτονιάς των εικονοστοιχείων και της εξομάλυνσης των τιμών με τη χρήση φίλτρων. Επιπλέον, η έντονη αύξηση του μήκους που παρατηρείται μεταξύ ISI 2 και ISI 4 (σε πραγματικά μεγέθη 5.6m ενώ στη μεθοδολογία 4.7m), δηλαδή σε διάστημα 10 μηνών, οφείλεται σε διάδοση υπαρχόντων ρωγμών μεγαλύτερου πλάτους αλλά και σε γένεση νέων που διακρίνονται ελάχιστα με γυμνό μάτι και για να καταγραφούν είναι σχεδόν βέβαιο ότι η επιτόπια οπτική επιθεώρηση είναι ένα βήμα που πρέπει να προηγηθεί ώστε να υπάρχει πλήρης χαρτογράφηση του χώρου μελέτης με παρατηρήσεις που θα βοηθήσουν στην ερμηνεία μετέπειτα.

Σχετικά με την επικύρωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με δύο επιλεγμένα τμήματα όπου οι ρωγμές είναι μεγαλύτερες των 20mm σε πλάτος και πλήρως ευδιάκριτες. Η διαδικασία με οπτικοποίηση της ψηφιοποίησης των ορίων της κάθε ρωγμής, της μετατροπής του επιλεγμένου τμήματος σε εικόνα όπως επίσης και το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας για το τμήμα αυτό συμπεριλαμβάνονται για κάθε παράδειγμα στις Εικόνες 62 και 63.



Εικόνα 62 – Διαδικασία επικύρωσης αποτελεσμάτων (παράδειγμα 1) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) ψηφιοποίηση ορίων ρωγμών, (γ) μετατροπή ορίων σε εικόνα και (δ) αποτέλεσμα μεθοδολογίας





Εικόνα 63 - Διαδικασία επικύρωσης αποτελεσμάτων (παράδειγμα 2) (α) αρχική εικόνα/λήψη, (β) ψηφιοποίηση ορίων ρωγμών, (γ) μετατροπή ορίων σε εικόνα και (δ) αποτέλεσμα μεθοδολογίας

Από τις εικόνες είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις μεταξύ πραγματικότητας και μοντέλου. Αναλυτικότερα ισχύει ότι, δεδομένου ότι η κλάση 0 είναι αυτή στην οποία ταξινομούνται οι περιοχές μη-ρωγμών και η κλάση 1 εκείνη με τις ρωγμές, γίνεται ο διαχωρισμός στις 4 κατηγορίες:

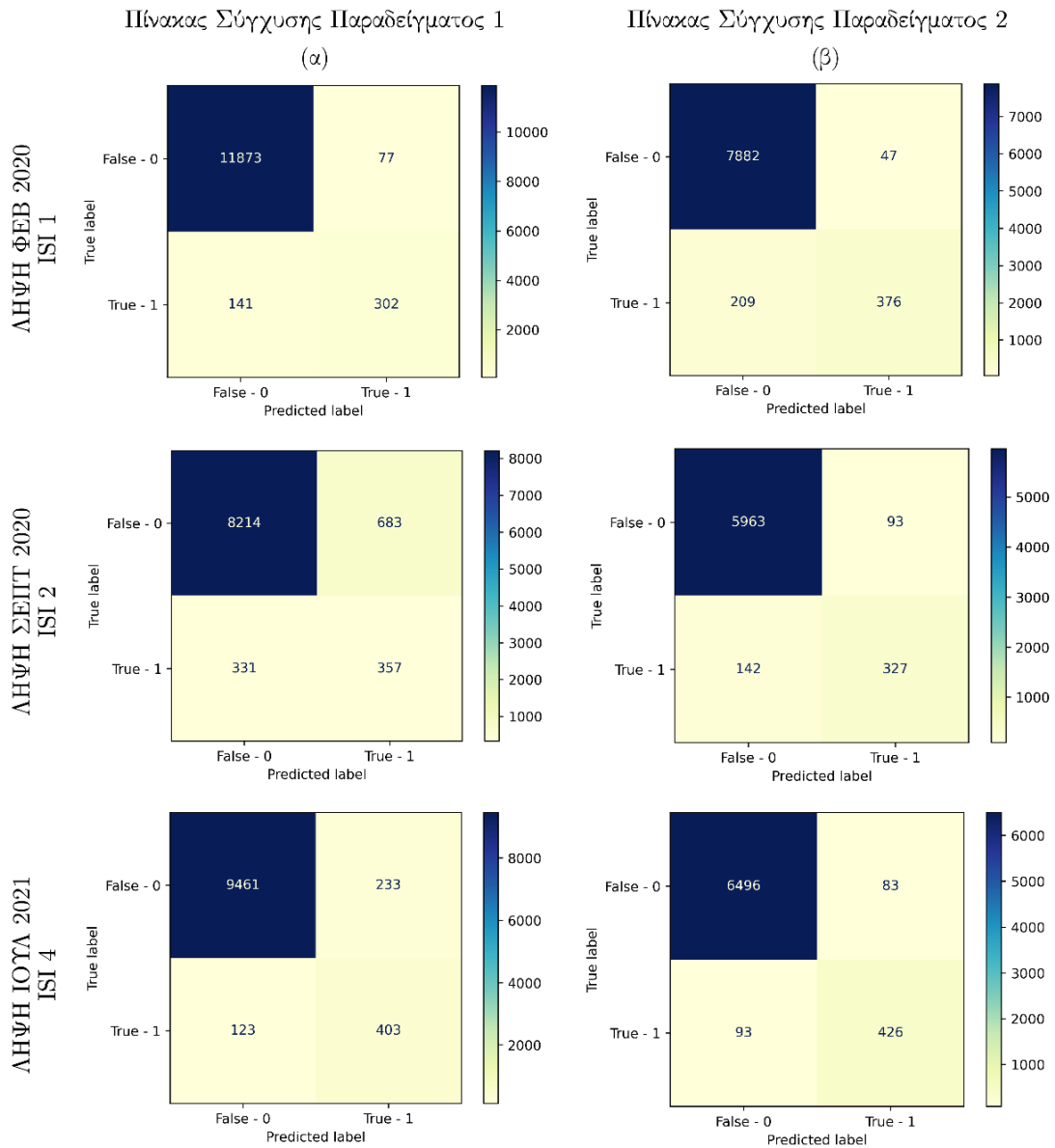
- Αληθώς Θετικά (True Positive - TP): αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου το μοντέλο προβλέπει σωστά ένα εικονοστοιχείο ως ζώνη ρωγμής (κλάση 1), όταν πρόκειται πράγματι για ζώνη ρωγμής (κλάση 1). Δηλαδή τα λευκά εικονοστοιχεία απεικονίζονται ως λευκά.
- Αληθώς Αρνητικά (True Negative - TN): αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το μοντέλο προβλέπει σωστά ένα εικονοστοιχείο ως μη ρηγματωμένη ζώνη (κλάση 0), όταν πρόκειται πράγματι για μη ρηγματωμένη ζώνη (κλάση 0). Δηλαδή τα μαύρα εικονοστοιχεία απεικονίζονται ως μαύρα

- Ψευδώς Θετικά (False Positive - FP): αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το μοντέλο προβλέπει εσφαλμένα ένα εικονοστοιχείο ως ζώνη ρωγμών (κλάση 1), ενώ στην πραγματικότητα είναι μη ρηγματωμένη ζώνη (κλάση 0). Δηλαδή τα λευκά εικονοστοιχεία απεικονίζονται ως μαύρα.
- Ψευδώς Αρνητικά (False Negative - FN): αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το μοντέλο προβλέπει εσφαλμένα ένα εικονοστοιχείο ως μη ρηγματωμένη ζώνη (κλάση 0), ενώ στην πραγματικότητα είναι ζώνη ρωγμών (κλάση 1). Δηλαδή τα μαύρα εικονοστοιχεία απεικονίζονται ως λευκά.

Στην Εικόνα 64 που ακολουθεί, φαίνονται οι πίνακες σύγχυσης για κάθε παράδειγμα και για κάθε εικόνα/λήψη από τα παραπάνω (Εικόνες 62 και 63). Οι πίνακες παρουσιάζουν την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων έτσι όπως αναγνωρίστηκαν και καταμετρήθηκαν μέσω της Python. Δηλαδή σύμφωνα με την scikit-learn τα κελιά του 2x2 πίνακα είναι:

- Το επάνω αριστερά κελί αντιπροσωπεύει τα Αληθώς Αρνητικά - TN
- Το επάνω δεξιά κελί αντιπροσωπεύει τα Ψευδώς Θετικά - FP
- Το κάτω αριστερά κελί αντιπροσωπεύει τα Ψευδώς Αρνητικά - FN
- Το κάτω δεξιά κελί αντιπροσωπεύει τα Αληθώς Θετικά - TP

Με τα παραπάνω στοιχεία, δεδομένα, είναι εύκολο να υπολογιστούν διάφορες μετρικές απόδοσης (performance metrics), οι οποίες παρέχουν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την απόδοση και την ακρίβεια του μοντέλου στην ταξινόμηση μεταξύ των δύο κλάσεων. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω στους Πίνακες 7 και 8.



Εικόνα 64 – Πίνακες σύγκρισης (α) παραδείγματος 1 και (β) παραδείγματος 2

Πίνακας 7 – Πίνακας αποτελεσμάτων μετρικών μεθοδολογίας

Παράδειγμα	Εικόνα/Λήψη	Sensitivity (Recall κλάση 1)	Specificity (Precision κλάση 0)	Precision (Precision κλάση 1)	Negative Predictive Value (Recall κλάση 0)	Accuracy
1	ISI 1	79.68 %	98.83 %	68.17 %	99.36 %	<b>98.24 %</b>
	ISI 2	34.33 %	96.13 %	51.89 %	92.32 %	<b>89.42 %</b>
	ISI 4	63.36 %	98.72 %	76.62 %	97.6 %	<b>96.52 %</b>

2	ISI 1	88.89 %	97.42 %	64.27 %	99.41 %	<b>96.99 %</b>
	ISI 2	77.86 %	97.67 %	69.72 %	98.46 %	<b>96.4 %</b>
	ISI 4	83.69 %	98.59 %	82.08 %	98.74 %	<b>97.52 %</b>
Συνολικά (Μ.Ο.)		<b>71.3 %</b>	<b>97.89 %</b>	<b>68.79 %</b>	<b>97.65 %</b>	<b>95.85 %</b>
Συνολικά (Μ.Ο.) χωρίς παράδειγμα 1 ISI 2		<b>77.47 %</b>	<b>98.19 %</b>	<b>71.61 %</b>	<b>98.53 %</b>	<b>96.92 %</b>

Πίνακας 8 – Πίνακας αποτελεσμάτων *f-score* μεθοδολογίας

Παράδειγμα	Εικόνα/ Λήψη	F1-Score Περιοχή μη-ρωγμών (κλάση 0)	F1-Score Cracks Περιοχή ρωγμών (κλάση 1)	F1- score Avg	Error Rate
1	ISI 1	99.09 %	73.48 %	<b>86.3 %</b>	1.76 %
	ISI 2	94.19 %	41.32 %	<b>67.8 %</b>	10.6 %
	ISI 4	98.15 %	69.36 %	<b>83.8 %</b>	3.48 %
2	ISI 1	98.4 %	74.6 %	<b>86.5 %</b>	3.01 %
	ISI 2	98.07 %	73.57 %	<b>85.8 %</b>	3.6 %
	ISI 4	98.66 %	82.88 %	<b>90.8 %</b>	2.48 %
Συνολικά (Μ.Ο.)		<b>97.76%</b>	<b>69.20%</b>	<b>83.48%</b>	<b>4.15%</b>
Συνολικά (Μ.Ο.) χωρίς παράδειγμα 1 ISI 2		<b>98.36%</b>	<b>73.85%</b>	<b>86.10%</b>	<b>3.08%</b>

Με βάση τις παρεχόμενες μετρήσεις, για την απόδοση της μεθοδολογίας και άρα την επιτυχία ανίχνευσης ρωγμών – ταξινόμησης των δυαδικών κλάσεων ισχύει:

- Η μέση ευαισθησία (Sensitivity), ίση με 71,3% υποδηλώνει ότι το μοντέλο εντόπισε με επιτυχία το 71,3% των πραγματικών ζωνών ρωγμών και άρα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης για την καταγραφή μεγαλύτερου ποσοστού. Ένα υψηλότερο ποσοστό ευαισθησίας υποδηλώνει μεγαλύτερη ικανότητα ορθής σύλληψης θετικών περιπτώσεων, κάτι που είναι επιθυμητό όταν πρόκειται για μοντέλα εντοπισμού και ταξινόμησης. Για να ανέβει το ποσοστό το μοντέλο πρέπει να προσαρμοστεί ώστε να μειωθεί ο αριθμός των ψευδώς αρνητικών, με στόχο δηλαδή την αύξηση των αληθώς θετικών μεταξύ των πραγματικών αληθών περιπτώσεων.
- Η μέση εξειδίκευση (Specificity), ίση με 97,89% υποδηλώνει ότι το μοντέλο παρέχει πολύ υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό ζωνών χωρίς ρωγμές και άρα έχει καλή απόδοση στην ορθή ταξινόμηση της πλειονότητας των μη ρηγματωμένων ζωνών. Το υψηλό αυτό ποσοστό υποδηλώνει μια χαμηλή τιμή ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων (μη ρηγματωμένες ζώνες που κατατάσσονται εσφαλμένα ως ρηγματωμένες ζώνες), ενώ αξίζει να σημειωθεί πως μια υψηλή

τιμή εξειδίκευσης μπορεί κάποιες φορές να επιφέρει μια πολύ χαμηλότερη τιμή ευαισθησίας. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται παρά μόνο στην περίπτωση του παραδείγματος 1 στην ISI 2 με τιμή ευαισθησίας πολύ χαμηλή, με το σχολιασμό όμως για αυτή την περίπτωση να γίνεται μετά την αναφορά και των υπόλοιπων μετρικών.

- Η μέση ακρίβεια (Precision), ίση με 68.79% υποδηλώνει ότι από το σύνολο των περιπτώσεων που το μοντέλο προέβλεψε ως ζώνες ρωγμών, περίπου το 68,79% αυτών είναι πράγματι αληθώς θετικές. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα του 30% ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων, όπου το μοντέλο αναγνωρίζει λανθασμένα τμήματα μη ρηγματωμένων ζωνών ως ζώνες ρωγμών. Για τη βελτίωση του αποτελέσματος, το μοντέλο θα πρέπει να στοχεύει στη μείωση του αριθμού των ψευδώς θετικών περιπτώσεων, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό των αληθώς θετικών.
- Η μέση αρνητική προγνωστική τιμή (Negative Predictive Value), ίση με 97.65% υποδηλώνει πως η πιθανότητα μια περίπτωση να είναι πραγματικά αρνητική (μη ρηγματωμένη ζώνη) μεταξύ των περιπτώσεων που προβλέπονται ως αρνητικές, είναι πολύ υψηλή. Αντιθέτως εάν το νούμερο αυτό ήταν μικρότερο θα υποδήλωνε και ένα υψηλότερο ποσοστό ψευδώς αρνητικών αποτελεσμάτων, όπου το μοντέλο δηλαδή αναγνωρίζει εσφαλμένα τις ζώνες ρωγμών ως μη ρηγματωμένες ζώνες.
- Η μέση ακρίβεια (Accuracy), ίση με 95.85% υποδηλώνει ότι το μοντέλο ταξινομεί σωστά την πλειονότητα των περιπτώσεων. Δηλαδή αντιπροσωπεύει το ποσοστό των περιπτώσεων που έχουν προβλεφθεί σωστά, τόσο ως ζώνες ρωγμών (κλάση 1) όσο και ως ζώνες χωρίς ρωγμές (κλάση 0), επί του συνόλου των περιπτώσεων και συνεπώς τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σύμφωνα με την πραγματικότητα για ένα σημαντικό τμήμα του συνόλου δεδομένων.

Ωστόσο, η ακρίβεια (accuracy) από μόνη της μπορεί να μην παρέχει μια πλήρη εικόνα της απόδοσης του μοντέλου, ιδίως όταν πρόκειται για ανισόρροπα σύνολα δεδομένων. Δηλαδή σε πολλά σενάρια ο αριθμός των περιπτώσεων σε διαφορετικές κλάσεις είναι άνισος. Για παράδειγμα, στην ανίχνευση ρωγμών, ο αριθμός των μη ρηγματωμένων ζωνών μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τις ζώνες ρωγμών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ακρίβεια μπορεί να είναι παραπλανητική, επειδή το μοντέλο μπορεί να επιτύχει υψηλή ακρίβεια προβλέποντας απλώς την πλειοψηφούσα κλάση τις περισσότερες φορές.

Με τον υπολογισμό πρόσθετων μετρικών όπως είναι το F1-score παρέχεται μια πιο

ολοκληρωμένη κατανόηση της απόδοσης του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί για την ανίχνευση ρωγμών. Συγκεκριμένα, το F1-score λαμβάνει υπόψη τόσο την ακρίβεια (precision) όσο και την ανάκληση (recall), παρέχοντας μια ισορροπημένη και ολιστική αξιολόγηση της ταξινόμησης των εικονοστοιχείων στις δύο κλάσεις. Αυτή η ολιστική αξιολόγηση βοηθά στον εντοπισμό των δυνατών και αδύναμων σημείων του μοντέλου, επιτρέποντας στοχευμένες βελτιώσεις σε βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθείται. Αναλυτικότερα η επεξήγηση των αποτελεσμάτων για το F1-score:

- Η μέση τιμή F1-score για την κλάση 0 (περιοχές μη-ρωγμών) ίση με 97.76% υποδηλώνει πάρα πολύ υψηλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και ανάκλησης για τις ζώνες χωρίς ρωγμές. Δηλαδή το μοντέλο φαίνεται πως αποδίδει πολύ καλά στην προσπάθεια εντοπισμού μη ρηγματωδών ζωνών (κλάση 0) και στη διάκριση μεταξύ των κλάσεων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το F1-score για την κλάση 0 πρέπει να ερμηνεύεται σε συνδυασμό με το F1-score για την κλάση 1.
- Η μέση τιμή F1-score για την κλάση 1 (περιοχές ρωγμών) ίση με 69.20% υποδηλώνει μέτρια ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και ανάκλησης για τις ζώνες των ρωγμών. Το χαμηλότερο F1-score για την κλάση 1 υποδηλώνει ότι το μοντέλο μπορεί να έχει κάποια δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό των ζωνών με ρωγμές και μπορεί να χάνει ένα μέρος των πραγματικών ζωνών ρωγμών. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε κακής ποιότητας αρχικά δεδομένα, σε σφάλματα ανάγνωσης και εγγραφής, σε σφάλματα κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας κ.λπ. που γενικώς αντικατοπτρίζουν της προκλήσεις μιας τέτοιας έρευνας. Φαίνεται εκ πρώτης όψεως πως μπορούν να υπάρξουν κάποια περιθώρια βελτίωσης για την αύξηση των αληθώς θετικών και την παράλληλη μείωση των ψευδώς θετικών και αρνητικών ώστε το αποτέλεσμα του δείκτη να ξεφύγει από τη ζώνη του 68%-72% που κυμαίνονται και τα ποσοστά ακρίβειας και ανάκλησης για την κλάση 1.
- Η μέση τιμή F1-score avg της συνολικής ταξινόμησης, ίση με 83.48% συνδυάζοντας τις βαθμολογίες F1 τόσο της κατηγορίας 0 (ζώνες χωρίς ρωγμές) όσο και της κατηγορίας 1 (ζώνες με ρωγμές), υποδηλώνει μια συνολική αρκετά καλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και ανάκλησης και για τις δύο κλάσεις. Στην ολιστική αυτή αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου επομένως διαφαίνεται η επίτευξη μιας πράγματι καλής συμπεριφοράς αναγνώρισης των εξεταζόμενων στοιχείων στο περιβάλλον της δυαδικής ταξινόμησης.

- Η μέση τιμή του Ποσοστού σφάλματος (Error rate), ίση με 4.15% υποδηλώνει πως κατά μέσο όρο, το μοντέλο ταξινομεί εσφαλμένα περίπου το 4,15% των περιπτώσεων στο σύνολο δεδομένων. Όπως γίνεται αντιληπτό ένα χαμηλό ποσοστό σφάλματος είναι πάντοτε επιθυμητό καθώς αντικατοπτρίζει ένα υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας στις προβλέψεις του μοντέλου που εκ των πραγμάτων έχει επιβεβαιωθεί και από τους παραπάνω υπολογισμούς μετρικών.

Γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων αφορά στα εξής:

- Βάσει του πρώτου παραδείγματος επιβεβαιώνεται πως τη μεγαλύτερη συνέπεια στην ανίχνευση ρωγμών έχει η ISI 1, η οποία έχει ληφθεί από χαμηλότερο ύψος πτήσης και ο τελικός Ορθοφωτοχάρτης έχει αποδοθεί με μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου και άρα και η οπτικοποίηση των ρωγμών γίνεται με παραπάνω εικονοστοιχεία (χαρακτηριστικό και το Σχήμα 40).
- Βάσει του πρώτου παραδείγματος, που έχει επιλεγεί σκόπιμα κιάλας η συγκεκριμένη περιοχή, φαίνεται από την ISI 2 πως το μοντέλο είναι επιρρεπές στη λανθασμένη ανίχνευση όταν στο σκυρόδεμα επικρατεί έντονος θόρυβος, είτε αυτό στην προκειμένη έγκειται σε αποτυπώματα ελαστικών από βαρέα οχήματα, είτε σε λάδια κ.λπ. υγρά που δεν αντανακλούν και άρα επιστρέφουν μια τιμή σε πολύ σκουρόχρωμους τόνους, είτε για διάφορους άλλους παράγοντες που μπορούν να φαίνονται με σκουρόχρωμους τόνους, να μην αποδίδονται σε ρωγμές και άρα να επηρεάζουν ήδη από το βήμα της κατάταξης με κατωφλίωση την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας αφού θα διακινδυνεύουν μέχρι και την τελική εικόνα εξόδου ένα σφάλμα.
- Εάν η ISI 2 στο παράδειγμα 1 δεν συμπεριληφθεί στον τελικό μέσο όρο των μετρικών παρατηρείται μια αύξηση της ακρίβειας (accuracy) της τάξεως του 1.1% και αντίστοιχα μια αύξηση της τάξεως του 4.6% για το F1-score της κλάσης 1 (ρωγμές) και του 2.6% για το συνολικό δείκτη F1-score avg. Σ' αυτή την περίπτωση και το ποσοστό σφάλματος μειώνεται κατά μια μονάδα φτάνοντας στο τελικό 3.08%.
- Βάσει του δεύτερου παραδείγματος όπου επικρατούν σχεδόν ιδανικές συνθήκες σε κάθε εικόνα/λήψη και είναι ευδιάκριτες πλήρως οι ρωγμές οι μετρικές της ακρίβειας (accuracy) αποδίδουν ένα μέσο όρο στο 97% με το μέσο δείκτη F1-score avg να ξεπερνά το 87.5% και σίγουρα υποδηλώνει πως το μοντέλο λειτουργεί ορθά με αρκετά μεγάλη αποτελεσματικότητα συνολικά. Η διαφορά

με το μέσο όρο των 3 αποτελεσμάτων του F1-score avg για το πρώτο παράδειγμα, που είναι στο 79.3% είναι ενδεικτική αυτού που αναφέρθηκε και παραπάνω για την παρουσία θορύβου.

## 5.12 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Σε καθένα από τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν αναφερθεί οι επιμέρους σχολιασμοί των αποτελεσμάτων, όμως στην ενότητα αυτή γίνεται μια τελική καταγραφή σε ενιαίους πίνακες όλων παραμέτρων της μεθοδολογίας όπως επίσης και των μετρικών για την επικύρωση της μεθοδολογίας. Έτσι, γίνεται συγκεντρωτικά (Πίνακας 9) η παράθεση όλων των παραμέτρων της μεθοδολογίας για κάθε υπολογιστικό βήμα που απαιτεί τη χρήση κώδικα της Python.

Μια από τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι στο μέγεθος του παραθύρου για την κατωφλίωση. Η επιλογή του μεγέθους του παραθύρου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών χαρακτηριστικών της εικόνας (φωτισμός, θόρυβος κ.λπ.) αλλά και των επιθυμητών αποτελεσμάτων κατάτμησης. Όταν οι διαστάσεις του εικονοστοιχείου είναι μικρότερες, αυτό υποδηλώνει υψηλότερη χωρική ανάλυση ή ακριβέστερες λεπτομέρειες στην εικόνα κάτι που σίγουρα είναι επιθυμητό από τη στιγμή που το πλαίσιο είναι τοπική εφαρμογή κατωφλίωσης, όμως πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη και η πιο σφαιρική αντίληψη της εικόνας και των τιμών των εικονοστοιχείων είτε αυτές είναι έγχρωμες είτε σε κλίμακα του γκρι. Πρακτικά δηλαδή πάντα να γίνεται πειραματισμός στις τιμές των κατωφλιών καθώς δεν μπορεί να προεξοφλήσει κανένας ερευνητής όση εμπειρία και αν διαθέτει πως η συγκεκριμένη τιμή είναι η βέλτιστη.

Επιπλέον διακρίνονται σε ενιαίο πίνακα (Πίνακας 10) οι μέσοι όροι από τα δύο παραδείγματα για κάθε εικόνα/λήψη ξεχωριστά ως προς την ακρίβεια και τις μετρικές. Επιβεβαιώνεται πως η μεθοδολογία είναι ικανή να εντοπίσει τις ρωγμές άνω των 20mm με πολύ καλή ακρίβεια, χωρίς αυτό να σημαίνει σαφώς πως δεν μπορούν να υπάρξουν τροποποιήσεις σε διάφορα στάδια στη μεθοδολογία υιοθετώντας μια διαφορετική τεχνική σε κάποια από αυτά ή προσθέτοντας/ αφαιρώντας βήματα. Οι τεχνικές όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κομμάτι της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι πολλές, οπότε υπάρχουν και πολλές εναλλακτικές που θα μπορούσαν να συνδυαστούν και να εφαρμοστούν με στόχο να πραγματοποιηθεί και μια συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ τους.



Πίνακας 9 – Πίνακας παραμέτρων μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας

Εικόνα/ Λήψη	Ύψος πτώσης (m)	Διαστάσεις περιοχής μελέτης (σε Pixel)	Εφαρμογή Διάμεσου φίλτρου	Κατωφλίωση				Κατώφλι Εμβαδού Περιοχής	Μορφολογική Επεξεργασία			
				Local Threshold		Local Otsu			Διαστολή (Dilation)		Συστολή (Erosion)	
				Παράθυρο	Offset	Γραμμές	Στήλες	Παράθυρο	Επανάληψη	Παράθυρο	Επανάληψη	Παράθυρο
ISI 1	48	865x377	3x3	19	3	7	10	15	3	2	3	2
ISI 2	55.7	760x331	3x3	23	3	5	10	25	3	2	3	2
ISI 4	56.1	789x345	3x3	27	3	5	10	28	3	2	2	2

Πίνακας 10 - Πίνακας επικύρωσης αποτελεσμάτων μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας

Εικόνα/ Λήψη	Sensitivity (Recall κλάση 1)	Specificity (Precision κλάση 0)	Precision (Precision κλάση 1)	Negative Predictive Value (Recall κλάση 0)	Accuracy	F1-Score Περιοχή μη-ρωγμών (κλάση 0)	F1-Score Περιοχή ρωγμών (κλάση 1)	F1-score Avg	Error Rate
ISI 1	84.29 %	98.12 %	66.22 %	99.38 %	<b>97.62 %</b>	98.75 %	74.04 %	<b>86.39 %</b>	2.38 %
ISI 2	56.09 %	96.9 %	60.81 %	95.39 %	<b>92.91 %</b>	96.13 %	57.44 %	<b>76.78 %</b>	7.09 %
ISI 4	73.53 %	98.65 %	79.35 %	98.17 %	<b>97.02 %</b>	98.41 %	76.12 %	<b>87.26 %</b>	2.98 %



# 6

## Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Οι λιμένες είναι πολυσύχναστοι κόμβοι που χρησιμεύουν ως ζωτικές πύλες για την ανταλλαγή αγαθών και εμπορευμάτων, με την ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία τους να επιζητείται έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι οι αλυσίδες εφοδιασμού παραμένουν αδιάλειπτες και οι οικονομίες ευημερούν. Η ορθή διαχείριση των υφιστάμενων λιμένων κρίνεται απαραίτητη λόγω της ανάγκης για αύξηση της παραγωγικότητας των λιμένων και μεγιστοποίησης της χρήσης τους, της σπανιότητας των οικονομικών πόρων για επενδύσεις νέων κατασκευών στον κλάδο αλλά και λόγω της ανάγκης για αποτελεσματική συντήρηση των λιμενικών υποδομών.

Η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η γήρανση, η ιδιαιτερότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τα φυσικά φαινόμενα και η κλιματική αλλαγή που έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της κατάστασης των λιμενικών υποδομών επιβάλλουν την ανάπτυξη πρακτικών παρακολούθησης της δομικής τους υγείας με αξιοποίηση σύγχρονων μέσων όπως συστήματα υπολογιστών, μη επανδρωμένα αεροσκάφη και προηγμένους αισθητήρες. Η υιοθέτηση τους επιτρέπει τον εντοπισμό φθορών στην ανωδομή λιμένων, αφού προηγηθεί η διαδικασία απόκτησης των δεδομένων μέσω πτήσης, επάνω από τις πλάκες σκυροδέματος, από ένα πλήρως εξοπλισμένο με τα κατάλληλα μέσα UAV ώστε να καταγράψει εικόνες ή βίντεο πολύ υψηλής ανάλυσης της επιφάνειας. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια μπορούν να επεξεργαστούν και να αναλυθούν σε τέτοιο βαθμό από τις τεχνικές της ανάλυσης εικόνας, ώστε να ανιχνευτούν ρωγμές.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε πως η ανάλυση εικόνας είναι μια διαδικασία, όπου τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί ραγδαία και αποτελεί μια ώριμη και δυναμική επιστήμη, στην οποία συνεχώς προστίθενται εξελιγμένες τεχνικές, και κατά συνέπεια μπορεί να ανταποκριθεί στο πλαίσιο της παρακολούθησης των υποδομών συμβαδίζοντας και με τη ραγδαία αύξηση της χρήσης των UAV σε πολλαπλές εφαρμογές. Μέχρι στιγμής το μεγαλύτερο ποσοστό ερευνών ανάλυσης εικόνας για την ανίχνευση αφορά σε γέφυρες, ένα μικρότερο ποσοστό καλύπτει τις κτηριακές εγκαταστάσεις ενώ ελάχιστες είναι ακόμα οι αναφορές σχετικά με αεροδρόμια και σιδηροδρομικές γραμμές και σήραγγες. Διαφαίνεται ότι η ανίχνευση ρωγμών σε λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα δεν έχει ακόμα διερευνηθεί.

Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι κατά τη διαδικασία ανάλυσης της εικόνας δεν αξιοποιείται η γεωχωρική πληροφορία που εμπεριέχεται στις εικόνες συλλογής με UAV. Χωρίς γεωχωρικά δεδομένα οι σημερινές προκλήσεις σε εφαρμογές μεγάλων δεδομένων (big data) δεν μπορούν να επιλυθούν δεδομένου πως η γεωχωρική πληροφορία διαδραματίζει κομβικό ρόλο στην απόκτηση των δεδομένων, τη μοντελοποίηση τους, την οπτικοποίηση και την ανάλυση τους. Στις περισσότερες έρευνες αν και ένα UAV έχει τη δυνατότητα να την καταγράψει ώστε να αξιοποιηθεί η έννοια της θεσιθεσίας και κατ' επέκταση της γεωαναφοράς, αυτό δεν συμβαίνει, καθώς οι ερευνητές συνήθως αρκούνται απλά σε ένα αυθαίρετο και εντελώς τοπικό σύστημα αναφοράς (XYZ) ορισμένο ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας τους. Ιδιαίτερα για τις γέφυρες στην περίπτωση κυρίως των φθωρών σε βάθρα θεωρείται δεδομένο το που γίνεται η πτήση του UAV και άρα είναι πολύ συγκεκριμένη η περιοχή που θα καταγράψει κατά τις λήψεις του. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει και στην περίπτωση των λιμένων όπου η έκταση καταγραφής μπορεί να είναι πολλαπλάσια συγκριτικά με αυτή των γεφυρών και επειδή το ιδιαίτερο στοιχείο είναι πως μελετάται μια εικόνα κάτοψης, η χρήση γεωχωρικής πληροφορίας είναι σημαντική και αναπόσπαστη. Η συνεισφορά επομένως της έρευνας της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας ανάλυσης εικόνας για ανίχνευση ρωγμών σε πλάκες σκυροδέματος λιμένων με παράλληλη αξιοποίηση της διαθέσιμης γεωχωρικής πληροφορίας στις εικόνες που συλλέγονται από UAV.

Σχετικά με το πρακτικό σκέλος της έρευνας ορισμένα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι σε πρώτη φάση η παρατήρηση της μη αξιοποίησης των πολυάριθμων εργαλείων των GIS που προσφέρουν πληθώρα δυνατοτήτων ανάλυσης, επεξεργασίας, οπτικοποίησης κ.λπ. και έχουν ένα επιπλέον σημαντικό υπολογιστικό χαρακτηριστικό, το ότι μπορούν να αξιοποιήσουν στο έπακρο τις δυνατότητες της γλώσσας προγραμματισμού Python. Η δυναμική τους αυτή τουλάχιστον για τη μελέτη ανίχνευσης ρωγμών στα λιμάνια τα καθιστά ιδανικά εργαλεία στα χέρια των ερευνητών καθώς όχι μόνο

διαχειρίζονται σε πραγματικό χρόνο πληθώρα γεωχωρικών δεδομένων, αλλά και αναγνωρίζουν ή και μετατρέπουν αρχεία από ψηφιδωτή μορφή (εικόνες) σε διανυσματική (σημεία, γραμμές, πολύγωνα) παρέχοντας ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία.

Επιπροσθέτως, τόσο οι τεχνικές ανάλυσης εικόνας όσο και οι υλοποιήσεις τους μέσα από μια βιβλιοθήκη της Python μπορεί να διαφέρουν στα αποτελέσματα που εξάγουν όπως ενδεικτικά παρατηρήθηκε στις τεχνικές κατωφλίωσης για την κατάτμηση της εικόνας. Σε δεύτερη φάση αυτό που παρατηρείται είναι πως από τη στιγμή που πραγματοποιούνται συνεχείς δοκιμές με τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε κάθε μεθοδολογία μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, η όλη διαδικασία του μοντέλου ανίχνευσης θεωρείται ημιαυτόματη (semi-automatic). Οι επάλληλες αυτές προσεγγίσεις μπορεί να έχουν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις υπολογιστικό κόστος μεγάλου βαθμού που τελικώς να μην το επιτρέπει το πλαίσιο της έρευνας και η διαδικασία να είναι υπερβολικά χρονοβόρα.

Κάτι εξίσου αλληλένδετο με την παραπάνω θεώρηση περί δοκιμών στις τιμές, είναι η διατήρηση σφαλμάτων. Σφάλματα μπορεί να υπάρξουν σε κάθε βήμα από τη στιγμή του προγραμματισμού της πτήσης (ή και στον ίδιο τον εξοπλισμό) και την επιτόπια αυτοψία/επιθεώρηση έως την πραγματοποίηση της μεθόδου της φωτογραμμετρίας και σε κάθε βήμα της ανάλυσης εικόνας κατ' επέκταση. Σταδιακά τα σφάλματα μπορεί να διατηρηθούν στα ίδια επίπεδα ή να μεγαλώσουν και ακριβώς γι' αυτό το λόγο στο τέλος κάθε τέτοια έρευνας που ασχολείται με δυαδική ταξινόμηση πραγματοποιείται μια ανάλυση επικύρωσης των αποτελεσμάτων για να αποδοθεί ένα ποσοστό ακρίβειας. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται αρκετές μετρικές αποδεικνύοντας πως το μοντέλο ανίχνευσης λειτουργεί αποτελεσματικά προβλέποντας με όσο το δυνατό πιο βέλτιστο τρόπο τις ορθές κατηγορίες/κλάσεις των εικονοστοιχείων. Στην παρούσα διπλωματική εξάλλου σκοπός δεν είναι η βελτίωση κάποιας υφιστάμενης μεθοδολογίας ή δημιουργία ενός νέου αλγορίθμου από μηδενική βάση, αλλά η χρήση κάποιων βημάτων με τεχνικές ανάλυσης εικόνας που θα μπορούσαν εκτός από τον εντοπισμό των ρωγμών να διατηρούν τη γεωχωρική πληροφορία.

Επιπρόσθετα, παρόλο που οι 4 εικόνες/λήψεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική έχουν χρονικό διάστημα καταγραφής 1.5 χρόνου, δηλαδή από το Φεβρουάριο του 2020 έως και τον Ιούλιο του 2021, θα μπορούσαν να μην παρουσιάζουν μεταβολές ως προς την εξέλιξη των ρωγμών. Ωστόσο, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας υπέδειξε διάδοση των εντοπισμένων ρωγμών μεταξύ των μετρήσεων. Κατά συνέπεια, δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης της εξέλιξης των ρωγμών και της σύνδεσης του φαινομένου αυτού με πιθανές αιτίες που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Τέλος, αν και

παράμετροι όπως το ύψος πτήσης, η χωρική ανάλυση, ο φωτισμός και η παρουσία θορύβου δυσχεραίνουν το έργο εντοπισμού, τελικά η μεθοδολογία κρίνεται επιτυχής και ρωγμές από 20mm και πάνω είναι εφικτό να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια.

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα πρωταρχικό στάδιο στην ανίχνευση ρωγμών σε λιμενικές υποδομές, και σίγουρα τα περιθώρια εξέτασης παραπάνω παραγόντων είναι σημαντικό να διερευνηθούν. Ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα αφορούν στην εφαρμογή της μεθοδολογίας ταυτόχρονα σε όλες τις πλάκες της ανωδομής για το τμήμα της ακτοπλοΐας. Σ' αυτή την περίπτωση θα πρέπει να διερευνηθεί η κατάλληλη τεχνική με την οποία θα ήταν εφικτό να αναγνωριστεί και να μην ληφθούν υπόψη ως ρωγμές οι αρμοί μεταξύ των πλακών σκυροδέματος (γραμμικά στοιχεία).

Στο ίδιο μοτίβο θα μπορούσαν να εξεταστούν και εναλλακτικές της μεθοδολογίας προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα ανίχνευσης άλλων τύπων φθορών π.χ. αποκόλληση σκυροδέματος κ.λπ. Επιπλέον, μια πρόσθετη πληροφορία που θα μπορούσε να διερευνηθεί είναι και το βάθος της ρωγμής (crack depth) μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Τέλος κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί λεπτομερώς η παράμετρος του ύψους πτήσης του UAV φυσικά όσο αυτό είναι επιτρεπτό δεδομένου της συνεχούς παρουσίας πλοίων και των παρακείμενων κτιριακών εγκαταστάσεων στο λιμένα.

## 7

## Βιβλιογραφία

- Agdas, D., Rice, J. A., Martinez, J. R., & Lasa, I. R. (2016). Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015049.
- Agisoft LLC. (2020). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6* [Software Documentation].
- Ahmad, I., Moon, I., & Shin, S. J. (2018). Color-to-grayscale algorithms effect on edge detection—A comparative study. 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC),
- Al-amri, S. S., Kalyankar, N., & Khamitkar, S. (2010). Image Segmentation by Using Thershod Techniques” journal of computing. In: ISSN.
- Al-Amri, S. S., & Kalyankar, N. V. (2010). Image segmentation by using threshold techniques. *arXiv preprint arXiv:1005.4020*.
- Al-Ruzouq, R., Dabous, S. A., Junaid, M. T., & Hosny, F. (2023). Nondestructive deformation measurements and crack assessment of concrete structure using close-range photogrammetry. *Results in Engineering*, 18, 101058.
- Alexander, M. G. (2016). *Marine concrete structures : design, durability and performance*. Woodhead Publishing.
- AlHamaydeh, M., & Ghazal Aswad, N. (2022). Structural health monitoring techniques and technologies for large-scale structures: Challenges, limitations, and recommendations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(3), 03122004.
- Alonso, L., Barbarán, J., Chen, J., Díaz, M., Llopis, L., & Rubio, B. (2018). Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey. *Computer Standards & Interfaces*, 56, 83-100.
- Anaconda, I. (2023). *Anaconda Documentation* [Software Documentation]. <https://docs.anaconda.com/free/anacondaorg/user-guide/>
- ASCE. (2021). *American society of civil engineers report card*. <https://infrastructurereportcard.org/>

- Baskar, A., Rajappa, M., Vasudevan, S. K., & Muruges, T. (2023). *Digital Image Processing*. CRC Press.
- Berkeley Seismology Lab. (2010). Extreme Damage That Didn't Have To Be. <https://seismo.berkeley.edu/blog/2010/01/27/extreme-damage-that-didnt-have-to-be.html>
- Bertola, N. J., & Brühwiler, E. (2021). Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-14.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. B. (2013). *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. John Wiley & Sons.
- Boiangiu, C.-A., Olteanu, A., Stefanescu, A., Rosner, D., Tapus, N., & Andreica, M. I. (2011). Local thresholding algorithm based on variable window size statistics. Proceedings of the 18th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)(ISSN: 2066-4451),
- Bovik, A. C. (2009). *The essential guide to image processing*. Academic Press.
- Bray, D. E., & Stanley, R. K. (1996). *Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service*. CRC press.
- Breunig, M., Bradley, P. E., Jahn, M., Kuper, P., Mazroob, N., Rösch, N., Al-Doori, M., Stefanakis, E., & Jadidi, M. (2020). Geospatial data management research: Progress and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 95.
- Cha, K., Kim, S.-W., Kim, J. H., Park, M.-Y., & Kong, J. S. (2015). Development of the deterioration models for the port structures by the multiple regression analysis and markov chain. *Journal of the computational structural engineering institute of Korea*, 28(3), 229-239.
- Champiri, M. D., Mousavizadegan, S. H., & Moodi, F. (2012). A decision support system for diagnosis of distress cause and repair in marine concrete structures. *Computers & Concrete*, 9(2), 99-118.
- Chelioti, K., Tsaimou, C., & Tsoukala, V. (2023). Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Monitoring Advancements for Port Infrastructure Applications. *Special issue for the 2022 (12th) International Conference on Engineering, Project, and Production Management (EPPM2022)*, 13, Article 3.
- Chen, C., Seo, H., Jun, C., & Zhao, Y. (2022). A potential crack region method to detect crack using image processing of multiple thresholding. *Signal, Image and Video Processing*, 16(6), 1673-1681.
- Chen, H.-P. (2018). Structural health monitoring of large civil engineering structures.
- Chen, X., Li, J., Huang, S., Cui, H., Liu, P., & Sun, Q. (2021). An automatic concrete crack-detection method fusing point clouds and images based on improved otsu's algorithm. *Sensors*, 21(5), 1581.
- Cherry, B., & Green, W. (2021). *Corrosion and protection of reinforced concrete*. CRC Press.
- Chiabrande, F., Lingua, A., Maschio, P., & Teppati Losè, L. (2017). The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), TUSCANY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 163-170.



- Chityala, R., & Pudipeddi, S. (2020). *Image processing and acquisition using Python*. CRC Press.
- Cho, H., Yoon, H.-J., & Jung, J.-Y. (2018). Effects of the ground resolution and thresholding on crack width measurements. *Sensors*, 18(8), 2644.
- Church, J. C., Chen, Y., & Rice, S. V. (2008). A spatial median filter for noise removal in digital images. *IEEE SoutheastCon 2008*,
- Collins, F., & Blin, F. (2018). *Ageing of Infrastructure: A Life-Cycle Approach*. CRC Press.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
- Colwell, R. N. (1997). History and place of photographic interpretation. *Manual of photographic interpretation*, 2, 33-58.
- Corrigan, F. (2020). *DJI Mavic 2 Pro And Zoom Review Includes Features, Specs With FAQs*. <https://www.dronezon.com/drone-reviews/dji-mavic-2-pro-zoom-review-of-features-specifications-with-faqs/>
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote Sensing*, 7(10), 13895-13920.
- De Fazio, R., Dinoi, L. M., De Vittorio, M., & Visconti, P. (2021). A sensor-based drone for pollutants detection in eco-friendly cities: hardware design and data analysis application. *Electronics*, 11(1), 52.
- de Langen, P., Turró Calvet, M., Fontanet, M., & Caballé, J. (2018). The infrastructure investment needs and financing challenge of European ports.
- Del Grosso, A. (2001). Monitoring of infrastructures in the marine environment. In *Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering* (pp. 107-117). World Scientific.
- Delatte, N. (2009). *Failure, distress and repair of concrete structures*. Elsevier.
- Dhakal, D., Neupane, K., Thapa, C., & Ramanjaneyulu, G. (2013). Different techniques of structural health monitoring. *Research and Development (IJCSEIERD)*, 3(2), 55-66.
- DJI. (2020). MAVIC 2 Pro / Zoom - User Manual v2.2.
- Dorafshan, S., Maguire, M., & Qi, X. (2016). Automatic surface crack detection in concrete structures using OTSU thresholding and morphological operations.
- Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. (2019). Benchmarking image processing algorithms for unmanned aerial system-assisted crack detection in concrete structures. *Infrastructures*, 4(2), 19.
- Doyle, C., & Betti, R. (2010). Ageing infrastructure: Issues, research, and technology. *Report done for Department of Homeland Security on Ageing Infrastructure Held in Columbia University, United States*.
- Duan, G.-J., & Zhang, P.-F. (2014). Research on application of UAV for maritime supervision. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 4, 322-326.
- Dumka, A., Ashok, A., Verma, P., & Verma, P. (2020). *Advanced digital image processing and its applications in Big Data*. CRC Press.

- Dwarakish, G., & Salim, A. M. (2015). Review on the Role of Ports in the Development of a Nation. *Aquatic Procedia*, 4, 295-301.
- Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry.
- Erickson, B. J., & Kitamura, F. (2021). Magician's corner: 9. Performance metrics for machine learning models. In (Vol. 3, pp. e200126): Radiological Society of North America.
- European Council. (2008). *Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection.*
- Fakhri, M., Dezfoulian, R. S., Golroo, A., & Makkiabadi, B. (2021). Developing an approach for measuring the intensity of cracking based on geospatial analysis using GIS and automated data collection system. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(5), 582-596.
- Farrar, C. R., Sohn, H., Hemez, F. M., Anderson, M. C., Bement, M. T., Cornwell, P. J., Doebling, S. W., Schultze, J., Lieven, N., & Robertson, A. (2003). Damage prognosis: current status and future needs. *Los Alamos National Laboratory, LA*, 176, 177-178.
- Feroz, S., & Abu Dabous, S. (2021). Uav-based remote sensing applications for bridge condition assessment. *Remote Sensing*, 13(9), 1809.
- Ferreira, P. M., Machado, M. A., Carvalho, M. S., & Vidal, C. (2022). Embedded Sensors for Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications Review. *Sensors*, 22(21), 8320.
- Forsyth, D. S., Yolken, H. T., & Matzkanin, G. A. (2006). A brief introduction to nondestructive testing. *AMMTIAC Q*, 1.
- Frangopol, D. M., & Liu, M. (2019). Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost. *Structures and Infrastructure Systems*, 96-108.
- Frangopol, D. M., & Messervey, T. B. (2009). Maintenance principles for civil structures. *Encyclopedia of structural health monitoring.*
- Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2019). Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions. In *Structures and Infrastructure Systems* (pp. 46-65). Routledge.
- Frazier, A. E., & Singh, K. K. (2021). *Fundamentals of Capturing and processing Drone Imagery and data.* CRC Press.
- Friesen, M. R., & McLeod, R. D. (2015). Bluetooth in intelligent transportation systems: a survey. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 13, 143-153.
- Fujita, Y., Mitani, Y., & Hamamoto, Y. (2006). A method for crack detection on a concrete structure. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06),
- Gagliardi, V., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Battagliere, M. L., D'Amato, L., Alani, A. M., & Benedetto, A. (2023). Satellite remote sensing and non-destructive testing methods for transport infrastructure monitoring: advances, challenges and perspectives. *Remote Sensing*, 15(2), 418.
- Gastineau, A., Johnson, T., & Schultz, A. (2009). Bridge Health Monitoring and Inspections Systems-A Survey of Methods. XP055400986, Retrieved from the Internet: URL: [http://conser.vancu.umn.edu/bitstream/handle/11299/150962/Mn\\_DOT2009-29.pdf](http://conser.vancu.umn.edu/bitstream/handle/11299/150962/Mn_DOT2009-29.pdf).

- Gaythwaite, J. W. (2016). Design of marine facilities: engineering for port and harbor structures.
- Gillies, S. (2023). *Rasterio Documentation* [Software Documentation].
- Glisic, B., & Inaudi, D. (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons.
- Glisic, B., Yarnold, M. T., Moon, F. L., & Aktan, A. E. (2014). Advanced visualization and accessibility to heterogeneous monitoring data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(5), 382-398.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
- Goyal, M. (2011). Morphological image processing. *IJCST*, 2(4), 59.
- GRASS Development Team. (2023). *What is GRASS GIS?* <https://grass.osgeo.org/learn/overview/>
- Group, E. D. R. (2016). Failure to act: Closing the infrastructure investment gap for america's economic future.
- Guirado, R., Padró, J.-C., Zoroa, A., Olivert, J., Bukva, A., & Cavestany, P. (2021). Stratotrans: Unmanned aerial system (uas) 4g communication framework applied on the monitoring of road traffic and linear infrastructure. *Drones*, 5(1), 10.
- Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R., & Singari, R. M. (2022). Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 2286-2307.
- Gupta, P., & Dixit, M. (2022). Image-based crack detection approaches: a comprehensive survey. *Multimedia Tools and Applications*, 81(28), 40181-40229.
- Hallermann, N., & Morgenthal, G. (2013). Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures. IABSE Symposium Report,
- Hallermann, N., Morgenthal, G., & Rodehorst, V. (2015). Unmanned aerial systems (uas)–case studies of vision based monitoring of ageing structures. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE),
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. *Sensors*, 23(6), 3293.
- He, J., Li, Y., & Zhang, K. (2012). Research of UAV flight planning parameters.
- Heffron, R. E. (2015). Waterfront facilities inspection and assessment: Waterfront facility inspection committee [Article]. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*(130), 1-392.
- Heo, G., Son, B., Kim, C., Jeon, S., & Jeon, J. (2018). Development of a wireless unified-maintenance system for the structural health monitoring of civil structures. *Sensors*, 18(5), 1485.
- Hübschen, G., Altpeter, I., Tschuncky, R., & Herrmann, H.-G. (2016). *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods*. Woodhead publishing.
- Jahanshahi, M. R., Masri, S. F., Padgett, C. W., & Sukhatme, G. S. (2013). An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception. *Machine vision and applications*, 24, 227-241.

- Jähne, B. (2002). Digital Image Processing 5th revised and extended edition. Berlin: Springer-Verlag, doi, 10, 3-540.
- Jayawickrema, U., Herath, H., Hettiarachchi, N., Sooriyaarachchi, H., & Epaarachchi, J. (2022). Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review. *Measurement*, 111543.
- Jiao, P., Ye, X., Zhang, C., Li, W., & Wang, H. (2023). Vision-based real-time marine and offshore structural health monitoring system using underwater robots. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*.
- Jofré-Briceño, C., Muñoz-La Rivera, F., Atencio, E., & Herrera, R. F. (2021). Implementation of facility management for port infrastructure through the use of UAVS, photogrammetry and BIM. *Sensors*, 21(19), 6686.
- Joint Legislative Committee on Performance Evaluation and Expenditure Review (PEER). (2006). *The Impact of Hurricane Katrina on Mississippi's Commercial Public Ports and Opportunities for Expansion of the Ports* <https://www.peer.ms.gov/Reports/rpt487.pdf>
- Jordan, S., Moore, J., Hovet, S., Box, J., Perry, J., Kirsche, K., Lewis, D., & Tse, Z. T. H. (2018). State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 12(2), 151-164.
- Junyan, L., Yang, L., Fei, W., & Yang, W. (2015). Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials. *Infrared Physics & Technology*, 71, 448-456.
- Kaartinen, E., Dunphy, K., & Sadhu, A. (2022). Lidar-based structural health monitoring: Applications in civil infrastructure systems. *Sensors*, 22(12), 4610.
- Kanan, C., & Cottrell, G. W. (2012). Color-to-grayscale: does the method matter in image recognition? *PloS one*, 7(1), e29740.
- Kim, H., Sim, S.-H., & Cho, S. (2015). Unmanned aerial vehicle (UAV)-powered concrete crack detection based on digital image processing. International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering,
- Kim, J. W., Kim, S. B., Park, J. C., & Nam, J. W. (2015). Development of crack detection system with unmanned aerial vehicles and digital image processing. *Advances in structural engineering and mechanics (ASEM15)*, 33(3), 25-29.
- Kim, S., Cha, K., Kim, J., Park, M., & Kong, J. (2012). Development of condition state model for open type wharf considering deterioration factors. KSCE Conference of Korean Society of Civil Engineers, Gwangju, Korea,
- Kumar, R., & Gardoni, P. (2014). Renewal theory-based life-cycle analysis of deteriorating engineering systems. *Structural Safety*, 50, 94-102.
- Lauritzen, P., Reichard, J., Ahmed, S., & Safa, M. (2019). Review of non-destructive testing methods for physical condition monitoring in the port industry. *Journal of Construction Engineering*, 2(2), 103-111.
- Lesiak, P. (2020). Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles. *Problemy Kolejnictwa*(188), 115-127.
- Li, G., He, S., Ju, Y., & Du, K. (2014). Long-distance precision inspection method for bridge cracks with image processing. *Automation in Construction*, 41, 83-95.

- Lienhart, W. (2013). Challenges in the analysis of inhomogeneous structural monitoring data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3, 247-255.
- Liu, T., Burner, A. W., Jones, T. W., & Barrows, D. A. (2012). Photogrammetric techniques for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 54, 1-58.
- Liu, Y., & Nayak, S. (2012). Structural health monitoring: State of the art and perspectives. *Jom*, 64(7), 789-792.
- Lopes Bento, N., Araújo E Silva Ferraz, G., Alexandre Pena Barata, R., Santos Santana, L., Diennévan Souza Barbosa, B., Conti, L., Becciolini, V., & Rossi, G. (2022). Overlap influence in images obtained by an unmanned aerial vehicle on a digital terrain model of altimetric precision. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 263-276.
- Mahdavi, Y., & Gonzalez, R. C. (1992). *Advances in Image Analysis* (Vol. 75). SPIE Optical Engineering Press.
- Mai, C., Pedersen, S., Hansen, L., Jepsen, K. L., & Yang, Z. (2016). Subsea infrastructure inspection: A review study. 2016 IEEE International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS),
- Mandirolo, M., Casarotti, C., Peloso, S., Lanese, I., Brunesi, E., & Senaldi, I. (2022). Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 72, 102824.
- Mehta, V., & El Zarki, M. (2004). A Bluetooth based sensor network for civil infrastructure health monitoring. *Wireless Networks*, 10, 401-412.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons.
- Mirzaei, Z., & Adey, B. T. (2015). Investigation of the use of three existing methodologies to determine optimal life-cycle activity profiles for bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(11), 1484-1509.
- Mishra, D., & Natalizio, E. (2020). A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements. *Computer Networks*, 182, 107451.
- Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798.
- Morgenthal, G., & Hallermann, N. (2014). Quality assessment of unmanned aerial vehicle (UAV) based visual inspection of structures. *Advances in Structural Engineering*, 17(3), 289-302.
- Motteff, J. D. (2012). Critical infrastructure resilience: the evolution of policy and programs and issues for congress. In: Congressional Research Service Washington, DC.
- Muhendra, R., Rinaldi, A., & Budiman, M. (2017). Development of WiFi mesh infrastructure for Internet of Things applications. *Procedia engineering*, 170, 332-337.
- Munawar, H. S., Hammad, A. W., Haddad, A., Soares, C. A. P., & Waller, S. T. (2021). Image-based crack detection methods: A review. *Infrastructures*, 6(8), 115.
- NumPy Community. (2022). *NumPy User Guide* [Software Documentation].



- Nyssonen, D. (1977). Linewidth measurement with an optical microscope: the effect of operating conditions on the image profile. *Applied Optics*, 16(8), 2223-2230.
- Obi, J. C. (2023). A comparative study of several classification metrics and their performances on data. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 8(1), 308-314.
- OpenCV team. (2022). *OpenCV modules* [Software Documentation]. <https://docs.opencv.org/4.x/>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66.
- Owotogbe, J., Ibiyemi, T., & Adu, B. (2019). A comprehensive review on various types of noise in image processing. *int. J. Sci. eng. res*, 10(11), 388-393.
- Parrany, A. M., & Mirzaei, M. (2022). A new image processing strategy for surface crack identification in building structures under non-uniform illumination. *IET Image Processing*, 16(2), 407-415.
- Patidar, P., Gupta, M., Srivastava, S., & Nagawat, A. K. (2010). Image de-noising by various filters for different noise. *International journal of computer applications*, 9(4), 45-50.
- Pavlidis, T. (1988). Image analysis. *Annual Review of Computer Science*, 3(1), 121-146.
- Payawal, J. M. G., & Kim, D.-K. (2023). Image-Based Structural Health Monitoring: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 13(2), 968.
- Pepe, M., Fregonese, L., & Scaioni, M. (2018). Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 412-436.
- Perry, B. J., Guo, Y., Atadero, R., & van de Lindt, J. W. (2020). Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning. *Measurement*, 164, 108048.
- Pezeshki, H., Adeli, H., Pavlou, D., & Siriwardane, S. C. (2023). State of the art in structural health monitoring of offshore and marine structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*.
- Philpot, W. D., & Philipson, W. R. (2012). *Photogrammetry*. In *Remote sensing fundamentals*. Cornell University.
- Port Technology Group. (2009). *Guidelines on Strategic Maintenance for Port Structures*. In: ASEAN-Japan Transport Partnership Tokyo, Japan.
- Pratt, W. K. (2013). *Introduction to digital image processing*. CRC press.
- Pursiainen, C. (2009). The challenges for European critical infrastructure protection. *European Integration*, 31(6), 721-739.
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Desktop 3.22 User Guide* [Software Documentation].
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems*. Routledge.
- Rosenfeld, A. (1987). Image analysis: Problems, progress and prospects. *Readings in computer vision*, 3-12.
- Rosquoët, F., Bonnet, S., Schoefs, F., & Khelidj, A. (2006). Chloride propagation in concrete harbour. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering,

- Russ, J. C. (2006). *The Image Processing Handbook*, 5th edn. (Image Processing Handbook). CRC, USA.
- Scikit Community. (2022). *scikit-image 0.19.2 docs* [Software Documentation]. <https://scikit-image.org/docs/0.19.x/>
- SciPy Community. (2023). *SciPy User Guide* [Software Documentation]. <https://docs.scipy.org/doc/scipy-1.10.0/tutorial/index.html#user-guide>
- Scott, M., Rezaizadeh, A., Delahaza, A., Santos, C., Moore, M., Graybeal, B., & Washer, G. (2003). A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment. *ndt & E International*, 36(4), 245-255.
- Scrivener, K. L. (2014). Options for the future of cement. *Indian Concr. J*, 88(7), 11-21.
- SESAR Joint Undertaking. (2017). European drones outlook study: unlocking the value for Europe.
- Shaikh, F. U. A. (2018). Effect of cracking on corrosion of steel in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 1-12.
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *Ieee Access*, 7, 48572-48634.
- Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., & Pargar, F. (2011). Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: A case study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(9), 701-713.
- Shifani, S. A., Thulasiram, P., Narendran, K., & Sanjay, D. (2020). A study of methods using image processing technique in crack detection. 2020 2nd international conference on innovative mechanisms for industry applications (ICIMIA),
- Shih, F. Y. (2009). *Image processing and mathematical morphology: fundamentals and applications*. CRC press.
- Siamphukdee, K. (2015). *Development of 3-D predictive ageing simulations of reinforced concrete port structures* Monash University].
- Sierra, P. L., Chacón, R., & Martinez, X. (2022). Cost-effective measurement equipment and data analysis tool for structural health monitoring. Case study: Metro railway bridge. In *Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability* (pp. 509-516). CRC Press.
- Silva-Campillo, A., Pérez-Arribas, F., & Suárez-Bermejo, J. C. (2023). Health-Monitoring Systems for Marine Structures: A Review. *Sensors*, 23(4), 2099.
- Simpson, D. M., Lasley, C. B., Rockaway, T. D., & Weigel, T. A. (2010). Understanding critical infrastructure failure: examining the experience of Biloxi and Gulfport, Mississippi after Hurricane Katrina. *International journal of critical infrastructures*, 6(3), 246-276.
- Singhroy, V. (2020). *Advances in remote sensing for infrastructure monitoring*. Springer Nature.
- Slama, C. C. (1980). *Manual of Photogrammetry*.
- Soga, K. (1998). Soil Liquefaction Effects Observed in the Kobe Earthquake of 1995. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 131(1), 34-51.



- Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab*. John Wiley & Sons.
- Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014). *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Spyder, D. C. (2023). *Spyder Documentation* [Software Documentation]. <https://docs.spyder-ide.org/current/index.html>
- Sugano, T., Nozu, A., Kohama, E., Shimosako, K.-i., & Kikuchi, Y. (2014). Damage to coastal structures. *Soils and Foundations*, 54(4), 883-901.
- Talab, A. M. A., Huang, Z., Xi, F., & HaiMing, L. (2016). Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques. *Optik*, 127(3), 1030-1033.
- Tharwat, A. (2020). Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*, 17(1), 168-192.
- Themistocleous, K., Neocleous, K., Pilakoutas, K., & Hadjimitsis, D. G. (2014). Damage assessment using advanced non-intrusive inspection methods: integration of space, UAV, GPR, and field spectroscopy. Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014),
- Thoresen, C. A. (2010). *Port designer's handbook*. Thomas Telford London, UK.
- Tian, Y., Zhang, C., Jiang, S., Zhang, J., & Duan, W. (2021). Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 73-88.
- Tosti, F., Gagliardi, V., Ciampoli, L. B., Benedetto, A., Threader, S., & Alani, A. M. (2021). Integration of remote sensing and ground-based non-destructive methods in transport infrastructure monitoring: advances, challenges and perspectives. 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS),
- Tsaimou, C., Kagkelis, D. G., Karantzalos, K., & Tsoukala, V. (2022, 12-14 October, 2022). *Remote Sensing Synergies for Port Infrastructure Monitoring and Condition Assessment* 12th International Conference on Engineering, Project and Production Management, Athens, Greece.
- Tsaimou, C., Sartampakos, P., & Tsoukala, V. (2023). UAV-driven approach for assisting Structural Health Monitoring of port infrastructure, *Structure and Infrastructure Engineering* (under review).
- UCDAVIS Civil and Environmental Engineering. Liquefaction & Ports: Kobe. <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/earthquake-hazards/liquefaction-ports/>
- Vaghefi, K., Oats, R. C., Harris, D. K., Ahlborn, T. M., Brooks, C. N., Endsley, K. A., Roussi, C., Shuchman, R., Burns, J. W., & Dobson, R. (2012). Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6), 886-895.



- Van Hung, N., Hung, V. V., & Viet, T. B. (2018). The effect of crack width on the service life of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,
- Wang, P., & Huang, H. (2010). Comparison analysis on present image-based crack detection methods in concrete structures. 2010 3rd international congress on image and signal processing,
- Wang, P., Tian, X., Peng, T., & Luo, Y. (2018). A review of the state-of-the-art developments in the field monitoring of offshore structures. *Ocean Engineering*, 147, 148-164.
- Wang, X., Nguyen, M., Stewart, M., Syme, M., & Leitch, A. (2010). Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure—Part 3: Case Studies of Concrete Deterioration and Adaptation. *Canberra, Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*.
- Warmerdam, F., & Rouault, E. (2023). *GDAL Documentation* [Software Documentation].
- Werner, S., McCullough, N., Bruin, W., Augustine, A., Rix, G., Crowder, B., & Tomblin, J. (2011). Seismic performance of Port de Port-au-Prince during the Haiti earthquake and post-earthquake restoration of cargo throughput. *Earthquake Spectra*, 27(1\_suppl1), 387-410.
- Whitehead, K., & Hugenholtz, C. H. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3), 69-85.
- Wilbanks, T., Fernandez, S., Backus, G., Garcia, P., Jonietz, K., Kirshen, P., Savonis, M., Solecki, W., & Toole, L. (2013). Climate change and infrastructure, urban systems. In *And Vulnerabilities: Technical Report for the US Department of Energy in Support of the National Climate Assessment*. Springer.
- Xiang, T.-Z., Xia, G.-S., & Zhang, L. (2019). Mini-unmanned aerial vehicle-based remote sensing: Techniques, applications, and prospects. *IEEE geoscience and remote sensing magazine*, 7(3), 29-63.
- Yağmur Çiğdem Aktaş. (2021). *A Comprehensive Guide to Image Processing: Part 3*. <https://towardsdatascience.com/image-processing-part-3-dbf103622909>
- Yang, Y.-S., Wu, C.-L., & Hsu, T. T. (2016). Thin shear crack observation of a cylinder structure test using image analysis. 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings,
- Yang, Y.-S., Wu, C.-L., Hsu, T. T., Yang, H.-C., Lu, H.-J., & Chang, C.-C. (2018). Image analysis method for crack distribution and width estimation for reinforced concrete structures. *Automation in Construction*, 91, 120-132.
- Ye, X.-W., Dong, C.-Z., & Liu, T. (2016). A review of machine vision-based structural health monitoring: methodologies and applications. *Journal of Sensors*, 2016.
- Young, I., & Renswoude, J. (1988). Three-dimensional image analysis. *SPIN Program*, 1-25.
- Zhang, Y.-J. (1996). Image engineering and bibliography in China. *Technical Digest of ISIST*, 96, 158-160.
- Zhang, Y.-J. (2017a). *Image Engineering, Image Analysis*.: De Gruyter Textbook.
- Zhang, Y.-J. (2017b). *Image Engineering, Image Processing*.: De Gruyter Textbook.

- Zhang, Y.-J. (2017c). *Image Engineering., Image Understanding.: De Gruyter Textbook.*
- Zhang, Y.-J. (2021). *Image engineering. Handbook of Image Engineering, 55-83.*
- Zhang, Y.-J. (2022). *A Selection of Image Analysis Techniques: From Fundamental to Research Front.* ROUTLEDGE.
- Zhang, Y., Kim, C.-W., Tee, K. F., & Lam, J. S. L. (2017). *Optimal sustainable life cycle maintenance strategies for port infrastructures. Journal of Cleaner Production, 142, 1693-1709.*
- Zio, E. (2016). *Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. Reliability Engineering & System Safety, 152, 137-150.*
- Ελληνική Στατιστική Αρχή ΕΛΣΤΑΤ. (2023). *Αποτελέσματα Απογραφής Πληθυσμού Κατοικιών 2021.*
- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. (2020a). *Lavrio Processing Report 1 [Technical Report].*
- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. (2020b). *Lavrio Processing Report 2 [Technical Report].*
- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. (2021a). *Lavrio Processing Report 3 [Technical Report].*
- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. (2021b). *Lavrio Processing Report 4 [Technical Report].*
- Εργαστήριο Λιμενικών Έργων. (2022). *Βάση δεδομένων επιτόπιας επιθεώρησης από UAV.*
- Μαραγκουδάκης, Μ. (2018). *Το Λιμάνι του Λαυρίου - Ανάπτυξη.*
- Οργανισμός Λιμένος Λαυρίου. (2023). <https://oll.gr/>
- Πατιάς, Π. (1991). *Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία. Εκδόσεις Ζήτη.*
- Τσάιμου, Χ. (2020). *Ανάπτυξη συστήματος αποτύπωσης και παρακολούθησης της υφιστάμενης κατάστασης υποδομών λιμένων με σύγχρονες μεθόδους.*

## Παράρτημα Α

---

### 1. Διεργασία 1

```
import os
import rasterio
import numpy as np

# Input file path
input_file = r'D:\Python_Analysis\RAW_DATA\ISI_1_A7_ortho_georef.tif'

# Output directory path
output_dir = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_1'

# Create the output directory if it does not exist
if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)

# Define the luminosity constant as weights for each band
weights = [0.299, 0.587, 0.114]

# Extract the file name without the extension
input_file_name = os.path.basename(input_file)
input_file_name_no_ext = os.path.splitext(input_file_name)[0]

# Create the output file name by concatenating the input file name with "gray"
output_file = os.path.join(output_dir, input_file_name_no_ext + '_gray.tif')

# Open the input GeoTIFF
with rasterio.open(input_file) as src:

    # Read only the first 3 bands of the file
```

```
data = src.read([1, 2, 3])

# Tile the weights array to match the shape of the data array
weights = np.resize(weights, (data.shape[0], 1, 1))

# Multiply the data for each band by the corresponding weight
data = data * weights

# Sum the bands to create the grayscale image
gray = data.sum(axis=0)

# Create a new array of the same shape as the grayscale image
gray_masked = np.zeros_like(gray)

# Use the nodata value of the input raster as the mask
gray_masked[gray != src.nodata] = gray[gray != src.nodata]

# Exclude pixels with values greater than 255
gray_masked[gray_masked > 255] = 0

# Create a new GeoTIFF with the grayscale data
with rasterio.open(output_file, 'w', driver='GTiff', width=src.width, height=src.height,
count=1, dtype=gray_masked.dtype, crs=src.crs, transform=src.transform, nodata=0) as dst:
    dst.write(gray_masked, 1)

print('Step 1 has just been completed')
```

## 2. Διεργασία 2

```
import os
from osgeo import gdal
from scipy.ndimage import median_filter

# Input file path
input_file = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_1\ISI_1_A7_ortho_georef_
gray.tif'

# Output directory path
output_dir = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_2'
```

```
# Create the output directory if it does not exist
if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)

# Open the image
ds = gdal.Open(input_file)

# Read the image band
band = ds.GetRasterBand(1)
image = band.ReadAsArray()

# Median filter
size = (3, 3) # set the window size of the median filter
filtered_image = median_filter(image, size)

# Create a new geotiff with gdal
driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

base_name = os.path.splitext(os.path.basename(input_file))[0].replace("_gray", "")

out_file = os.path.join(output_dir, f"{base_name}_mdn3x3.tif")
out_ds = driver.Create(out_file, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(filtered_image)
out_band.SetNoDataValue(0)

out_ds = None
print('Step 2 has just been completed')
```

### 3. Διεργασία 3

```
import os
from osgeo import gdal
from skimage.filters import threshold_local
from skimage.filters.rank import otsu
```

```
from skimage.morphology import rectangle

# Input file path
input_file = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_2\ISI_1_A7_clipped_cracks_
area.tif'

# Output directory path
output_dir = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_3'

# Create the output directory if it does not exist
if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)

# Open the image
ds = gdal.Open(input_file)

# Read the image band
band = ds.GetRasterBand(1)
image = band.ReadAsArray()

window_size_local= 23
offset_factor = 3
local_threshold = threshold_local(image, window_size_local, offset = offset_factor)
binary_local_threshold = image <= local_threshold

# Convert the image to unsigned byte format
norm_image = image.astype('uint8')

window_rows = 7
window_cols = 10
selem = rectangle(window_rows,window_cols)

local_thresh_otsu = otsu(norm_image, selem=selem)
binary_local_otsu = norm_image <= local_thresh_otsu

# Create a new geotiff with gdal
driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

base_name =
```

```
os.path.splitext(os.path.basename(input_file))[0].replace("_clipped_cracks_area", ""))

out_file_1 = os.path.join(output_dir, f"{base_name}_local_threshold_{window_size_local}_
{offset_factor}.tif")
out_ds = driver.Create(out_file_1, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(binary_local_threshold)

out_file_2 = os.path.join(output_dir, f"_local_otsu_rect_.tif")
out_ds = driver.Create(out_file_2, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(binary_local_otsu)

out_ds = None
print('Step 3 has just been completed')
```

#### 4. Διεργασία 4

```
import os
from osgeo import gdal
from skimage import measure
import numpy as np

# Input file path
input_file = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_3\ISI_1_A7_local_threshold_19_
3.tif'

# Output directory path
output_dir = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_4'

# Create the output directory if it does not exist
if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)
```

```
# Open the image
ds = gdal.Open(input_file)

# Read the image band
band = ds.GetRasterBand(1)
image = band.ReadAsArray()

# Label connected regions in the binary image
label_image = measure.label(image)

# Find properties of labeled regions
properties = measure.regionprops(label_image)

# Set a threshold for the area size (number of pixels)
threshold_min = 15

# Create a new binary image with only regions above the threshold
filtered_image = np.zeros_like(image)
for prop in properties:
    if prop.area >= threshold_min :
        # Set pixels of the region to white in the filtered image
        filtered_image[label_image == prop.label] = 1

# Create a new geotiff with gdal
driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

# Extract the base name of the input file without extension
base_name = os.path.splitext(os.path.basename(input_file))[0]

# Find the last occurrence of '_local_threshold' in the base name
idx = base_name.rfind('_local_threshold')

if idx != -1:
    # If '_local_threshold' is found, replace it and everything after it with '_revised'
```



```
base_name = base_name[:idx] + '_revised'

out_file = os.path.join(output_dir, f'{base_name}_{threshold_min}.tif')
out_ds = driver.Create(out_file, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(filtered_image)

out_ds = None
print('Step 4 has just been completed')
```

## 5. Διεργασία 5

```
import os
from osgeo import gdal
import cv2
import numpy as np

# Input file path
input_file = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_4\ISI_1_A7_revised_15.tif'

# Output directory path
output_dir = r'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_5'

# Create the output directory if it does not exist
if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)

# Open the image
ds = gdal.Open(input_file)

# Read the image band
band = ds.GetRasterBand(1)
image = band.ReadAsArray(buf_type=gdal.GDT_Byte)
```

```
kernel_dilation_size = 3
kernel_dilation = np.ones((kernel_dilation_size, kernel_dilation_size), np.uint8)
iterations_dilation = 2
dilation_img = cv2.dilate(image, kernel_dilation, iterations_dilation )

kernel_erosion_size = 3
kernel_erosion = np.ones((kernel_erosion_size, kernel_erosion_size), np.uint8)
iterations_erosion = 2
erosion_img = cv2.erode(dilation_img, kernel_erosion, iterations_erosion)

# Create a new geotiff with gdal
driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

# Extract the base name of the input file without extension
base_name = os.path.splitext(os.path.basename(input_file))[0]

# Find the last occurrence of '_revised' in the base name
idx = base_name.rfind('_revised')

if idx != -1:
    # If '_revised' is found, replace it and everything after it
    base_name = base_name[:idx]

# Construct the output file name by appending '.tif' to the base name
out_file_1 = os.path.join(output_dir, f'{base_name}_dilation_{kernel_dilation_size}_
{iterations_dilation}.tif')
out_file_2 = os.path.join(output_dir, f'{base_name}_erosion_{kernel_erosion_size}_
{iterations_erosion}.tif')

out_ds = driver.Create(out_file_1, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(dilation_img)
```

```
out_ds = driver.Create(out_file_2, image.shape[1], image.shape[0], 1, band.DataType)
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(erosion_img)

out_ds = None
print('Step 5 has just been completed')
```

## 6. Διεργασία 6

```
import os
import csv
from osgeo import gdal
from sklearn.metrics import confusion_matrix, accuracy_score, precision_score, recall_score,
f1_score, ConfusionMatrixDisplay
import matplotlib.pyplot as plt

# Set input and output file paths
input_dir = 'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_6_input'
input_file1 = os.path.join(input_dir, 'real_ISI_1.tif')
input_file2 = os.path.join(input_dir, 'prediction_ISI_1.tif')

# Output directory and file
output_dir = 'D:\Python_Analysis\RESULTS\STEP_6_output'
output_file = os.path.join(output_dir, 'ISI_1_accuracy_report.csv')

# Read input files
ds1 = gdal.Open(input_file1)
ds2 = gdal.Open(input_file2)

# Read pixel values as arrays
actual = ds1.ReadAsArray()
predicted = ds2.ReadAsArray()
```

### # Compute confusion matrix

```
confusion_matrix = confusion_matrix(actual.flatten(), predicted.flatten())
```

### # Compute accuracy metrics using sklearn.metrics functions

```
accuracy = accuracy_score(actual.flatten(), predicted.flatten())  
precision = precision_score(actual.flatten(), predicted.flatten())  
recall = recall_score(actual.flatten(), predicted.flatten())  
f1_score = f1_score(actual.flatten(), predicted.flatten())
```

### # Save accuracy metrics report as CSV

```
with open(output_file, 'w', newline=") as csvfile:
```

```
    writer = csv.writer(csvfile)  
    writer.writerow(['True Positive', 'False Positive', 'False Negative', 'True Negative'])  
    writer.writerow([confusion_matrix[1][1], confusion_matrix[1][0], confusion_matrix[0][1],  
confusion_matrix[0][0]])  
    writer.writerow(['Accuracy', 'Precision', 'Recall', 'F1-score'])  
    writer.writerow([accuracy, precision, recall, f1_score])
```

### # Save confusion matrix plot as png

```
cmap = 'YlGnBu' # Change the colormap name by preference  
cm_display = ConfusionMatrixDisplay(confusion_matrix = confusion_matrix, display_labels  
= ["False - 0", "True - 1"])  
cm_display.plot(cmap=cmap)  
plt.savefig(os.path.join(output_dir, 'ISI_1_confusion_matrix.png'), dpi=500)
```

```
print('Step 6 has just been completed')
```