



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Χελιώτη

Επιβλέπουσα: Βασιλική Κ. Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Χριστίνα Ν. Τσάιμου, Υποψήφια Διδάκτορας

Αθήνα, Μάρτιος 2022



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνα Χελιώτη

Επιβλέπουσα: Βασιλική Κ. Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Χριστίνα Ν. Τσάιμου, Υποψήφια Διδάκτορας

Αθήνα, Μάρτιος 2022



Copyright © Χελιώτη Κωνσταντίνα, 2022

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 της συγγραφέως. 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 την συγγραφέα.

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

Copyright © Chelioti Konstantina, 2022

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).



Κωνσταντίνα Χελιώτη (2022)

Πολυκριτηριακή Ανάλυση Μεθόδων Παρακολούθησης Λιμενικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Konstantina Chelioti (2022)

Multi-Criteria Analysis of Port Infrastructure Monitoring Methods

Diploma Thesis

Department of Water Resources and Environmental Engineering, National Technical University
of Athens, Greece



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και κατ' επέκταση των προπτυχιακών σπουδών μου, οφείλω να ευχαριστήσω κάποια πρόσωπα που αποτέλεσαν σημαντικές συνιστώσες κατά την φάση εκπόνησής της. Καταρχάς, θα ήθελα να απευθύνω τις πιο θερμές ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Βασιλική Τσουκαλά, πρωτίστως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε μέσω της ανάθεσης του θέματος της εργασίας και δευτερευόντως για την συνεργασία, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε.

Συνεχίζοντας, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Χριστίνα Τσάιμου, που με την αμέριστη βοήθειά της, τις συμβουλές της και την εξαιρετική συνεργασία της συντέλεσε ενεργά στο να φέρω εις πέρας την εργασία αυτή.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πίστη της σε εμένα, καθώς και την αδιάκοπη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών σπουδών μου.

Τέλος, φίλους και συμφοιτητές για την έμπρακτη βοήθεια και ψυχολογική υποστήριξη στο πρόσωπό μου, κάνοντας ιδιαίτερη μνεία στη φίλη μου Μαντώ με την οποία συμπορευτήκαμε τα τελευταία έτη των σπουδών μας.

Κωνσταντίνα Χελιώτη

Αθήνα, Μάρτιος 2022



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι λιμενικές υποδομές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες των περιοχών που εξυπηρετούν. Το μεγαλύτερο μέρος τους λειτουργεί κάτω από σκληρές και διαβρωτικές περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που τις κάνει ιδιαίτερα επιρρεπείς σε ταχεία γήρανση και φθορά. Αστοχίες σε τμήματα αλλά και σε ολόκληρη την κατασκευή μπορούν να προκαλέσουν ανθρώπινες απώλειες και οικονομικές καταστροφές. Ως εκ τούτου, οι επιθεωρήσεις τέτοιων κατασκευών είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ασφάλειας και της δομικής ακεραιότητάς τους σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Επιπλέον, η παρακολούθηση κατά τη φάση λειτουργίας τους είναι πολύ σημαντική, όταν πρόκειται να αποφασιστεί εάν θα παραταθεί η διάρκεια ζωής μιας υποδομής. Ιστορικά, η παρακολούθηση των λιμενικών κατασκευών βασίστηκε σε επαναλαμβανόμενες οπτικές παρατηρήσεις και εκτιμήσεις της δομικής κατάστασης από εκπαιδευμένους επιθεωρητές. Ωστόσο, η οπτική επιθεώρηση παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα ως μέθοδος, όπως η υποκειμενικότητα και η αβεβαιότητα. Συνεπώς, προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνικών παρακολούθησης, όπως οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι (Non Destructive Testing, NDT) και οι Μέθοδοι Παρακολούθησης της Δομικής Υγείας (Structural Health Monitoring, SHM) για την ακριβή αξιολόγηση της κατάστασης των λιμενικών κατασκευών και για την εξάλειψη των περιορισμών της οπτικής επιθεώρησης. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται σε προηγμένες τεχνολογίες που αφορούν στις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους συμπεριλαμβανομένων και των τεχνικών Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), οι οποίες αποτελούν μία σύγχρονη προσθήκη στον τομέα της παρακολούθησης των λιμενικών έργων. Ο στόχος της είναι η αξιολόγηση και η βαθμολόγηση των συνήθων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων (Γεωραντάρ, Υπέρυθρη Θερμογραφία και Δοκιμή Υπερήχων), καθώς επίσης και της Φωτογραμμετρίας ως προς συγκεκριμένα κρίσιμα κριτήρια. Τα κριτήρια έχουν επιλεγεί ύστερα από εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα, ενώ οι τιμές τους έχουν προκύψει τόσο από βιβλιογραφικές αναφορές όσο και από ανάλυση των απόψεων ακαδημαϊκών επιστημόνων. Προκειμένου να ταξινομηθούν οι μέθοδοι παρακολούθησης που εξετάζονται και να καθοριστεί ποια τεχνολογία είναι η καταλληλότερη για την αξιολόγηση των λιμενικών υποδομών, απαιτείται η επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος. Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) είναι μια αποτελεσματική τεχνική λήψης αποφάσεων σε προβλήματα πολλαπλών κριτηρίων (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) που στοχεύει στην κατάταξη των υπό εξέταση εναλλακτικών. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η μεθοδολογία PROMETHEE για την κατάταξη και την εκτίμηση της βέλτιστης τεχνικής παρακολούθησης των λιμενικών υποδομών. Σύμφωνα με τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου δεν είναι μονόδρομος, αλλά σχετίζεται με την επιλογή των κριτηρίων, τους συντελεστές βαρύτητας, την εμπειρία των ερωτηθέντων καθώς και το κοινό στο οποίο αποσκοπεί να φανεί χρήσιμη η ανάλυση. Ωστόσο, η έλλειψη συγκεκριμένης τεχνολογίας πάνω σε μια σύγχρονη τεχνική μπορεί να κάνει τους αποφασίζοντες διστακτικούς στην τελική επιλογή της.

Λέξεις-κλειδιά: Αξιολόγηση Λιμενικών Υποδομών, Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι, Πολυκριτηριακή Ανάλυση, Μέθοδος PROMETHEE.



ABSTRACT

Port infrastructure plays an important role in the economic and social activities of the regions in which they serve. The majority of port structures operate under aggressive and corrosive environmental conditions and, consequently, they are particularly susceptible to rapid aging and deterioration. Total or partial failures of these structures pose a risk to people lives and cause economic losses. Therefore, inspections are crucial to ensure that safety and structural integrity are maintained at an acceptable level. Moreover, in-service monitoring plays a key role when it comes to deciding whether to extend the lifespan of a structure. Historically, port monitoring has been based on recurrent visual observations and assessments of structural condition carried out by trained inspectors. Nevertheless, visual inspection suffers from several limitations such as subjectivity and uncertainty. Accordingly, a need was arisen to deploy new techniques to precisely assess the condition of port structures and eliminate restrictions of visual inspection, such as Non-Destructive Testing (NDT), and Structural Health Monitoring (SHM). This study investigates advanced technologies such as NDT including Remote Sensing techniques, which are a modern addition to port monitoring field. The objective of this research is the evaluation and grading of common NDT methods (Ground Penetrating Radar, Infrared Thermography and Ultrasonic Testing) as well as Photogrammetry based on crucial criteria. The criteria have been selected after extensive literature survey, yet, assigned values have emerged both from literature references and from the analysis of experts' judgements. In order to rank the NDT methods and determine which technology is the most suitable for port structures assessment, a multi-criteria problem needs to be solved. PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) is an efficient Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) technique that aims to rank the evaluations under consideration. This study applies to classification and evaluation of the optimum method for port infrastructure monitoring. The overall investigation showed that the selection of the optimal technique is related to the selected criteria, the weights, the experience of the responders (experts) and the people that the analysis is useful to. However, the lack of technical know-how on a modern method can make decision makers hesitant to finally select it.

Key-words: Port Infrastructure Monitoring, Non-Destructive Techniques, Remote Sensing, Multi-Criteria Decision Analysis, PROMETHEE method.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ & ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	xi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	4
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ.....	6
2.2.1 Οπτική Επιθεώρηση.....	7
2.2.2 Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι (NDT)	8
2.2.3 Τεχνικές Τηλεπισκόπησης.....	16
2.2.4 Παρακολούθηση της Υγείας των Υποδομών (SHM)	19
2.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ.....	23
3. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	25
3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	29
3.2 ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΩΝ ΣΕ ΛΙΜΕΝΙΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	31
3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	37
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	39
4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PROMETHEE.....	41
4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ	47
4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΡΩΝ	55
4.3.1 Μέθοδος Εντροπίας.....	56
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	59
5.1 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ	59
5.1.1 Τιμές Κριτηρίων από Βιβλιογραφικές Αναφορές	60



5.1.2	Ισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση	63
5.2	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	73
5.2.1	Βαθμολόγηση Μεθόδων στα Εξεταζόμενα Κριτήρια	73
5.2.2	Προσδιορισμός Βαρών	74
5.2.3	Ισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση	74
5.2.4	Ανισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση	77
5.3	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	79
5.3.1	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Υφιστάμενων Ερευνών	79
5.3.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Συνόλου Μεθόδων.....	81
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	83
6.1	ΣΥΝΟΨΗ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ.....	83
6.1.1	Ευρήματα από Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	83
6.1.2	Ευρήματα Ανάλυσης.....	84
6.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	88
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: «ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ»	103
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: «ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ»	116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1	Σχέση αξιοπιστίας κατασκευής-χρόνου, με και χωρίς ενέργειες συντήρησης (Frangopol & Kim, 2014).	4
Εικόνα 2.2	Διάγραμμα αξιοπιστίας κατασκευής-χρόνου (Chandrasekaran, 2019).	5
Εικόνα 2.3	Κατηγορίες παρακολούθησης λιμενικών υποδομών.	6
Εικόνα 2.4	Εφαρμογή μεθόδου οπτικής επιθεώρησης σε προβλήτα (Mizuno, 2018).	7
Εικόνα 2.5	Εξοπλισμός οπτικής επιθεώρησης: borescopes, βιντεοσκόπιο (Πηγή: www.olympus-ims.com).	8
Εικόνα 2.6	Κατηγοριοποίηση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων και τεχνικές που εμπεριέχουν (Abdelkhalek & Zayed, 2020).	8
Εικόνα 2.7	Υπέρυθρη εικόνα επιφανειακής κατάστασης δοκιμίου σκυροδέματος και αποτύπωση θερμοκρασιακής διαφοροποίησης σε θέσεις φθοράς (Aggelis et al., 2010).	9
Εικόνα 2.8	Επίδραση εσωτερικής φθοράς στη θερμοκρασία της επιφάνειας κατά τη ροή θερμότητας (ACI 228.2R-13, 2013).	10
Εικόνα 2.9	Εφαρμογή μεθόδου παθητικής Υπέρυθρης Θερμογραφίας σε οδόστρωμα γέφυρας σκυροδέματος (Oh et al., 2013a).	10
Εικόνα 2.10	Μέθοδος Γεωραντάρ α) σε απόσταση από την επιφάνεια της κατασκευής (Khamzin et al., 2017), β) σε επαφή με υποδομή σπλισμένου σκυροδέματος και αντίστοιχη έξοδος σήματος (Tosti & Ferrante, 2020).	11
Εικόνα 2.11	Εσωτερική απεικόνιση της υποδομής και θέσεις φθορών (Abu Dabous & Feroz 2020).	12
Εικόνα 2.12	Θεμελιώδης αρχή Μεθόδου Υπερήχων (Sharma & Sinha, 2018).	12
Εικόνα 2.13	Κατηγοριοποίηση τεχνικών Δοκιμής Υπερήχων (Khanal, 2020).	13
Εικόνα 2.14	Μέθοδος Κρούση-Ηχώ (Carino, 2015).	14
Εικόνα 2.15	Συσκευή κρούσης και αισθητήρας (αριστερά) και μονάδα ελέγχου (δεξιά) (Grosse et al., 2005).	14
Εικόνα 2.16	Βασικές αρχές μεθόδου Ακουστικών Εκπομπών (Nair & Cai, 2010).	15
Εικόνα 2.17	Διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατου μοντέλου λιμένα από τη συλλογή φωτογραφιών (σχήμα α) έως την ανακατασκευή φωτορεαλιστικού μοντέλου (σχήμα δ) (Stein, 2019).	16
Εικόνα 2.18	Εκτεταμένο διάγραμμα ροής σταδίων εφαρμογής της Φωτογραμμετρίας (Bemis et al., 2014).	17



Εικόνα 2.19	Μέθοδος LiDAR: επίγειος εξοπλισμός αριστερά και 3D μοντέλο γέφυρας δεξιά (Abu Dabous & Feroz 2020).	18
Εικόνα 2.20	Ιεραρχική αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης με αισθητήρες (Law et al., 2014).....	19
Εικόνα 2.21	Στάδια εφαρμογής του SHM (Chandrasekaran, 2019).....	20
Εικόνα 2.22	Αισθητήρες οπτικών ινών (FOS) αριστερά και οπτικών ινών πλέγματος Bragg (FBG) δεξιά (Taheri, 2019).....	22
Εικόνα 2.23	Κατηγορίες πλατφορμών για την επιθεώρηση κατασκευών (Ahmed et al., 2020).....	24
Εικόνα 3.1	Τύπος παράκτιων έργων, κυματοθραύστης (Smith, 2016).....	27
Εικόνα 3.2	Τύποι λιμενικών κατασκευών: α) κρηπιδότοιχος τύπου μπλοκ, β) κρηπιδότοιχος Caisson, γ) πασσαλότοιχος (Smith, 2016).	28
Εικόνα 3.3	Παράδειγμα αποφλοίωσης επιφάνειας σκυροδέματος στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.	31
Εικόνα 3.4	Αποτύπωση της ρηγμάτωσης και της διάβρωσης οπλισμού στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.	31
Εικόνα 3.5	Αποτύπωση της ρηγμάτωσης (αριστερά) και της φθοράς από πιθανή κρούση στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου, όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.....	32
Εικόνα 3.6	Αιτίες φθορών σε λιμενικές υποδομές (Champiri et al., 2016).	34
Εικόνα 4.1	Βήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης (Jahanshahloo et al., 2006).	40
Εικόνα 4.2	Στάδια εφαρμογής μεθόδου PROMETHEE.....	41
Εικόνα 4.3	Ροές εισόδου και εξόδου στο PROMETHEE (Brans & De Smet, 2016).....	46
Εικόνα 4.4	Πιθανές καταστάσεις προτίμησης μεταξύ ενός ζεύγους εναλλακτικών.	46
Εικόνα 4.5	Ιεραρχική δομή για την επιλογή της βέλτιστης Μη Καταστρεπτικής Μεθόδου.	54
Εικόνα 5.1	Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Kušar et al. (2018).	68
Εικόνα 5.2	Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Lee & Kalos (2015).....	68
Εικόνα 5.3	Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Gucunski et al. (2014).	69
Εικόνα 5.4	Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Kušar et al. (2018).	70
Εικόνα 5.5	Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Lee & Kalos (2015).....	71
Εικόνα 5.6	Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Gucunski et al. (2014).....	71
Εικόνα 5.7	Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Kušar et al. (2018).	72
Εικόνα 5.8	Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Lee & Kalos (2015).	72



Εικόνα 5.9	Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Gucunski et al. (2014).	72
Εικόνα 5.10	Γραφική απεικόνιση των τιμών των κριτηρίων για την Ισοβαρή ανάλυση.	75
Εικόνα 5.11	Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) για Ισοβαρή ανάλυση.	76
Εικόνα 5.12	Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) για Ισοβαρή ανάλυση.	76
Εικόνα 5.13	Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) για Ανισοβαρή ανάλυση.	78
Εικόνα 5.14	Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) για Ανισοβαρή ανάλυση.	78



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1	Λιμενικά και παράκτια έργα από σκυροδέμα (Smith, 2016).....	26
Πίνακας 3.2	Εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων σε βασικές λιμενικές υποδομές.....	30
Πίνακας 3.3	Τύποι φθορών σε λιμενικές υποδομές σκυροδέματος.....	32
Πίνακας 3.4	Εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων για την ανίχνευση φθορών σε λιμενικές υποδομές σκυροδέματος.....	36
Πίνακας 4.1	Συναρτήσεις προτίμησης του PROMETHEE (Oubahman & Duleba, 2021).....	42
Πίνακας 4.2	Σύνολο κριτηρίων και υποκριτηρίων στη διεθνή βιβλιογραφία.....	50
Πίνακας 5.1	Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων (Kuřar et al., 2018).....	60
Πίνακας 5.2	Βαθμολόγηση κριτηρίων (Kuřar et al., 2018).....	61
Πίνακας 5.3	Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Kuřar et al. (2018).....	61
Πίνακας 5.4	Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων (Kuřar et al., 2018).....	62
Πίνακας 5.5	Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Lee & Kalos (2015).....	62
Πίνακας 5.6	Εξεταζόμενα κριτήρια για την αξιολόγηση των μεθόδων (Gucunski et al., 2014).....	63
Πίνακας 5.7	Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Gucunski et al. (2014).....	63
Πίνακας 5.8	Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων για τα εξεταζόμενα κριτήρια Kuřar et al. (2018).....	64
Πίνακας 5.9	Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Kuřar et al. (2018).....	64
Πίνακας 5.10	Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Lee & Kalos (2015).....	64
Πίνακας 5.11	Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Gucunski et al. (2014).....	64
Πίνακας 5.12	Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Kuřar et al. (2018).....	65
Πίνακας 5.13	Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Lee & Kalos (2015).....	66
Πίνακας 5.14	Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Gucunski et al. (2014).....	66
Πίνακας 5.15	Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Kuřar et al. (2018).....	67
Πίνακας 5.16	Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Lee & Kalos (2015).....	67
Πίνακας 5.17	Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Gucunski et al. (2014).....	67
Πίνακας 5.18	Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Kuřar et al. (2018).....	69
Πίνακας 5.19	Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Lee & Kalos (2015).....	70
Πίνακας 5.20	Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Gucunski et al. (2014).....	70



Πίνακας 5.21 Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων και Φωτογραμμετρίας.....	73
Πίνακας 5.22 Στάθμιση κριτηρίων με τη μέθοδο Εντροπίας.	74
Πίνακας 5.23 Πίνακας αξιολόγησης Ισοβαρούς ανάλυσης.	75
Πίνακας 5.24 Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο για Ισοβαρή ανάλυση.	75
Πίνακας 5.25 Δείκτες φ για Ισοβαρή ανάλυση.	76
Πίνακας 5.26 Πίνακας αξιολόγησης Ανισοβαρούς ανάλυσης.	77
Πίνακας 5.27 Δείκτες φ για Ανισοβαρή ανάλυση.	78



ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ & ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional
AE	Acoustic Emission
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALS	Aerial Laser Scanning
ANP	Analytic Network Process
ARA	Advanced Robotics and Automation
ASCE	American Society of Civil Engineers
COPRAS	Complex Proportional Assessment
CRP	Close Range Photogrammetry
DAQ	Data Acquisition System
DEM	Digital Elevation Model
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality Method
EM	Electromagnetic
FBG	Fiber Bragg Grating
FFT	Fast Fourier Transform
FOS	Fiber Optic Sensors
GAIA	Geometric Analysis for Interactive Aid
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
IE	Impact-Echo
IRT	Infrared Thermography
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAUT	Multi Attribute Utility
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MCDM	Multi-Criteria Decision-Making
NDT	Non-Destructive Techniques
NTUA	National Technical University of Athens
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations



RABIT	Robotics-Assisted Bridge Inspection Tool
ROCIIM	Robotic Crack Inspection and Mapping
SAW	Simple Additive Weighting
SHM	Structural Health Monitoring
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UGV	Unmanned Ground Vehicles
UMV	Unmanned Marine Vehicles
US	Unmanned System
USV	Unmanned Submersible Vehicles
UT	Ultrasonic Testing
UUV	Unmanned Undersea Vehicles
VI	Visual Inspection
VIKOR	Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje (Multicriteria Optimization and Compromise Solution)
ΕΛΕ	Εργαστήριο Λιμενικών Έργων
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
ΣμηΕΑ	Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι λιμενικές υποδομές διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην οικονομία και την κοινωνία την οποία εξυπηρετούν. Αποτελούν μια από τις βασικότερες οδούς για την παγκόσμια διακίνηση των εμπορευμάτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν άλλοι δρόμοι δεν είναι προσπελάσιμοι. Συντελούν άμεσα στην ανάκαμψη των κοινοτήτων από μια φυσική ή ανθρωπογενή καταστροφή. Ενδεικτικό παράδειγμα θεωρείται η πρόσδεση και χρήση του νοσοκομειακού πλοίου USNS Comfort 1000 κλινών σε λιμάνι του Μανχάταν το 2020 για την εξυπηρέτηση ασθενών κατά τη διάρκεια της πανδημίας Covid-19 (U.S. Army Corps of Engineers, 2020). Επιπλέον, πλήθος οικιστικών, εμπορικών και μεταφορικών υποδομών βρίσκονται κατά μήκος των παράκτιων περιοχών. Τέτοιες λιμενικές υποδομές υποχρεούνται να λειτουργούν σε ένα αρκετά επιθετικό και διαβρωτικό περιβάλλον, παραμένοντας επιρρεπείς σε ταχεία γήρανση και υποβάθμιση (Stacey et al., 2008, O'Byrne et al., 2018). Φθορές όπως ρηγμάτωση, διάβρωση, αποκόλληση και χημική προσβολή είναι συνήθεις σε αυτές τις συνθήκες (Chandler, 2014). Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας υποβάθμισης μπορεί να είναι αισθητικού, λειτουργικού ή δομικού χαρακτήρα, ενώ σε περιπτώσεις μη έγκαιρης παρέμβασης μπορούν να επιφέρουν σημαντικό οικονομικό κόστος ή ακόμη και ανθρώπινες απώλειες (O'Byrne et al., 2018).

Μεγάλο μέρος των εγχώριων και διεθνών λιμενικών έργων πλησιάζουν ή έχουν ξεπεράσει τα 50 έτη λειτουργίας για τα οποία έχουν σχεδιαστεί (Boéro et al., 2012, Votsis et al. 2018). Παράγοντες που αποδίδονται στην κλιματική αλλαγή, όπως η αύξηση του επιπέδου της θάλασσας και τα διαβρωτικά για το σκυρόδεμα άλατα, μειώνουν αισθητά το χρόνο ζωής τους (Azevedo de Almeida & Mostafavi, 2016). Εναλλακτικές όπως η μετεγκατάσταση ή η κατασκευή νέων υποδομών είναι οικονομικά αποτρεπτικές για τους διαχειριστές λιμενικών έργων. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή ενός προγράμματος τακτικής παρακολούθησης, ανάλυσης και αξιολόγησης των φθορών των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος τόσο στα επιμέρους στοιχεία της όσο και σε ολόκληρη την κατασκευή (Champirigi et al., 2016). Η παρακολούθηση των υποδομών σκυροδέματος δίνει τη δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού και στοχευμένης στρατηγικής επιδιόρθωσης των φθορών, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και τη δομική ακεραιότητά τους.

Συνήθης πρακτική για τον εντοπισμό των φθορών σε κατασκευές σκυροδέματος αποτελεί η οπτική επιθεώρηση. Εξειδικευμένοι επόπτες και δύτες πραγματοποιούν την καταγραφή της κατάστασης των λιμενικών έργων. Ωστόσο, παράγοντες όπως η υποκειμενικότητα, η έλλειψη συγκέντρωσης και η κόπωση υπονομεύουν την ακρίβεια των επιθεωρήσεων (Agin, 1980, Komorowski & Forsyth, 2000). Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη για εφαρμογή πιο αξιόπιστων μεθόδων εποπτείας των κατασκευών. Τρεις σύγχρονες πρακτικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των υποδομών αφορούν στις Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές (Non-Destructive Testing, NDT), στις μεθόδους Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing) και στην συστηματική Παρακολούθηση της Υγείας των Κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM). Η πρώτη κατηγορία αφορά σε τεχνολογίες που λαμβάνουν δεδομένα για την κατασκευή σε τακτά χρονικά διαστήματα χωρίς να την φθείρουν. Οι μέθοδοι Τηλεπισκόπησης αποτελούνται από τεχνικές που εφαρμόζονται από απόσταση και σκοπό έχουν τη λήψη εικόνων της κατασκευής. Πολλές φορές η χρήση τους συνδυάζεται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα



(Unmanned Aerial Vehicles, UAV), τα οποία διευκολύνουν την εφαρμογή τους στο πεδίο. Τέλος, η συνεχής Παρακολούθηση της Υγείας των Υποδομών αναφέρεται στη διαρκή καταγραφή των αποκρίσεων των έργων σκυροδέματος με τη βοήθεια αισθητήρων που τοποθετούνται σε αυτά.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, αρχικά, η καταγραφή των σημαντικότερων τεχνολογιών για την παρακολούθηση και την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης των λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα. Απώτερος στόχος αποτελεί η ανάπτυξη μίας ευέλικτης μεθοδολογίας για την ανάδειξη της βέλτιστης δυνατής μεθόδου παρακολούθησης ύστερα από τη σύγκριση συνήθων τεχνολογιών, η οποία θα μπορεί να προσαρμόζεται και να εξελίσσεται ανάλογα με τις απαιτήσεις των εμπλεκόμενων μερών. Η σύγκριση των μεθόδων έγκειται στην επίδοση τους σε ένα σύνολο πολλών και αντικρουόμενων κριτηρίων. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα το οποίο, στη συγκεκριμένη εργασία, επιλύεται με τη χρήση της πολυκριτηριακής μεθόδου Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE), λαμβάνοντας υπόψη δύο προσεγγίσεις όσον αφορά την κατανομή των συντελεστών βαρύτητας για το εκάστοτε κριτήριο. Η πρώτη αφορά στην θεώρηση ισοδύναμων κριτηρίων (Ισοβαρής ανάλυση), ενώ η δεύτερη στην θεώρηση σταθμισμένων κριτηρίων (Ανισοβαρής ανάλυση). Κατά την εφαρμογή της δεύτερης προσέγγισης αξιοποιείται η μέθοδος της Εντροπίας προκειμένου να αποδοθούν με επιστημονικό τρόπο οι συντελεστές βαρύτητας στα κριτήρια.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας οργανώνεται ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για τη σημασία της παρακολούθησης των υποδομών σκυροδέματος και ιδιαίτερα των λιμενικών κατασκευών. Πραγματοποιείται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των υφιστάμενων μεθόδων αποτύπωσης και καταγραφής της λειτουργικής και δομικής κατάστασης των έργων από σκυρόδεμα και καθορίζονται οι τέσσερις βασικές κατηγορίες τους, η οπτική επισκόπηση, οι Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές (Non-Destructive Testing, NDT), οι τεχνολογίες Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing) και οι μέθοδοι Παρακολούθησης της Υγείας των Υποδομών (Structural Health Monitoring, SHM).
- Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται διεξοδικά τα είδη των κατασκευών από σκυρόδεμα που μπορούν να εντοπιστούν σε ένα λιμάνι, καθώς και οι συνήθεις φθορές που παρατηρούνται σε αυτές. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των υποδομών αυτών και τον εντοπισμό των φθορών, όπως αυτές έχουν αναφερθεί βιβλιογραφικά.
- Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης τεχνολογίας για την αξιολόγηση των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος. Συνοψίζονται οι εναλλακτικές επιλογές του πολυκριτηριακού προβλήματος, τα κριτήρια με βάση τα οποία εξετάζεται η απόδοση κάθε εναλλακτικής καθώς και η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης PROMETHEE. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά της μεθόδου Εντροπίας ως τεχνική απόδοσης βαρύτητας στα υπό εξέταση κριτήρια.



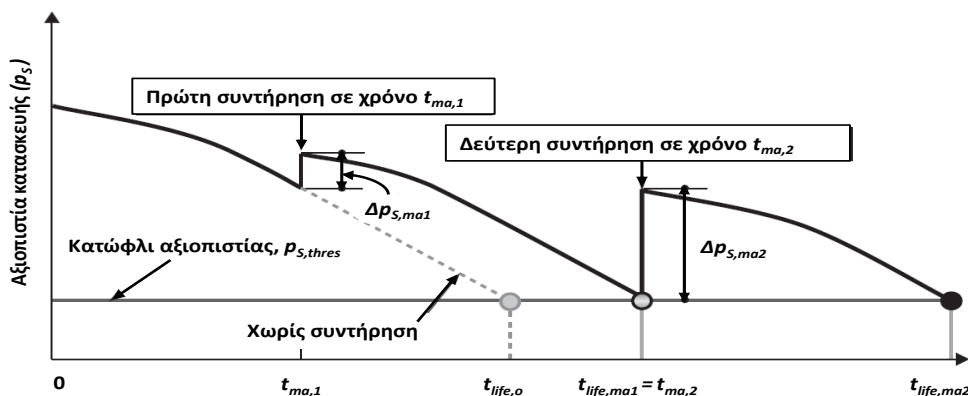
- Στο Κεφάλαιο 5 εφαρμόζεται η μέθοδος PROMETHEE για τέσσερις τεχνολογίες παρακολούθησης που επιλέχθηκαν. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται ισοβαρείς και ανισοβαρείς πολυκριτηριακές αναλύσεις για την κατάταξη των μεθόδων, αλλά και τον προσδιορισμό της βέλτιστης δυνατής στην αξιολόγηση των λιμενικών έργων από σκυρόδεμα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται αφορούν τόσο σε στοιχεία υφιστάμενων ερευνών πάνω στο αντικείμενο, όσο και σε πληροφορίες που προέκυψαν από την εμπειρία και τις απόψεις ειδικών.
- Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται, επίσης, ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Τέλος, η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση δύο (2) Παραρτημάτων. Στο Παράρτημα Α περιλαμβάνεται ένα ενδεικτικό ερωτηματολόγιο που μπορεί να διανεμηθεί για την αξιολόγηση των τεσσάρων μεθόδων που ερευνώνται, ενώ στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται μία σειρά ερωτήσεων που αφορούν στην μέθοδο της Φωτογραμμετρίας, η οποία δεν έχει ενταχθεί από την έως τώρα βιβλιογραφία στην συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων παρακολούθησης.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

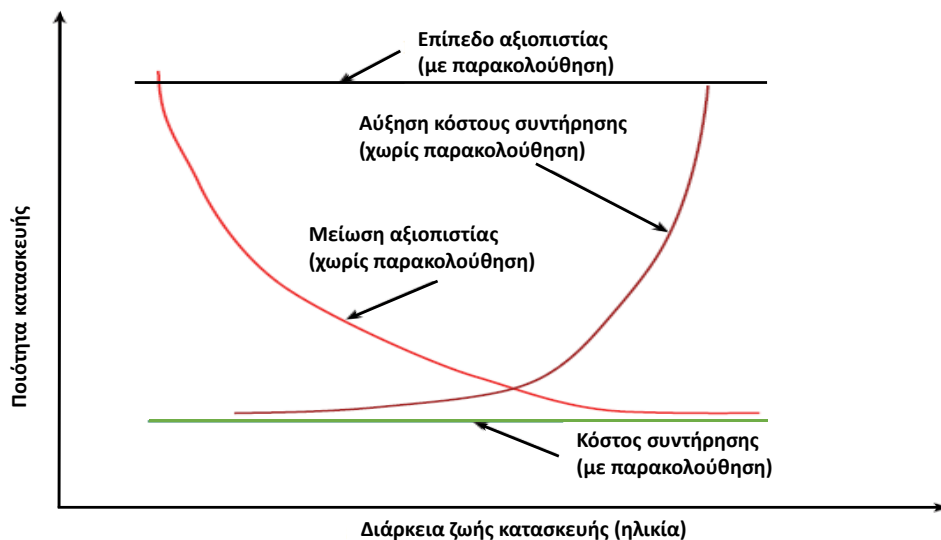
Σημαντικός αριθμός έργων υποδομής που έχουν ανεγερθεί παγκοσμίως και στοχεύουν στην εύρυθμη λειτουργία της κοινωνίας, όπως γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, λιμενικά έργα και φράγματα έχουν υπερβεί τη διάρκεια ζωής για την οποία σχεδιάστηκαν. Ενδεικτικά, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, σύμφωνα με αναφορά που συντάχθηκε το 2017 από το σώμα πολιτικών μηχανικών Αμερικής (ASCE), τα περισσότερα είδη υποδομών της χώρας κατατάσσονται στις τελευταίες κατηγορίες ως προς την κατάσταση της υγείας τους (ASCE, 2017). Στην περίπτωση της Ιαπωνίας (Nohara et al., 2018), εντοπίζονται περίπου 700.000 γέφυρες σε λειτουργία στη χώρα, εκ των οποίων εκτιμάται ότι το 26% αυτών το 2020, καθώς και το 53% αυτών μέχρι το 2030 θα έχει φτάσει σε όριο ηλικίας άνω των 50 ετών. Ειδικότερα, όσον αφορά στα λιμενικά έργα (Kishi et al., 2015), το ποσοστό των κρηπιδωμάτων που επίσης ξεπερνούν τα 50 χρόνια ζωής ήταν 8% το 2013, θα φτάσει το 32% έως το 2023 και θα καταλήξει στο 58% σε περίπου 10 χρόνια. Ίδια κατάσταση εμφανίζεται και στην Ευρώπη, μιας και μεγάλος αριθμός υποδομών σχεδιάστηκε τις δεκαετίες του '50 και του '60, με τις περισσότερες από αυτές να φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Limongelli, et al., 2019). Συνεπώς, γίνεται αντιληπτή η άμεση ανάγκη για έλεγχο των κατασκευών αυτών, ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητά τους και να προστατευθούν ανθρώπινες ζωές.

Μεγάλα, περίπλοκα και δαπανηρά έργα πολιτικού μηχανικού κατασκευάζονται για να έχουν αυξημένη διάρκεια ζωής. Παρόλο που η συνήθης πρακτική είναι ο σχεδιασμός τους να πραγματοποιείται για συνθήκες στις οποίες να είναι λειτουργικά, ο χρόνος ζωής τους παρατείνεται ακόμη και σε συνθήκες που δεν το επιτρέπουν αυτό (Chandrasekaran, 2019). Κατά γενική ομολογία είναι οικονομικά αποδοτικότερη η παράταση της ζωής των υφιστάμενων υποδομών παρά η κατασκευή νέων (Rouhan & Schoefs, 2003). Κατάλληλες ενέργειες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση της κατασκευής (π.χ. αξιοπιστία) και να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής της (Εικόνα 2.1). Η διάρκεια ζωής μιας υποδομής (t_{life}) μπορεί να οριστεί ως ο χρόνος κατά τον οποίο η αξιοπιστία p_s φθάνει σε ένα προκαθορισμένο κατώφλι αξιοπιστίας ($p_{s,thres}$). Με βάση το ακόλουθο διάγραμμα της Εικόνας 2.1 παρατηρείται πως η πρώτη και η δεύτερη ενέργεια συντήρησης οδηγούν σε βελτίωση της αξιοπιστίας κατά $\Delta p_{s,ma1}$ και $\Delta p_{s,ma2}$, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, η επέκταση της διάρκειας ζωής της κατασκευής είναι $(t_{life,ma1} - t_{life,o})$ και $(t_{life,ma2} - t_{life,o})$ αντίστοιχα.



Εικόνα 2.1 Σχέση αξιοπιστίας κατασκευής-χρόνου, με και χωρίς ενέργειες συντήρησης (Frangopol & Kim, 2014).

Η παρακολούθηση των κατασκευών αποτελεί το σημαντικότερο μέσο για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των υποδομών. Μέσω των συστηματικών επιθεωρήσεων καταγράφονται στοιχεία για την κατάσταση της υποδομής, τα οποία βοηθούν στη δημιουργία ενός αποδοτικού πλάνου συντήρησης. Πέραν τούτου, η παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των υποδομών παρουσιάζει οφέλη που σχετίζονται με την αξιοπιστία της κατασκευής και το κόστος συντήρησης. Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα της Εικόνας 2.2, η εφαρμογή τεχνικών εποπτείας σε μια κατασκευή οδηγεί σε αυξημένη αξιοπιστία και σταθερά χαμηλό κόστος συντήρησης. Στον αντίποδα, στην περίπτωση απουσίας παρακολούθησης, η αξιοπιστία μιας υποδομής μειώνεται με το χρόνο, και το κόστος συντήρησής της αυξάνει εκθετικά. Συνεπώς, η παρακολούθηση των έργων επηρεάζει θετικά την ποιότητα και το λειτουργικό κόστος σε βάθος χρόνου.

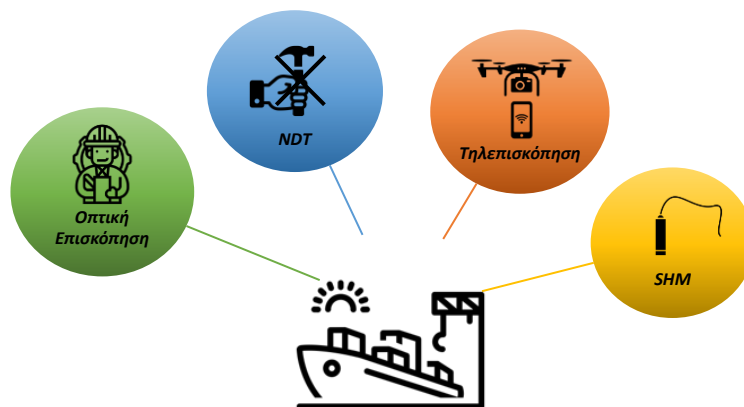


Εικόνα 2.2 Διάγραμμα αξιοπιστίας κατασκευής-χρόνου (Chandrasekaran, 2019).

Σημαντική κατηγορία έργων πολιτικού μηχανικού αποτελούν οι λιμενικές κατασκευές. Γνωρίζοντας πως η διάρκεια ζωής τέτοιων υποδομών κυμαίνεται μεταξύ των 20 και 50 ετών, γίνεται αντιληπτό πως μεγάλο μέρος τους φτάνει στο τέλος της ζωής τους (Moan, 2008, Boégo et al., 2012). Ταυτόχρονα, κατασκευές σαν κι αυτές εδράζονται στις πλέον διαβρωτικές συνθήκες, όπως είναι εκείνες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Συνεπώς, λόγω των επιθετικών συνθηκών λειτουργίας τους θεωρούνται ιδιαίτερα ευαίσθητες σε γρήγορη γήρανση και υποβάθμιση (Stacey et al., 2008). Τα έντονα φαινόμενα που επικρατούν στα θαλάσσια περιβάλλοντα, καθώς και η συστηματική αύξηση της θαλάσσιας στάθμης λόγω της κλιματικής αλλαγής, επιφέρουν μεγαλύτερη επιδείνωση των κατασκευών. Ενδεικτικά, στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα, ο τρόπος με τον οποίο αποτυπώνεται η υποβάθμιση της κατάστασής τους είναι κατά βάση μέσω ρωγμών, διάβρωσης, αποκολλήσεων, αποφλοιώσης και απολέπισης του επιφανειακού σκυροδέματος, βιολογικής προσκόλλησης από θαλάσσιους οργανισμούς και άλλων χημικών επιθέσεων (Chandler, 2014). Οι επιπτώσεις τέτοιων φθορών μπορεί να είναι αισθητικής, λειτουργικής ή δομικής φύσεως, και στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν απώλεια της λειτουργικότητας είτε σε στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής είτε σε όλη την κατασκευή. Η αποτελεσματική παρακολούθηση είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό φθορών και για την έγκαιρη επέμβαση, ώστε να αποτραπεί η εμφάνιση σοβαρότερων προβλημάτων που θα απαιτούσαν πιο δαπανηρές και εκτεταμένες εργασίες επισκευής ή άλλα μέτρα παρέμβασης (O'Byrne et al., 2018).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Η παρακολούθηση των υποδομών σκυροδέματος πραγματοποιείται με ποικίλες μεθόδους στην πάροδο των ετών (Εικόνα 2.3). Η βασικότερη κατηγορία που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα είναι η οπτική επιθεώρηση, η οποία αφορά στην αξιολόγηση μιας υποδομής με τη βοήθεια έμπειρων επιθεωρητών. Λόγω των μειονεκτημάτων που εμφανίζει (βλέπε Ενότητα 2.2.1), έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για ανάπτυξη και εφαρμογή πιο αποτελεσματικών τεχνολογιών. Τέτοιου είδους τεχνολογίες αφορούν σε Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους, σε τεχνικές Τηλεπισκόπησης και σε συστήματα Παρακολούθησης της Υγείας των Υποδομών. Οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι (Non Destructive Testing-NDT) αποτελούν μια κατηγορία με προηγμένες τεχνικές για την παρακολούθηση των υποδομών σκυροδέματος, και των λιμενικών κατασκευών ειδικότερα. Βασίζονται κυρίως σε νόμους της φυσικής και χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ή τον χαρακτηρισμό φθορών σε υποδομές (Ibrahim, 2016). Έχουν πολλές δυνατότητες, όπως το να εκτελούνται σε επαφή με την κατασκευή ή από απόσταση. Στη δεύτερη συνθήκη πραγματοποιείται συνδυασμός των μεθόδων με μη επανδρωμένα οχήματα, κατά βάση εναέρια (Unmanned Aerial Vehicles, UAV). Εφαρμόζονται, επίσης, σε συνεργασία με την κλασσική οπτική επισκόπηση, ώστε να αξιολογηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια φθορές σε κατασκευές. Τελευταία χρησιμοποιούνται και υβριδικά μοντέλα παρακολούθησης, σύμφωνα με τα οποία συνδυάζονται περισσότερες Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι και εντοπίζεται μεγαλύτερο πλήθος φθορών (Abdelkhalak & Zayed, 2020).



Εικόνα 2.3 Κατηγορίες παρακολούθησης λιμενικών υποδομών.

Μια δεύτερη κατηγορία μεθόδων παρακολούθησης αφορά στην Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing). Πρόκειται για τεχνολογίες που αποκτούν δεδομένα μέσω οπτικών ή δορυφορικών συστημάτων, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση από την υποδομή (Li et al., 2008). Σχετίζονται επίσης με τη χρήση μη επανδρωμένων οχημάτων, κυρίως εναέριων (UAV). Από τις εικόνες που απαθανατίζονται δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης της κατασκευής, αλλά και δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου. Σε αντίθεση με αυτή την κατηγορία παρακολούθησης, υπάρχουν και μέθοδοι που βρίσκονται σε διαρκή επαφή με την υποδομή, καταγράφοντας συνεχώς την κατάστασή της. Τέτοιες τεχνικές υπάγονται στην ομάδα των συστημάτων Παρακολούθησης της Υγείας των Υποδομών, γνωστή με τον αγγλικό όρο Structural Health Monitoring (SHM). Η ομάδα αυτή αφορά σε εγκατάσταση μόνιμων αισθητήρων στην υποδομή και σε καταγραφή της απόκρισής της σε συνεχή χρόνο (Ibrahim, 2016). Ανάλογα με το σκοπό ή τα μέσα που διατίθενται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι τέσσερις κατηγορίες για την εποπτεία των λιμενικών υποδομών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια αναλυτική καταγραφή των μεθόδων και των τεχνολογιών που κάθε μια περιλαμβάνει.

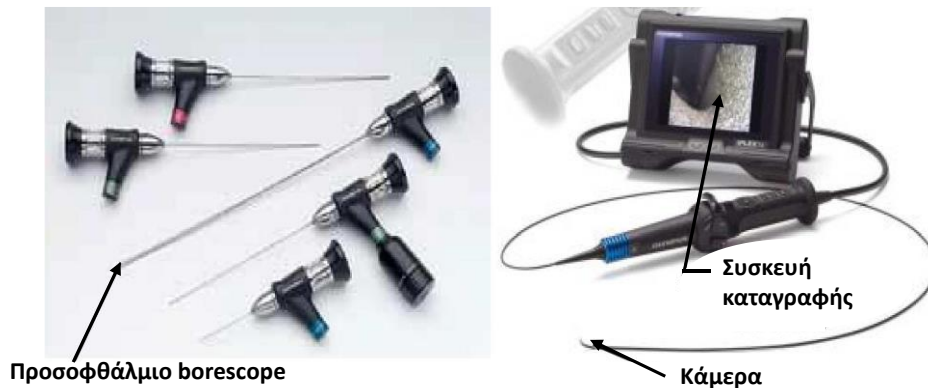
2.2.1 Οπτική Επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση είναι μια από τις πιο ευέλικτες μεθόδους για τον έλεγχο ορατών επιφανειών μιας κατασκευής. Χαρακτηρίζεται ως η βασικότερη μέθοδος εποπτείας των υποδομών (Farhidzadeh et al., 2013, Gucunski et al., 2014, Omar & Nehdi, 2017, Ismail, 2017, Doa'ei & Jahan 2018, Abdelkhalek & Zayed 2019) και χρησιμοποιείται ευρέως για την παρακολούθηση των φθορών σε κατασκευές από σκυρόδεμα (ACI 228.2R-98, 1998, Park et al., 2001, Estes & Frangopol, 2003, Gattulli & Chiaramonte, 2005, Chang et al., 2003, Alani et al., 2014). Θεωρείται ένα από τα πρώτα βήματα για την αξιολόγηση των έργων πολιτικού μηχανικού (Perenchio, 1989) και αποτελεί μια γρήγορη μέθοδο για τον εντοπισμό των εμφανών και επιφανειακών προβλημάτων τους (Huston et al., 2007, Oh et al. 2013a, Ismail, 2017). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την εμπειρία και τις γνώσεις του ερευνητή (Tenžera et al., 2012, Mohan & Roobal, 2018, Doa'ei & Jahan 2018, Abdelkhalek & Zayed 2019, Fujino & Siringoringo 2020), ιδίως σε ό,τι έχει να κάνει με τη δομική συμπεριφορά, τα υλικά και τις μεθόδους κατασκευής (ACI 228.2R-98, 1998). Είναι γρήγορη και φθηνή μέθοδος (Omar & Nehdi 2017), αλλά προσφέρει κατά βάση ποιοτικές πληροφορίες για τις εσωτερικές φθορές (Jahanshahi & Masri, 2013) κι όχι ποσοτικές και λεπτομερείς (Agdas et al., 2016). Πολλές φορές χαρακτηρίζεται ως αδύναμη να εντοπίσει φθορές κάτω από την επιφάνεια της κατασκευής, όπως κενά, εσωτερικές ρωγμές, αποκολλήσεις και διάβρωση οπλισμού (Omar & Nehdi 2017, Omar et al., 2017). Συνήθως, εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό επιφανειακών ρωγμών, απολέπισης και αποφλοίωσης σκυροδέματος, εκτεθειμένου οπλισμού, εισροής υγρασίας και αποκολλήσεων (Alani et al., 2014). Πραγματοποιεί μια ευρεία αξιολόγηση ολόκληρης της υποδομής και δεν περιορίζεται στην ανίχνευση ή εκτίμηση ενός συγκεκριμένου τύπου φθοράς ή ενός στοιχείου της κατασκευής (Omar & Nehdi, 2018). Τέτοιου είδους τεχνικές απαιτούν την άμεση πρόσβαση του επιθεωρητή στην υποδομή (Εικόνα 2.4). Για το λόγο αυτό, πρέπει να διασφαλίζεται ο έλεγχος της κυκλοφορίας κατά την επιθεώρηση, ώστε οι ειδικοί να μπορούν να έχουν ασφαλή προσπέλαση σε αυτή (Omar & Nehdi, 2017).



Εικόνα 2.4 Εφαρμογή μεθόδου οπτικής επιθεώρησης σε προβλήτα (Mizuno, 2018).

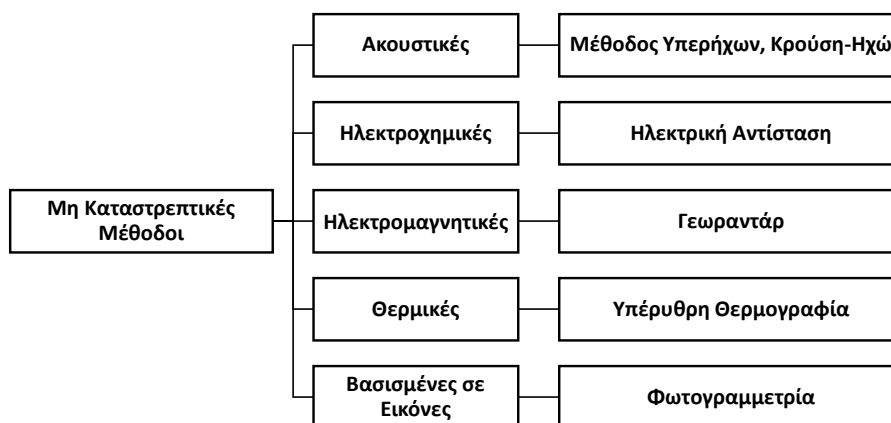
Μερικά από τα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την οπτική επιθεώρηση είναι ο φορητός μεγεθυντικός φακός, το στερεοφωνικό μικροσκόπιο, fiberscopes και borescopes (Εικόνα 2.5 α), τα ενδοσκόπια, τα βιντεοσκόπια (Εικόνα 2.5 β) και οι τηλεοπτικές κάμερες (ACI 228.2R-98, 1998).



Εικόνα 2.5 Εξοπλισμός οπτικής επιθεώρησης: borescopes, βιντεοσκόπιο (Πηγή: www.olympus-ims.com).

2.2.2 Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι (NDT)

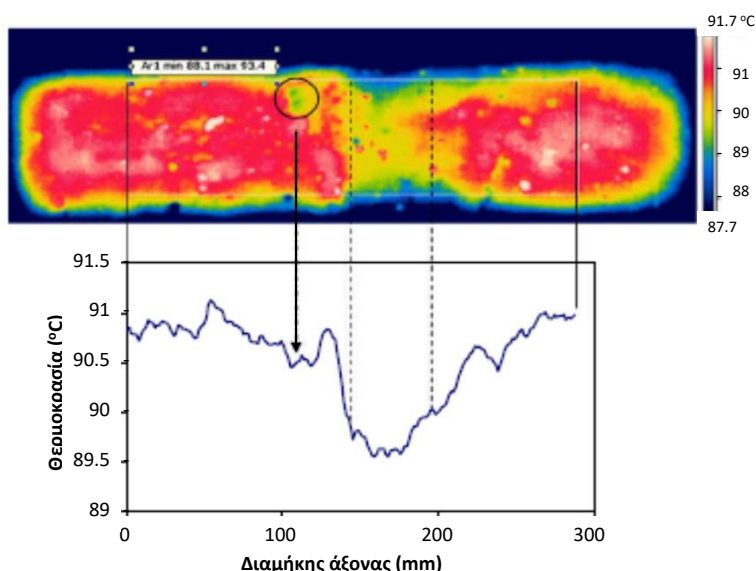
Η διαδικασία παρακολούθησης των υποδομών μπορεί να πραγματοποιηθεί και με διάφορες Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους πέραν της οπτικής επιθεώρησης. Κύριος στόχος τους αποτελεί ο εντοπισμός της παρουσίας φθορών και της σοβαρότητάς τους στο στοιχείο της υποδομής που εμποτεύεται. Οι μέθοδοι αυτές ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες. Σύμφωνα με τους Abdelkhalek και Zayed (2020) υπάρχουν πέντε βασικές ομάδες, οι οποίες αφορούν σε μεθόδους ακουστικές, ηλεκτροχημικές, ηλεκτρομαγνητικές, θερμικές και σε μεθόδους που βασίζονται σε εικόνες (Εικόνα 2.6). Η επιτυχής χρήση των τεχνολογιών αυτών απαιτεί καλή γνώση των αρχών, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών που τις διέπουν (Yehia et al., 2007, Gucunski et al., 2013, Omar & Nehdi, 2018, Abdelkhalek & Zayed, 2019). Αναλυτικότερη περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση έργων σκυροδέματος και, ειδικότερα, λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 2.6 Κατηγοριοποίηση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων και τεχνικές που εμπεριέχουν (Abdelkhalek & Zayed, 2020).

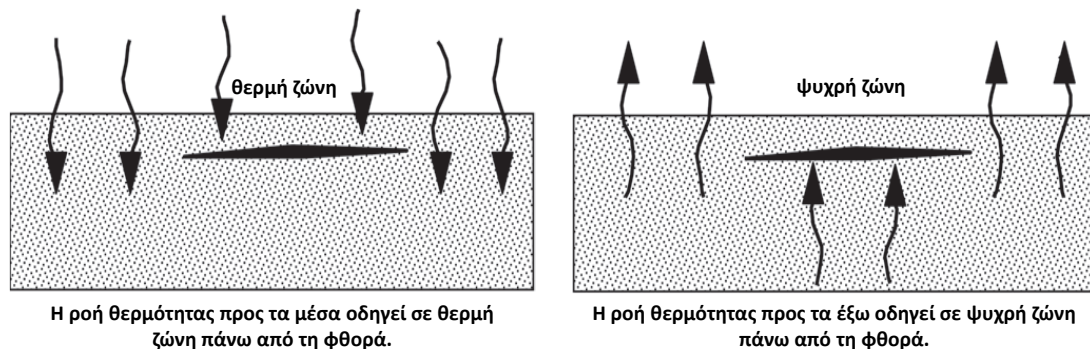
Υπέρυθρη Θερμογραφία (Infrared Thermography)

Η Υπέρυθρη Θερμογραφία (Infrared Thermography, IRT) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την ταχεία επιθεώρηση μιας υποδομής και την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με τη μορφή θερμικών εικόνων (Omar et al., 2018, Bauer et al., 2018). Αυτή η τεχνική βασίζεται σε τρεις αρχές (Abdelkhalik & Zayed, 2019). Πρώτον, όλα τα αντικείμενα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από μηδέν βαθμούς Κελσίου εκπέμπουν ενέργεια ακτινοβολίας (Omar & Nehdi, 2019). Δεύτερον, όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν μια συγκεκριμένη ποσότητα ακτινοβολίας ανάλογα με τη θερμοκρασία τους (Lagüela et al., 2018, Sultan & Washer, 2018, El Masri & Rakha, 2020). Και τρίτον, η παρουσία φθορών στην επιφάνεια ενός αντικειμένου ή και κάτω από αυτή διακόπτει τη ροή θερμότητας στο εσωτερικό του (Wang & Birken, 2014, Kylili et al., 2014, ASCE, 2015, Abu Dabous & Feroz, 2020), επηρεάζοντας έτσι την ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται. Η Υπέρυθρη Θερμογραφία με τη βοήθεια υπέρυθρης κάμερας υψηλής ανάλυσης (φορητής ή εγκατεστημένης σε κατάλληλο όχημα), έγχρωμης βιντεοκάμερας (ASCE, 2015), καθώς και ειδικού λογισμικού καταγραφής, εντοπίζει τις θερμοκρασιακές μεταβολές στην επιθεωρούμενη επιφάνεια (Εικόνα 2.7) και κατ' επέκταση τις φθορές πάνω σε αυτήν ή σε βάθος λίγων εκατοστών (ASTM D4788-03, 2013, Kylili et al., 2014, Liu et al., 2015, Lu et al., 2017, Sultan & Washer, 2018).



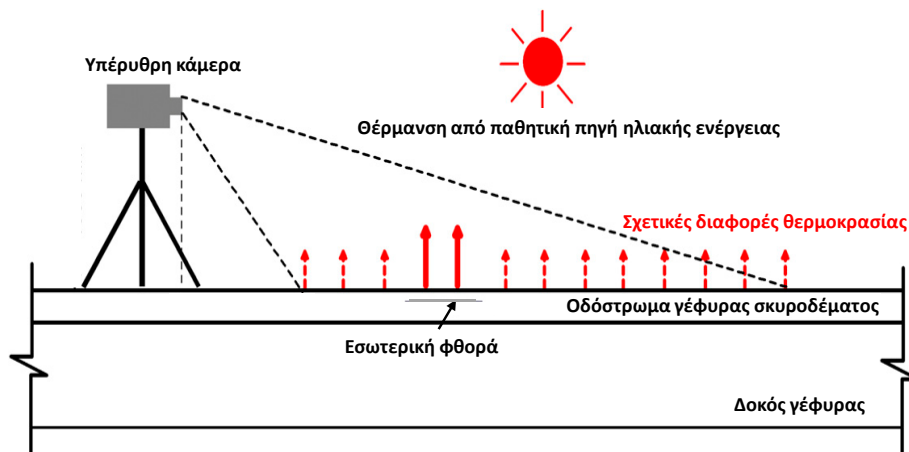
Εικόνα 2.7 Υπέρυθρη εικόνα επιφανειακής κατάστασης δοκιμίου σκυροδέματος και αποτύπωση θερμοκρασιακής διαφοροποίησης σε θέσεις φθοράς (Aggelis et al., 2010).

Το υλικό που πληρώνει την φθαρμένη περιοχή (αέρας ή νερό) έχει διαφορετική θερμική αδράνεια από τις περιοχές όπου το σκυρόδεμα είναι άθικτο (Sultan & Washer, 2018). Συνεπώς, στα σημεία των φθορών παρατηρείται πιο γρήγορη αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας συγκριτικά με το περιβάλλον σκυρόδεμα, σε αντίστοιχες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ASCE, 2015, Omar & Nehdi, 2016, Lin et al., 2018, Abu Dabous & Feroz, 2020). Οι θέσεις αποκολλήσεων, κενών, ρωγμών και άλλου είδους φθορών εμφανίζονται ως «θερμά σημεία», όταν η δοκιμή διεξάγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και ως «κρύα σημεία» κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 2.8 (Maser & Roddis, 1990, Maser, 2008, Sultan & Washer, 2018). Η Υπέρυθρη Θερμογραφία αποτελεί μια μέθοδο που επηρεάζεται αρκετά από τις καιρικές συνθήκες και τις επιμέρους ακτινοβολίες που εκπέμπονται από το περιβάλλον (Washer et al., 2009, ASCE, 2015).



Εικόνα 2.8 Επίδραση εσωτερικής φθοράς στη θερμοκρασία της επιφάνειας κατά τη ροή θερμότητας (ACI 228.2R-13, 2013).

Οι δοκιμές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: την παθητική και την ενεργητική (Rizzo, 2014a). Η παθητική θερμογραφία χρησιμοποιεί φυσική πηγή θερμότητας (ηλιακή ακτινοβολία), για την παραγωγή θερμογραφημάτων. Εφαρμόζεται κυρίως όταν η επιφάνεια που επιθεωρείται δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον και έχει επαρκή διαβάθμιση θερμοκρασίας (Εικόνα 2.9). Η ενεργητική θερμογραφία, από την άλλη, χρησιμοποιεί εξωτερικές πηγές θέρμανσης, όπως οπτική ακτινοβολία (λαμπτήρες, θερμαντήρες, πιστόλια θερμότητας, θερμικά λέιζερ), ρεύματα διόδου και μικροκύματα, και μηχανικά κύματα υπερήχων (Wang et al. 2018, Abu Dabous & Feroz, 2020). Θεωρείται μια αρκετά ασφαλής τεχνική που δεν παρακωλύει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία και την κυκλοφορία στην υποδομή (ASCE, 2015), ιδίως όταν συνδυάζεται με μη επανδρωμένα οχήματα (UAV).

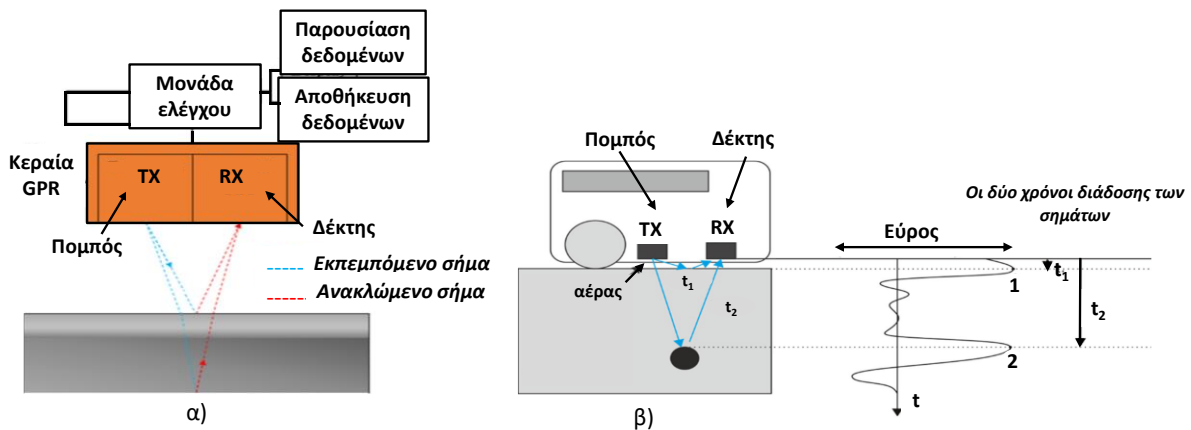


Εικόνα 2.9 Εφαρμογή μεθόδου παθητικής Υπέρυθρης Θερμογραφίας σε οδόστρωμα γέφυρας σκυροδέματος (Oh et al., 2013a).

Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)

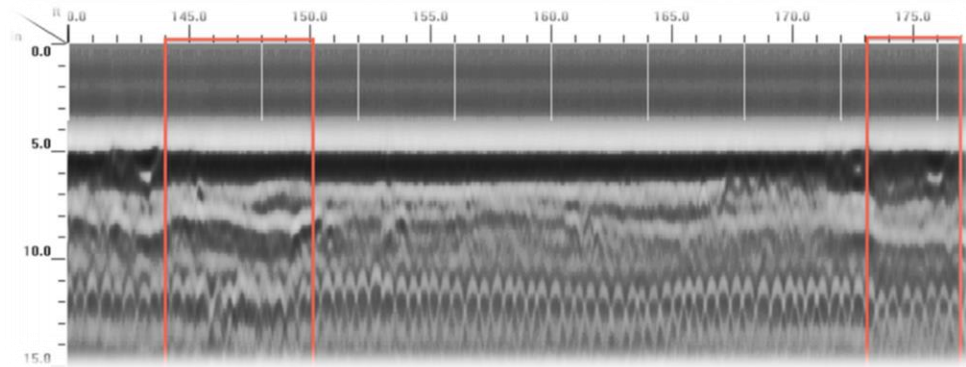
Το Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar, GPR) είναι μια μέθοδος που βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στην αξιολόγηση των εσωτερικών ιδιοτήτων των συγκοινωνιακών υποδομών (Alani et al., 2013, Alani & Tosti, 2018). Η αρχή της βασίζεται στη συλλογή πληροφοριών από το εσωτερικό μιας κατασκευής, μέσω της μετάδοσης και λήψης ηλεκτρομαγνητικών (EM) κυμάτων (Gucunski et al., 2011, Al Qurishee et al., 2019). Τα κύματα ταξιδεύουν μέσα στην υποδομή έως ότου εξασθενήσουν και τελικά αποσβεστούν. Όταν εντοπίζεται μια φυσική ασυνέχεια ή μια διεπαφή μεταξύ δύο υλικών

διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών (ϵ), τα κύματα EM αντανακλώνται εν μέρει στον δέκτη, γεγονός που επιτρέπει την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του εσωτερικού της κατασκευής (Annan, 2002, Khamzin et al., 2017, Lin et al., 2018, Sultan & Washer 2018). Οι φθορές που κατά βάση ανιχνεύονται με αυτή τη μέθοδο είναι η υγρασία, η εισροή χλωριδίων, οι αποκολλήσεις και η διάβρωση χάλυβα (Hugenschmidt & Loser, 2008, Vaghefi et al., 2012, Alani et al., 2013, Abdelkhalik & Zayed 2019, Abu Dabous & Feroz 2020). Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως βρίσκονται στο εύρος ζώνης 1 – 3 GHz (Ibrahim, 2016), κι επιτρέπουν την ανάλυση των φθορών σε κλίμακα εκατοστού (Tosti et al. 2020). Υπάρχουν διαφορετικά συστήματα Γεωραντάρ τα οποία, σύμφωνα με τον τύπο των κεραιών και τη συχνότητά τους, επηρεάζουν την ταχύτητα λειτουργίας, την ανάλυση, τη διεύθυνση και το ρυθμό δειγματοληψίας (Rajewski et al., 2019). Στη μέθοδο αυτή η συχνότητα συσχετίζεται με το βάθος διεύθυνσης του κύματος. Έτσι, παλμοί υψηλότερης συχνότητας επιτυγχάνουν μικρότερη διεύθυνση, αλλά καλύτερη ανάλυση, ενώ πιο ισχυροί παλμοί φτάνουν σε μεγαλύτερα βάθη με χαμηλότερη ανάλυση (Varnavina et al., 2015, Solla et al., 2021).



Εικόνα 2.10 Μέθοδος Γεωραντάρ α) σε απόσταση από την επιφάνεια της κατασκευής (Khamzin et al., 2017), β) σε επαφή με υποδομή οπλισμένου σκυροδέματος και αντίστοιχη έξοδος σήματος (Tosti & Ferrante, 2020).

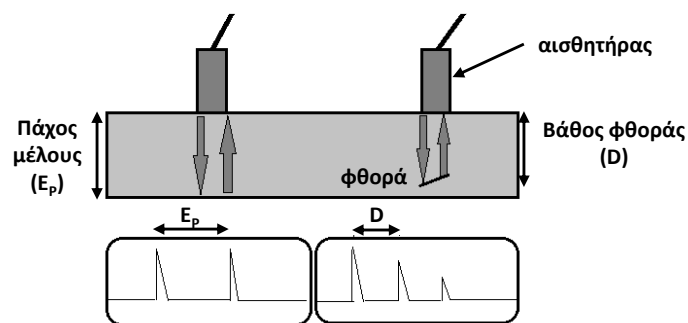
Ένα σύστημα Γεωραντάρ αποτελείται συνήθως από μονάδα ελέγχου, κεραία ραντάρ και οθόνη (ASCE, 2015, Erhimona & Andrew, 2019). Ο εξοπλισμός μπορεί να είναι τοποθετημένος σε κινητό όχημα και να αναρτάται σε μια ορισμένη απόσταση από την επιθεωρούμενη επιφάνεια ή να βρίσκεται σε επαφή με αυτή (Εικόνα 2.10) (Gucunski et al., 2011, Varnavina et al., 2015, Diamanti et al., 2017). Κατά την εφαρμογή του, η μονάδα ελέγχου παράγει έναν παλμό ραντάρ και τον στέλνει μέσω ενός καλωδίου στην κεραία, η οποία στη συνέχεια τον μεταδίδει στην επιφάνεια της υποδομής. Ο ληφθείς παλμός αποστέλλεται πίσω στη μονάδα ελέγχου για επεξεργασία και αποθήκευση (Abdelkhalik & Zayed 2019, Solla et al., 2021). Η μονάδα προβολής (συσκευή εγγραφής βίντεο ή γραφήματος) παρουσιάζει τα δεδομένα. Η ανακλώμενη ενέργεια λαμβάνεται από τον μοροτροπέα, ενισχύεται και καταγράφεται. Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός επαναλαμβάνεται με ταχύ ρυθμό και η προκύπτουσα ροή δεδομένων ραντάρ δημιουργεί μια συνεχή καταγραφή (Εικόνα 2.11) του εσωτερικού της κατασκευής (ASCE, 2015).



Εικόνα 2.11 Εσωτερική απεικόνιση της υποδομής και θέσεις φθορών (Abu Dabous & Feroz 2020).

Δοκιμή Υπερήχων (Ultrasonic Testing)

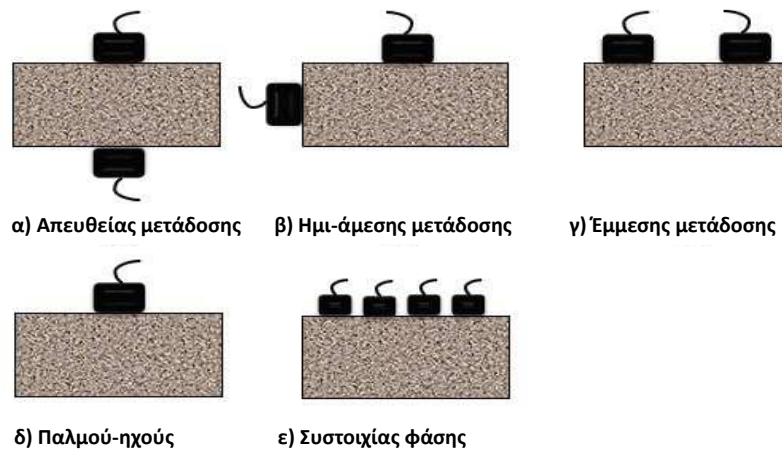
Η μέθοδος των Υπερήχων (Ultrasonic Testing, UT) αποτελεί μια τεχνική που βασίζεται στην δημιουργία, διάδοση και ανάκλαση μηχανικών κυμάτων, σε υπερηχητικές συχνότητες, μέσα σε μια υποδομή σκυροδέματος (McCann & Forde, 2001, O'Byrne et al., 2018, Al Qurishee et al., 2019, Tosti & Ferrante, 2020). Σκοπός αποτελεί η ανίχνευση φθορών που υφίστανται σε αγώγιμα στον ήχο υλικά (Dwivedi et al., 2018, Kot et al., 2021). Η αρχή της βασίζεται στην μετάδοση ηχητικών κυμάτων μέσω του υπό εξέταση υλικού, σε υψηλές συχνότητες, άνω των 20 kHz (Tosti & Ferrante, 2020, Al-Marri et al., 2020, Alhaimi et al., 2020). Η πηγή των κυμάτων είναι ο ίδιος ο αισθητήρας-ηλεκτρονικός μορφοτροπέας που εφαρμόζεται στην υποδομή. Τα κύματα που διαδίδονται, όταν εντοπίσουν ρωγμές, αποκολλήσεις ή άλλου είδους φθορές, ανακλώνται (Εικόνα 2.15) και αποστέλλονται πίσω στους αισθητήρες. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της θέσης, του μεγέθους και του προσανατολισμού της φθοράς (Lu, 2010). Η παρουσίαση της κατάστασης της υποδομής πραγματοποιείται μέσω μιας συνδεδεμένης οθόνης ελέγχου (Lauritzen et al., 2019). Ένα κλασικό σύστημα παρακολούθησης μέσω υπερήχων περιλαμβάνει ένα κύκλωμα πομπού και δέκτη, ένα εργαλείο μορφοτροπέα και συσκευές οθόνης (Gholizadeh, 2016).



Εικόνα 2.12 Θεμελιώδης αρχή Μεθόδου Υπερήχων (Sharma & Sinha, 2018).

Δύο συμβατικές προσεγγίσεις της Δοκιμής Υπερήχων που χρησιμοποιούνται κατά βάση στην παρακολούθηση των υποδομών είναι η μέθοδος Παλμού-Ηχούς (Ultrasonic Pulse Echo) και η μέθοδος της Απευθείας Μετάδοσης (Through Transmission Method) (ASCE, 2015, Gholizadeh, 2016). Στην πρώτη, ένας και μοναδικός μορφοτροπέας στέλνει και δέχεται τα ελαστικά κύματα, ενώ στη μέθοδο της μετάδοσης, δύο αξονικά ευθυγραμμισμένοι μετατροπείς μετρούν το βαθμό εξασθένησης του σήματος μέσω του στοιχείου της κατασκευής (Ibrahim, 2016). Στην περίπτωση όπου δεν είναι

δυνατή η πρόσβαση από δύο αντίθετες πλευρές της κατασκευής, προτιμώνται δύο υποκατηγορίες της μεθόδου, η ημι-άμεσης μετάδοσης (semi-direct transmission) και η έμμεσης μετάδοσης (indirect transmission) (Khanal, 2020). Μια πιο προηγμένη τεχνική της μεθόδου των υπερήχων αποτελεί η μέθοδος Συστοιχίας Φάσης (Phased Array Ultrasonic Technique), η οποία έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών Δοκιμών Υπερήχων (ASCE, 2015, Ibrahim, 2016, Chauveau, 2018). Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση της μεθόδου αφορά στον τρόπο εφαρμογής των αισθητήρων στην κατασκευή. Υπάρχει η δυνατότητα επαφής των μορφοτροπέων με την υποδομή, καθώς και μη επαφής με αυτή (Marcantonio et al., 2019). Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται ένας συζευκτής μεταξύ αισθητήρα και κατασκευής, ώστε να ενισχυθεί το ηχητικό σήμα και να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ως συζευκτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα τζελ, νερό και, πιο συχνά, ο αέρας (air coupled UT) (Ibrahim, 2016, Vössing et al., 2020, Kot et al., 2021). Μια σχηματική αναπαράσταση όλων των τύπων των υπερηχητικών τεχνικών αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.16).

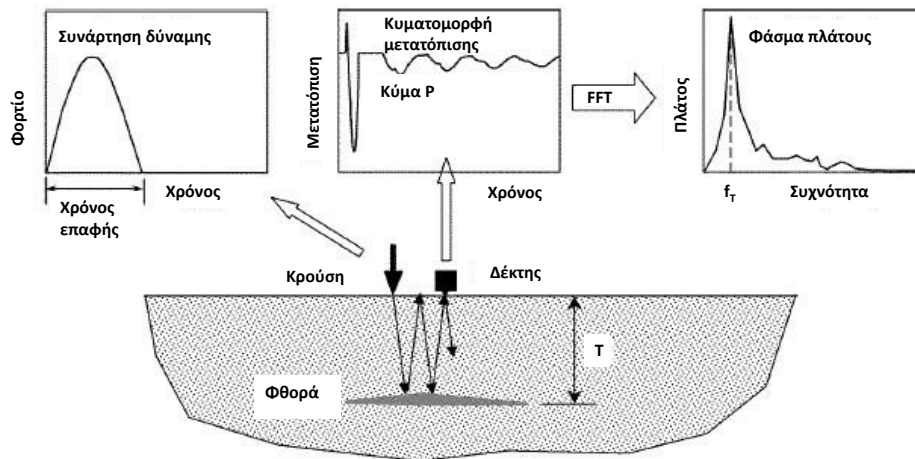


Εικόνα 2.13 Κατηγοριοποίηση τεχνικών Δοκιμής Υπερήχων (Khanal, 2020).

Δοκιμή Κρούση-Ηχώ (Impact-Echo Method)

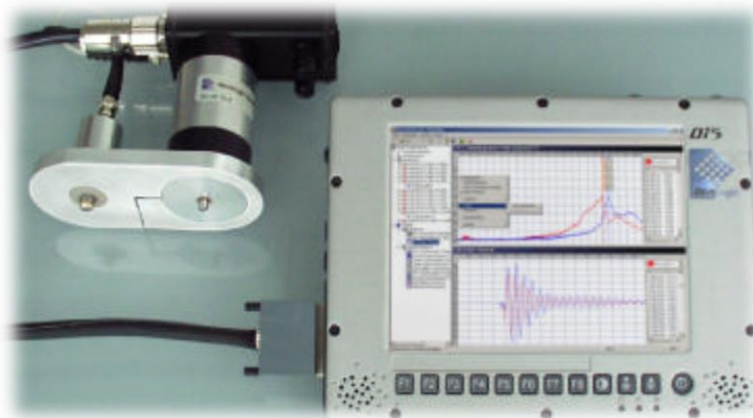
Η μη καταστρεπτική δοκιμή Κρούση-Ηχώ (Impact-Echo, IE), είναι μια μέθοδος κυμάτων πίεσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πάχους των μελών μιας υποδομής και για την ανίχνευση των φθορών στο εσωτερικό τους (Sansalone, 1997, Sansalone & Streett, 1997, McCann & Forde, 2001, Tawhed & Gassman, 2002, ASCE, 2015, Rehman et al., 2016, Al Qurishee et al., 2019). Η θεμελιώδης αρχή της συνίσταται στην παραγωγή και διάδοση ενός ελαστικού κύματος (κύμα P) στο υπό εξέταση μέλος, χτυπώντας την επιφάνειά του με έναν διεγέρτη που έχει τη μορφή σφυριού ή χαλύβδινου σφαιριδίου (McCann & Forde, 2001, Wiggenhauser, 2009, Matsuyama et al., 2010, Rehman et al., 2016, Abdelkhalek & Zayed, 2019, Al Qurishee et al., 2019). Η συχνότητα των παραγόμενων δονήσεων κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά εύρη, φτάνοντας μέχρι μερικές δεκάδες kHz (Ohtsu & Watanabe, 2002, Schubert & Köhler, 2008, Gucunski et al., 2011, Hoła et al., 2015). Ένας αισθητήρας (επιταχυνσιόμετρο) είναι τοποθετημένος δίπλα στη θέση κρούσης για να αποτυπώσει την ενέργεια που ανακλάται από εσωτερικές φθορές ή εξωτερικά όρια της υποδομής (McCann & Forde, 2001, Schubert & Köhler, 2008, Matsuyama et al., 2010, Al Qurishee et al., 2019). Δεδομένου ότι τα ανακλώμενα σήματα αναγνωρίζονται ευκολότερα στο φάσμα των συχνοτήτων, η ληφθείσα ενέργεια που είναι καταγεγραμμένη στο πεδίο του χρόνου αλλάζει μορφή μέσω του μετασχηματισμού Fast Fourier Transform (FFT), ώστε να αναλυθεί στο πεδίο των συχνοτήτων (McCann & Forde, 2001,

Schubert & Köhler, 2008, Hoła et al., 2015, Rehman et al., 2016, Al Qurishee et al., 2019). Η συχνότητα που εμφανίζει το μέγιστο πλάτος αποτελεί την κυρίαρχη συχνότητα συντονισμού στην κυματομορφή, και είναι γνωστή ως συχνότητα πάχους (f_T), μιας και αντιπροσωπεύει το πάχος του συμπαγούς μέρους της υποδομής (McCann & Forde, 2001, Wiggenhauser, 2009). Επιπρόσθετες αιχμές στο φάσμα, μικρότερης τιμής από την επικρατούσα, υποδηλώνουν την παρουσία υποκείμενων φθορών ή την μεταβολή του πάχους της κατασκευής (Sansalone & Streett, 1997, Schubert & Köhler, 2008, Oh et al., 2013b). Ο τύπος των φθορών σκυροδέματος μπορεί να ανιχνευθεί σύμφωνα με την ώρα άφιξης και το πλάτος του ανακλώμενου κύματος (Abdelkhalik & Zayed, 2019). Μια εποπτική περιγραφή της μεθόδου παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.14 Μέθοδος Κρούση-Ηχώ (Carino, 2015).

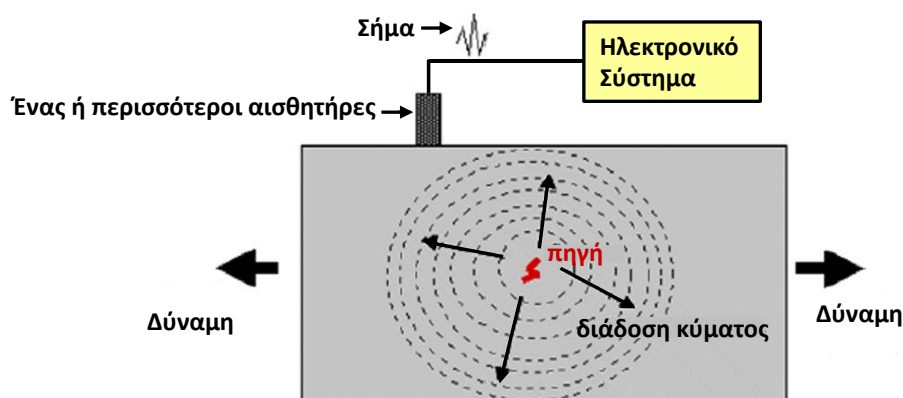
Ο εξοπλισμός της δοκιμής αυτής αποτελείται από μια μονάδα χειρός για την εκτέλεση της κρούσης, έναν μορφοτροπέα λήψης που δέχεται τα ανακλώμενα κύματα κι ένα σύστημα υπολογιστή (Εικόνα 2.13) για την επεξεργασία και παρουσίαση των δεδομένων (ASTM, 2010). Πρόκειται για μια σημειακή μέθοδο που απαιτεί πρόσβαση μόνο από μία επιφάνεια του υπό εξέταση μέλους (Sansalone & Streett, 1997, McCann & Forde, 2001), και εφαρμόζεται κυρίως σε κατασκευές τύπου πλάκας (Pessiki & Carino, 1988, Scott et al., 2003, Oh et al., 2013b). Ωστόσο, η συλλογή δεδομένων είναι μια σχετικά αργή διαδικασία, μιας και απαιτεί την εξέταση ενός πυκνού πλέγματος σημείων για αξιόπιστα αποτελέσματα, επιφέροντας οχλήσεις της κυκλοφορίας στην υποδομή (Gucunski et al., 2011).



Εικόνα 2.15 Συσκευή κρούσης και αισθητήρας (αριστερά) και μονάδα ελέγχου (δεξιά) (Grosse et al., 2005).

Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission)

Η μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission, AE) βασίζεται σε παροδικά ελαστικά κύματα που γεννώνται από την υπό παρακολούθηση υποδομή, μέσω ταχείας απελευθέρωσης ενέργειας (Bohse, 2013, Rehman et al., 2016, ASCE, 2015, Kot et al., 2021). Κάθε φορά που δημιουργείται ρωγμή, φθορά ή ελάττωμα στα εσωτερικά στρώματα της κατασκευής, απελευθερώνεται μια έκρηξη ενέργειας (Nair & Cai, 2010, Rizzo & Zhu, 2010, Arumugam et al., 2011, Gholizadeh et al., 2015, Chandrasekaran, 2019), η οποία εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας (Nair & Cai, 2010). Τα παραγόμενα κύματα ταξιδεύουν μέσα στο αντικείμενο και στη συνέχεια λαμβάνονται από μορφοτροπείς και αισθητήρες, οι οποίοι τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2.16 (Nair & Cai, 2010, Rizzo & Zhu, 2010, Hoult & Soga, 2014, ASCE, 2015, Kot et al., 2021). Ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων θεωρείται πολύ σημαντικός, μιας και υποδηλώνει την παρουσία καθώς και την πιθανή θέση των φθορών στο εσωτερικό των υποδομών (ACI 228.2R-98, 1998, Summerscales, 2013). Μεγάλοι χρόνοι σημαίνουν πως το σήμα πιθανώς διαθλάστηκε κατά μήκος της φθοράς (ACI 228.2R-98, 1998). Για καλύτερα δεδομένα απαιτείται μια σχετική ενίσχυση του σήματος αυτού, καθώς επηρεάζεται άμεσα από παρασκηνιακούς θορύβους (Hoult & Soga, 2014, Lee et al., 2014, ASCE, 2015, Ibrahim, 2016, Votsis et al., 2018, Kot et al., 2021).



Εικόνα 2.16 Βασικές αρχές μεθόδου Ακουστικών Εκπομπών (Nair & Cai, 2010).

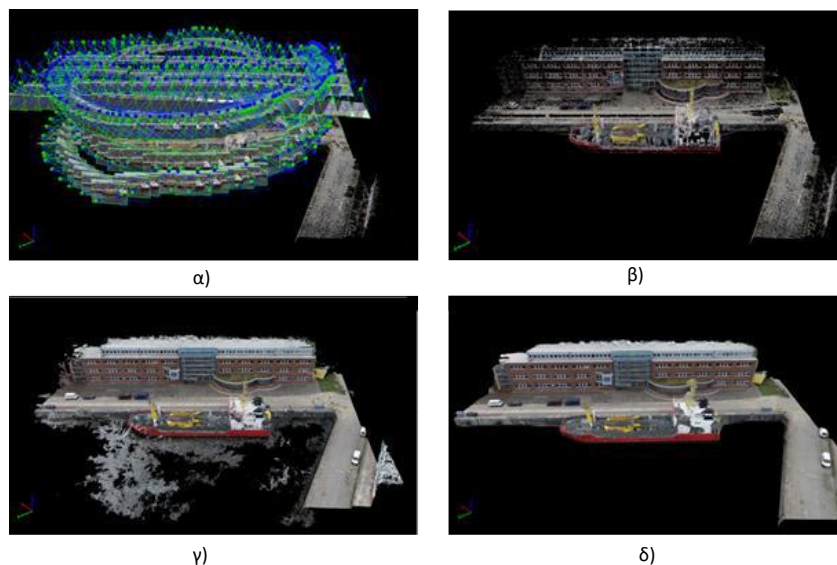
Πρόκειται για μια παθητική τεχνική, καθώς το σήμα που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες δημιουργείται από το υπό εξέταση υλικό και όχι από κάποια εξωτερική πηγή (Rizzo & Zhu, 2010, Lee et al., 2014, Ibrahim, 2016). Οι αισθητήρες βρίσκονται συνήθως μόνιμα τοποθετημένοι στην υποδομή και μπορούν να εφαρμοστούν για την καθολική παρακολούθηση της κατασκευής, αλλά και τοπικά, εξετάζοντας συγκεκριμένες ζώνες φθορών (Carlos et al., 2000, Anastasopoulos et al., 2009, Rizzo, 2014b). Η μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής πραγματοποιεί αξιολόγηση της υποδομής σε πραγματικό χρόνο (Nair & Cai, 2010, Rizzo, 2014b, ASCE, 2015) και μπορεί να συνδυαστεί με άλλες Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους για μεγαλύτερη αξιοπιστία (ASCE, 2015, Votsis et al., 2018). Η τεχνική των Υπερήχων αποτελεί την βασικότερη επιλογή, δημιουργώντας μια υβριδική έκδοση της μεθόδου, την Acousto-Ultrasonic (Vary & Bowles, 1979, Schroeder et al., 2002).

2.2.3 Τεχνικές Τηλεπισκόπησης

Οι μέθοδοι Τηλεπισκόπησης παρέχουν πληροφορίες για την υποδομή με βάση την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από αυτήν. Εφαρμόζονται συνήθως από απόσταση και συλλέγουν δεδομένα, όπως επιφανειακές φθορές, σε μορφή εικόνων. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία εξάγουν χωρικές πληροφορίες για την υπό εξέταση κατασκευή. Ένα σύστημα τηλεπισκόπησης χρειάζεται μια πηγή φωτός, όπως είναι η ηλιακή ενέργεια, έναν αισθητήρα τοποθετημένο σε εναέρια πλατφόρμα (π.χ. κάμερα) και μια μονάδα καταγραφής (Read & Torrado, 2009). Κάποιες από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες της περιγράφονται παρακάτω.

Φωτογραμμετρία

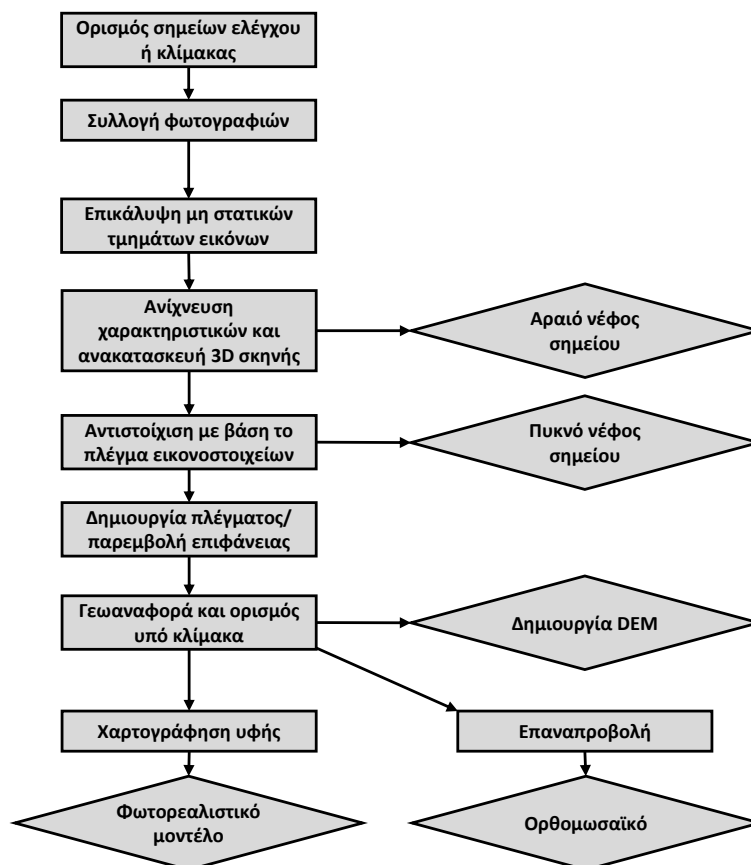
Η Φωτογραμμετρία είναι «η επιστήμη ή η τέχνη του να αντλαμβάνεται κάποιος τις φυσικές διαστάσεις των αντικειμένων από μετρήσεις πάνω σε φωτογραφίες των αντικειμένων». Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί κάμερα για τη λήψη φωτογραφιών της υπό εξέταση κατασκευής από διαφορετικές γωνίες και με τουλάχιστον 50% – 60% αλληλοεπικάλυψη (McGlone et al., 2004, Vaghefi et al., 2012, Chiu et al., 2017). Σκοπός της είναι η συλλογή και η επεξεργασία δισδιάστατων φωτογραφιών, ώστε να εντοπιστούν τυχούσες φθορές επιφανειακά στην κατασκευή (Habeenzu et al., 2020), καθώς και η δημιουργία ορθοφωτοχαρτών (Aber, 2010, Henriques & Roque, 2015, Omar & Nehdi, 2017) και η ανακατασκευή ενός τρισδιάστατου φωτορεαλιστικού μοντέλου της υποδομής (Jiang et al., 2008, Harris et al., 2016, Habeenzu et al., 2020). Χαρακτηριστικό παράδειγμα δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου ενός λιμένα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17 Διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατου μοντέλου λιμένα από τη συλλογή φωτογραφιών (σχήμα α) έως την ανακατασκευή φωτορεαλιστικού μοντέλου (σχήμα δ) (Stein, 2019).

Οι φωτογραφίες που λαμβάνονται παρουσιάζουν διάφορες παραμορφώσεις που οφείλονται στο είδη του φακού και στη γεωμετρία της λήψης. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η αναγωγή τους σε ένα ορθό προβολικό σύστημα. Στη συνέχεια, με κατάλληλη συρραφή των επεξεργασμένων αυτών εικόνων προκύπτουν ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες της υποδομής (Aber, 2010, Henriques & Roque, 2015). Για την διαμόρφωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου, απαιτείται η χρήση ειδικού τρισδιάστατου λογισμικού, το οποίο δημιουργεί 3D σημεία μέσω των 2D εικόνων. Τα επαγόμενα

αυτά σημεία είναι γνωστά και ως «νέφη σημείων», και προκύπτουν μέσα από ζεύγη αλληλεπικαλυπτόμενων εικόνων καταγεγραμμένων από διαφορετικές γωνίες (Henriques & Roque, 2015, Khaloo et al., 2017, Perry et al., 2020). Ωστόσο, δεν είναι γεωαναφερμένα ως προς κάποιο επίπεδο. Με τη χρήση πληροφοριών που αφορούν στις πραγματικές συντεταγμένες των σημείων και έχουν ληφθεί στο πεδίο μέσω GPS (Global Positioning System), επιτυγχάνεται η μετατροπή κάθε νέφους σημείων σε πραγματικές και γεωαναφερμένες συντεταγμένες (Atasoy et al., 2006, Harris et al., 2016, Perry et al., 2020). Συνθέτοντας τα επιμέρους αυτά σημεία είναι πλέον εφικτή η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου της υπό εξέταση υποδομής, ο εντοπισμός των φθορών πάνω σε αυτό, καθώς και η συλλογή πληροφοριών βάθους και ύψους (Harris et al., 2016, Perry et al., 2020). Μια διαγραμματική παρουσίαση των σταδίων της μεθόδου φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18 Εκτεταμένο διάγραμμα ροής σταδίων εφαρμογής της Φωτογραμμετρίας (Bemis et al., 2014).

Έχουν καταγραφεί δύο βασικοί τύποι Φωτογραμμετρίας η επίγεια και η εναέρια (Jiang et al., 2008, Aber, 2010). Η επίγεια Φωτογραμμετρία ασχολείται με αποστάσεις αντικειμένων μέχρι περίπου 200 m και είναι επίσης γνωστή ως Φωτογραμμετρία Μικρής Εμβέλειας (Close Range Photogrammetry, CRP) (Luhmann et al., 2007, Aber, 2010). Η εναέρια πραγματοποιείται με τη βοήθεια κάμερας που μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε μια εναέρια ή σε μια δορυφορική πλατφόρμα, επανδρωμένη ή όχι, ώστε να συλλέγει δεδομένα σε ταχύτερο χρόνο (Vaghefi et al., 2012, Kaliński & Buchholz, 2015, Pastucha, 2016, Hiasa et al., 2018). Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) έχουν συμβάλει αρκετά στην εξέλιξη της μεθόδου, καθώς διευκολύνουν την παρακολούθηση δύσβατων υποδομών, χωρίς να παρακωλύουν την εύρυθμη λειτουργία τους, αλλά μειώνουν εξίσου το χρόνο συλλογής δεδομένων και τη δουλειά γραφείου (Abu Dabous & Feroz, 2020, Perry et al., 2020).

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που η Φωτογραμμετρία είναι άμεσα συνυφασμένη με μεθόδους Τηλεπισκόπησης, πολλές φορές θεωρείται ως Μη Καταστρεπτική Μέθοδος (Εικόνα 2.6). Πράγματι, εντάσσεται σε πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών στην κατηγορία αυτή, μιας και αφορά σε τεχνολογία που δεν βλάπτει την κατασκευή (Abdelkhalek & Zayed, 2020, El Masri & Rakha, 2020, Kot et al., 2021). Επομένως, και στην παρούσα εργασία θα αντιμετωπίζεται στο εξής και ως Μη Καταστρεπτική Μέθοδος.

Τεχνική Ανίχνευσης Φωτός και Εύρους (*Light Detection And Ranging, LiDAR*)

Το LiDAR (Light Detection And Ranging) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης προς το εξεταζόμενο αντικείμενο, σύμφωνα με τον χρόνο και την ταχύτητα που κάνει να ταξιδέψει ένας παλμός λέιζερ από τον αισθητήρα μέχρι το σημείο της κατασκευής (Vosselman & Maas, 2010, Shakhathreh et al., 2019, El Masri & Rakha, 2020, Perry et al., 2020). Αποτελεί μια συνήθη τεχνολογία για την παρακολούθηση τμήματος της υποδομής ή και ολόκληρης της κατασκευής (Chen et al., 2010, Perry et al., 2020). Σκοπός της είναι ο ορισμός των σημείων που επιθεωρούνται σε έναν τρισδιάστατο χώρο, ώστε να δημιουργηθεί ένα 3D μοντέλο της υποδομής (Εικόνα 2.19 β) και του περιβάλλοντα χώρου (Vaghefi et al., 2012, Perry et al., 2020). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω σαρωτή LiDAR που πραγματοποιεί σαρώσεις χιλιάδες φορές ανά δευτερόλεπτο, δημιουργώντας ένα σύνολο σημείων γνωστό ως «νέφος σημείων» (Riveiro & Solla, 2016, Harry et al., 2016, Perry et al., 2020). Ένα τρισδιάστατο μοντέλο υψηλής ανάλυσης της επιφάνειας επιτρέπει την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με επιφανειακές φθορές, όπως ρωγμές, αποφλοιώση και απολέπιση σκυροδέματος, αλλά και εσωτερικών αποκολλήσεων που εκφράζονται ως επιφανειακές ρωγμές (Harry et al., 2016).

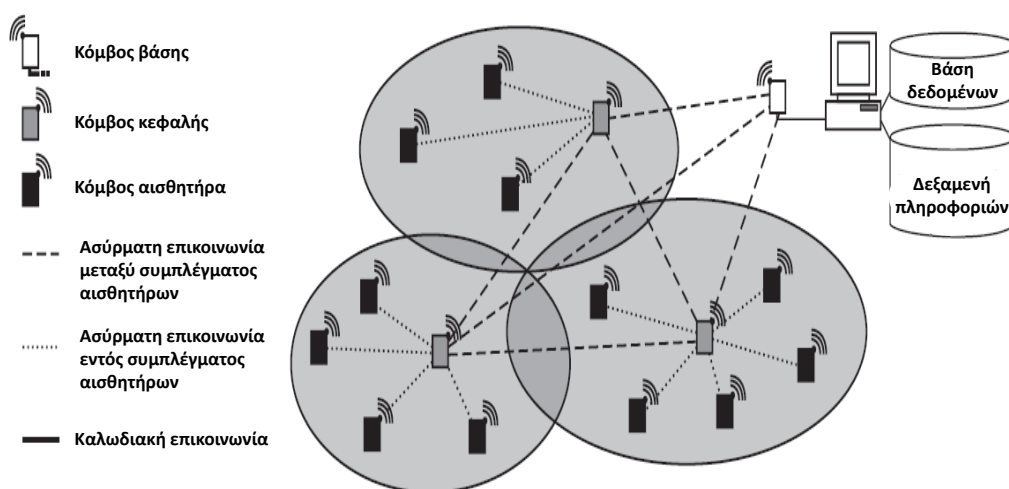


Εικόνα 2.19 Μέθοδος LiDAR: επίγειος εξοπλισμός αριστερά και 3D μοντέλο γέφυρας δεξιά (Abu Dabous & Feroz 2020).

Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες, την επίγεια σάρωση λέιζερ (Terrestrial Laser Scanning, TLS) και εναέρια/αερομεταφερόμενη σάρωση λέιζερ (Aerial Laser Scanning, ALS) (Vaghefi et al., 2012, Harry et al., 2016). Τα στατικά επίγεια συστήματα χρησιμοποιούν ένα τοπογραφικό τρίποδο για την τοποθέτηση του LiDAR, ενώ τα κινητά συστήματα είναι συνήθως ενσωματωμένα σε ερευνητικά οχήματα, όπως φορτηγά ή σκάφη (Puentes et al., 2014, Harry et al., 2016). Τα κινητά συστήματα LiDAR δείχνουν υψηλότερη παραγωγικότητα, μειώνοντας τον χρόνο έρευνας πεδίου και ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους ασφάλειας για τους χειριστές που συλλέγουν τα δεδομένα (Petrie, 2010, Pu et al., 2011). Το επίγειο LiDAR (Εικόνα 2.19) έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση φυσικών φθορών σε κατασκευές (Olsen et al., 2010), αλλά και ρωγμών μέσω επεξεργασίας των εικόνων που έχουν προκύψει από δεδομένα επίγειας σάρωσης λέιζερ (Cho et al., 2018). Ένα τυπικό σύστημα LiDAR περιλαμβάνει έναν δέκτη, έναν πομπό και μια μονάδα συστήματος ελέγχου (Puentes et al., 2014).

2.2.4 Παρακολούθηση της Υγείας των Υποδομών (SHM)

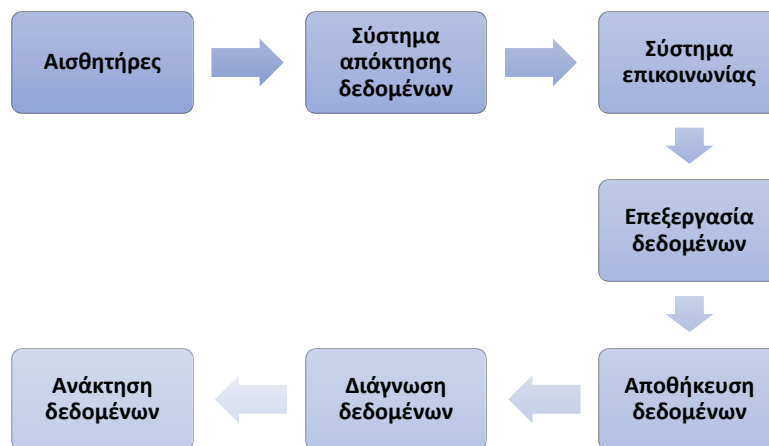
Σημαντική κατηγορία στην παρακολούθηση των κατασκευών σκυροδέματος αποτελεί και η Παρακολούθηση της Υγείας των Υποδομών (SHM). Το SHM αναλύεται σε τρεις βασικές συνιστώσες, την αξιολόγηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατασκευής. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει την εκτίμηση των πραγματικών συνθηκών και την ικανότητα της κατασκευής να μεταφέρει φορτία. Η διάγνωση είναι ένα σημαντικό μέρος του SHM, το οποίο εμπεριέχει την ενσωμάτωση διαφόρων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις, κι έχουν δυνατότητες επεξεργασίας στο ίδιο το σύστημα SHM. Τέλος, η παρακολούθηση ασχολείται με την εποπτεία των υποδομών σε συνεχή βάση χρησιμοποιώντας αισθητήρες ή ηλεκτρονικές μικροσυσκευές. Τέτοιου είδους έλεγχοι πραγματοποιούνται προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργικότητα της υποδομής και στοχεύουν στην περιοδική και προληπτική συντήρησή τους (Chandrasekaran, 2019).



Εικόνα 2.20 Ιεραρχική αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης με αισθητήρες (Law et al., 2014).

Τα συστήματα παρακολούθησης SHM αναπτύσσονται για τη συλλογή μετρήσεων σχετικά με την απόκριση μιας κατασκευής υπό την επίδραση περιβαλλοντικών ή/και εξωτερικών διαταραχών, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση της υγείας της (Εικόνα 2.20). Οι αισθητήρες αποτελούν το βασικό εργαλείο για τη λήψη των δεδομένων αυτών και την κατανόηση της κατάστασης της υποδομής. Τοποθετούνται πάνω ή αρκετά κοντά σε μια υποδομή με σκοπό τη συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων απόκρισης (π.χ. καταπόνηση, επιτάχυνση και μετατόπιση) καθώς και περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως θερμοκρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου. Ανάλογα με τον τύπο της υποδομής, την έκταση των προς μέτρηση πληροφοριών και τον σκοπό παρακολούθησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές διαμορφώσεις και τύποι αισθητήρων, εξοπλισμοί μέτρησης, τρόποι επικοινωνίας δεδομένων και συσκευές αποθήκευσης. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει παρατηρηθεί τεράστια ανάπτυξη στα συστήματα ασύρματων αισθητήρων και τεχνολογιών επικοινωνίας. Ενσωματωμένοι μικροελεγκτές, ασύρματοι αισθητήρες και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε συστήματα SHM. Η τεχνολογία ασύρματων αισθητήρων όχι μόνο εξαλείφει τα καλώδια και το σχετικό κόστος υλικού και εργασίας, αλλά επιτρέπει και τις ευέλικτες παραμετροποιήσεις του συστήματος. Ωστόσο, εμφανίζουν και αρκετούς περιορισμούς κατά την εφαρμογή τους, όπως το εύρος επικοινωνίας, η πιθανή απώλεια δεδομένων και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας λόγω της συνεχούς απαίτησης τροφοδότησής τους μέσω μπαταριών (Law et al., 2014).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε μια κατασκευή και ειδικότερα σε ένα λιμενικό έργο πρώτο βήμα αποτελεί η εγκατάσταση ενός συμπλέγματος αισθητήρων σε αυτή. Όλοι οι αισθητήρες πρέπει να συνδέονται με ένα σύστημα απόκτηση δεδομένων (Data Acquisition System, DAQ), το οποίο αποτελεί το δεύτερο συστατικό του SHM και μπορεί να είναι ενσύρματο ή ασύρματο. Μετά τη συλλογή των δεδομένων ακολουθεί η μεταγωγή τους σε έναν άλλο κόμβο αισθητήρων (κόμβος κεφαλής) για περαιτέρω επεξεργασία και αποθήκευση. Μόλις τα δεδομένα υποβληθούν σε στατιστική ανάλυση, θα οδηγηθούν στο πέμπτο στάδιο που είναι η αποθήκευσή τους. Τα αποθηκευμένα πλέον δεδομένα θα σταλούν στα τελευταία στάδια που αφορούν στη διάγνωση και την ανάκτηση δεδομένων. Η διάταξη στην Εικόνα 2.21 αναπαριστά τις επιμέρους συνιστώσες που περιλαμβάνονται σε ένα πλήρες σύστημα παρακολούθησης της υγείας μιας κατασκευής, ξεκινώντας από τους αισθητήρες έως την ανάκτηση δεδομένων (Chandrasekaran, 2019).



Εικόνα 2.21 Στάδια εφαρμογής του SHM (Chandrasekaran, 2019).

Η διαχείριση των μετρήσεων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξη ενός συστήματος SHM. Τα θέματα διαχείρισης δεδομένων περιλαμβάνουν τη συλλογή και διαχείριση δεδομένων στο πεδίο, την επικοινωνία και μεταφορά τους σε εγκαταστάσεις εκτός του χώρου και τέλος την αποθήκευση (Mcneill, 2009). Η διαρκής αποθήκευση δεδομένων είναι σημαντική για τον συνολικό σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης δεδομένων. Με την εξάπλωση του διαδικτύου και την εξέλιξη της πληροφορικής, μπορούν να αναπτυχθούν προηγμένα λογισμικά για να διευκολύνουν την πρόσβαση στα δεδομένα, να υποστηρίξουν τη συντήρηση και τη λειτουργία της εποπτευόμενης υποδομής και να παρακολουθήσουν αυτόματα το σύστημα SHM. Η ενοποίηση της διαχείρισης δεδομένων και της παρακολούθησης του συστήματος είναι ένα θέμα που αξίζει να εξεταστεί ως λύση του συστήματος για την παρακολούθηση ενός συνόλου υποδομών (Law et al., 2014).

Εν γένει, τα δεδομένα μέτρησης είναι αρκετά πολύτιμα, όχι μόνο για το SHM, αλλά και για την εκτίμηση και διαχείριση του κύκλου ζωής της υποδομής και του συστήματος στο σύνολό του. Η διαδικασία ερμηνείας των δεδομένων είναι ένα λογικό πρόβλημα συμπερασμάτων, όπου γίνεται προσπάθεια ανάκτησης πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της υποδομής με βάση τις αποκρίσεις των αισθητήρων. Στον πραγματικό κόσμο, τα δεδομένα και τα μοντέλα ερμηνείας είναι πολύ συχνά αβέβαια, επομένως απαιτείται μια λογική που να λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες. Η μόνιμη παρακολούθηση συχνά οδηγεί σε μεγάλη ποσότητα δεδομένων από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων, δεδομένα τα οποία συνήθως είναι περιττά. Η μείωση του μεγέθους του συνόλου

δεδομένων βοηθά στη μείωση της υπολογιστικής προσπάθειας και βελτιστοποιεί την απόδοση της ανάλυσης (Law et al., 2014).

Η συλλογή των δεδομένων, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων που βασίζονται σε τεχνολογίες όμοιες με εκείνες των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων. Οι πιο συνήθεις στην παρακολούθηση υποδομών και ιδιαίτερα λιμενικών έργων είναι οι εξής:

Αισθητήρες Δόνησης

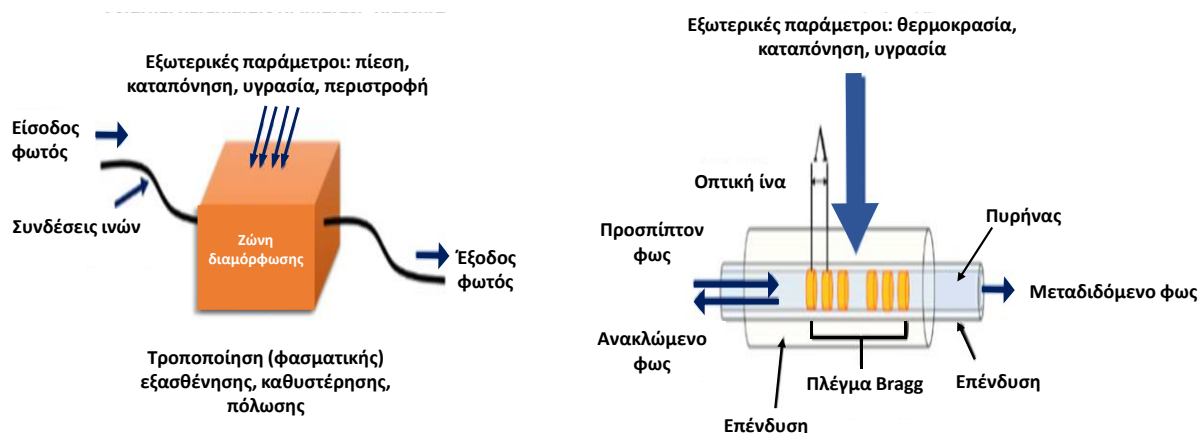
Πρόκειται για αισθητήρες, και συγκεκριμένα για επιταχυνσιόμετρα, τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν φθορές βασιζόμενα στην ανάλυση των φυσικών δονήσεων της κατασκευής. Οι δονήσεις αυτές στα θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι αισθητήρες αυτοί, οφείλονται στα φορτία των ανέμων και των κυμάτων (Rizzo, 2014b, O'Byrne et al., 2018). Θεωρείται μια αρκετά αποτελεσματική μέθοδος, και διαθέτει τόσο παραδοσιακές και όσο και σύγχρονες προσεγγίσεις. Η παραδοσιακή μέθοδος βασίζεται στην αρχή ότι η αλλαγή στη μάζα και στην ακαμψία θα αντικατοπτρίζεται στις μετρήσεις της φυσικής συχνότητας και των μορφών σχήματος της υποδομής. Όταν τα καταγεγραμμένα αυτά δεδομένα είναι διαφορετικά από το φυσιολογικό, υποδεικνύεται η έναρξη της φθοράς. Η σύγχρονη μέθοδος περιλαμβάνει την ηλεκτρονική μέτρηση της απόκρισης της κατασκευής για την ανίχνευση φθορών με τη βοήθεια τεχνικών επεξεργασίας σήματος, τεχνητής νοημοσύνης και τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η δυναμική απόκριση της κατασκευής υπό διαφορετικά φορτία μετριέται διαδικτυακά ενώ το SHM υποδεικνύει αλλαγή των δομικών παραμέτρων, εντοπίζοντας έτσι φθορά στην κατασκευή (Chandrasekaran, 2019). Οι σημαντικότεροι περιορισμοί της μεθόδου αφορούν αρχικά στο γεγονός πως δεν μπορούν να προσδιορίσουν ρωγμές που δεν είναι αρκετά μεγάλες, ώστε να επηρεάσουν τη φυσική συχνότητα δόνησης της υποδομής. Επίσης, υποφέρουν συχνά από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία στην κατασκευή (Rizzo, 2014b, O'Byrne et al., 2018).

Αισθητήρες Ακουστικών Εκπομπών

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.2.2, η Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) είναι μια παθητική μέθοδος που παρακολουθεί τα παροδικά κύματα τάσης που δημιουργούνται από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από εντοπισμένες πηγές, π.χ. ρωγμές, αποκολλήσεις, μέσα σε ένα υλικό. Η ελαστική ενέργεια διαδίδεται ως κύμα πίεσης στην υποδομή και ανιχνεύεται από έναν ή περισσότερους αισθητήρες συνδεδεμένους ή ενσωματωμένους στην υπό εξέταση κατασκευή (Rizzo & Zhu, 2010). Οι αισθητήρες AE είναι κατάλληλοι για την καθολική παρακολούθηση μιας υποδομής και την αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών και ιδιαίτερα των υποβρύχιων κατασκευών. Κατά την υποβρύχια παρακολούθηση απαιτείται η εκ νέου τοποθέτηση των μετατροπών ενέργειας και των καλωδιώσεων σε κάθε προγραμματισμένη παρακολούθηση. Αυτή η διαδικασία χρειάζεται δύτες και επομένως μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή στην εγκατάσταση. Τέλος, όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, η ακουστική μέθοδος επηρεάζεται άμεσα από τους θορύβους. Συνεπώς, σε περιβάλλοντα όπως είναι τα θαλάσσια απαιτείται επεξεργασία του ληφθέντος σήματος καθώς και διάκριση των επιμέρους σημάτων των φθορών για μια πιο επιτυχή παρακολούθηση (Rizzo, 2014b).

Αισθητήρες Οπτικών Ινών Πλέγματος Bragg (FBG)

Αφορούν σε μια κατηγορία αισθητήρων οπτικών ινών που μετρούν την καταπόνηση μιας κατασκευής για τον προσδιορισμό της πίεσης ή του καθεστώτος φόρτισης σε αυτή. Οι οπτικές ίνες γενικότερα (Fiber Optic Sensors, FOS), βασίζονται σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά του φωτεινού σήματος που μεταδίδεται κατά μήκος της ίνας τους. Όταν υπάρχουν εξωτερικές διαταραχές ή παραμορφώσεις (π.χ. εφελκυσμό, κάμψη ή θλίψη) της οπτικής ίνας επηρεάζεται το μεταδιδόμενο οπτικό σήμα, και προκαλείται αλλαγή ενός χαρακτηριστικού του σήματος εξόδου (π.χ. φάση, συχνότητα ή ένταση) ή αλλαγή του ανακλώμενου μήκους κύματος (Taheri, 2019). Οι αισθητήρες οπτικών ινών πλέγματος Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) (Εικόνα 2.22) είναι μια εξελιγμένη κατηγορία των οπτικών ινών και λειτουργούν βασιζόμενοι στην περιοδική παραλλαγή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της ίνας που σχηματίζεται από την έκθεση του πυρήνα σε ένα έντονο μοτίβο οπτικής παρεμβολής (Chandrasekaran, 2019, Taheri, 2019). Βρίσκονται τοποθετημένοι στην κατασκευή και μετρούν την παραμόρφωση μέσω του διαφορετικού μήκους κύματος που μεταφέρουν (Chandrasekaran, 2019). Έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή στη μέτρηση της καταπόνησης των λιμενικών έργων σκυροδέματος (Peters, 2009, Murawski et al., 2010). Παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μετρητών καταπόνησης, μιας και οι τελευταίοι αποτυγχάνουν να λειτουργήσουν σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Ren et al., 2006). Οι αισθητήρες FBG δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, αντιστέκονται στις σκληρές διαβρωτικές συνθήκες, κι έχουν επίσης τη δυνατότητα να μετρούν πολλαπλές φυσικές παραμέτρους μιας υποδομής (Chan et al., 2006). Ο τρόπος τοποθέτησής τους, δηλαδή η σειριακή πολυπλεξία των αισθητήρων στην κατασκευή, συμβάλλει στην καταγραφή περισσότερων παραμέτρων (Murawski et al., 2010).



Εικόνα 2.22 Αισθητήρες οπτικών ινών (FOS) αριστερά και οπτικών ινών πλέγματος Bragg (FBG) δεξιά (Taheri, 2019).

Έξυπνοι Αισθητήρες ή Επικαλύψεις Αισθητήρων

Πρόκειται για χρώματα ή επιχρίσματα, τα οποία εφαρμόζονται στην επιφάνεια που εξετάζεται. Παραμένουν ενσωματωμένα με τα πιεζοηλεκτρικά ή σιδηροηλεκτρικά στοιχεία για τη μέτρηση της διακύμανσης της παραμόρφωσης. Απαιτείται λεπτομερής φασματοσκοπική ανάλυση για την επεξεργασία της παραλλαγής του στελέχους που προκαλείται από τις φθορές στην τοπική κλίμακα (Chandrasekaran, 2019).

Αισθητήρες Μικροκυμάτων

Είναι κατάλληλοι για να υποδείξουν την εισροή υγρασίας όταν είναι ενσωματωμένοι σε υποδομές. Θεωρούνται χρήσιμοι και αποτελεσματικοί σε σύνθετες κατασκευές (Chandrasekaran, 2019).

Αισθητήρες Απεικόνισης Υπερήχων

Περιλαμβάνουν έναν μορφοτροπέα υπερήχων, ο οποίος δημιουργεί ένα σήμα που περνά μέσα από το υλικό. Η αλλαγή στην αντανάκλαση υποδεικνύει τις φθορές, την παρουσία ρωγμών ή οποιαδήποτε άλλη τοπική βλάβη (Chandrasekaran, 2019). Αναλυτική παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας της Μεθόδου Υπερήχων παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.2.

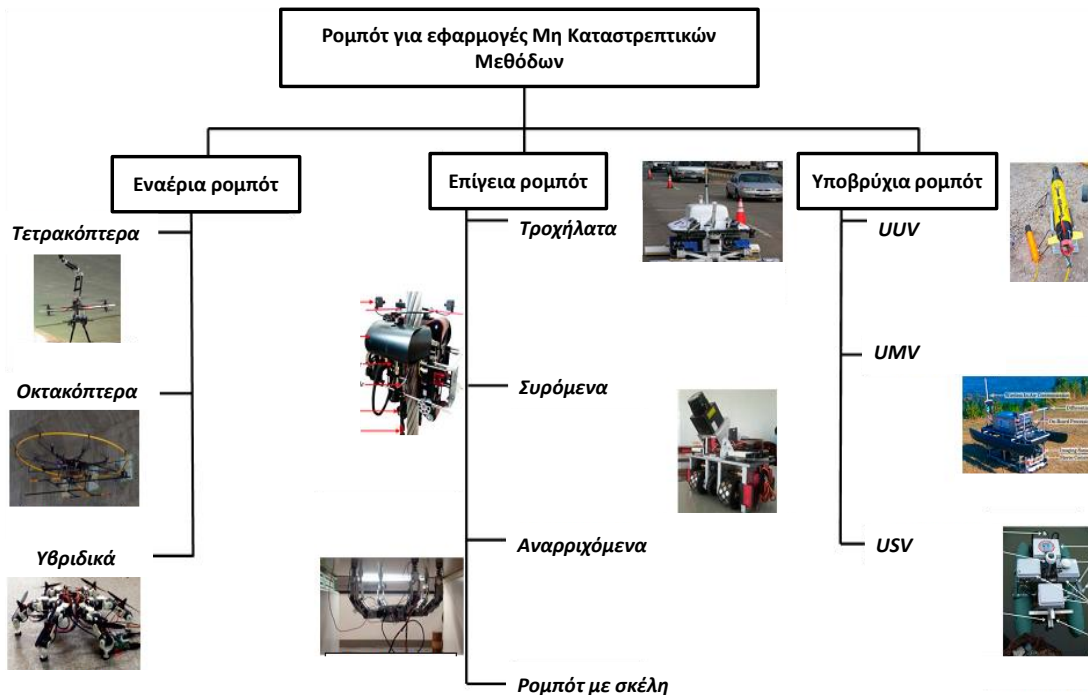
Δορυφορικές Μέθοδοι

Το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (Global Navigation Satellite System, GNSS) αποτελεί μια μέθοδο παρακολούθησης των μετατοπίσεων σε έργα πολιτικού μηχανικού. Πρόκειται για αισθητήρες που καταγράφουν τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης της κατασκευής που προκαλούνται από τα φορτία ανέμου, θερμοκρασίας και σεισμού (Yu et al., 2020). Η GNSS έχει πολλά ελκυστικά πλεονεκτήματα στο SHM. Για παράδειγμα, ο ρυθμός δειγματοληψίας δεδομένων μπορεί να φτάσει τα 20 Hz ή ακόμη και τα 100 Hz, πληρώνοντας έτσι τις απαιτήσεις παρακολούθησης για τις περισσότερες υποδομές μεγάλης κλίμακας. Μπορεί να λαμβάνει συνεχώς δεδομένα υπό όλες τις καιρικές συνθήκες, όπως άνεμος και να παρέχει τρισδιάστατες μετατοπίσεις σε πραγματικό χρόνο (Yi et al., 2013, Kapoor et al., 2017). Η τεχνολογία GNSS μπορεί να μετρήσει τις στατικές μετατοπίσεις με ακρίβεια σε επίπεδο χιλιοστού. Παρ' όλα αυτά, έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, λόγω του περιορισμού του εφήμερου σφάλματος, του σφάλματος ιονόσφαιρας, των σφαλμάτων τροπόσφαιρας, του πολλαπλού σφάλματος, του θορύβου μέτρησης του δέκτη και ούτω καθεξής (Zhong et al., 2010).

2.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Μαζί με την πρόοδο στην τεχνολογία, εξελίσσεται διαρκώς και το πεδίο των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων. Ο εξοπλισμός τους γίνεται όλο και πιο αποτελεσματικός, φορητός και προσιτός. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τηλεπισκόπησης σε αυτές τις μεθόδους έχει καταστεί μια βιώσιμη επιλογή για μια γρήγορη και ολοκληρωμένη αξιολόγηση των υποδομών (Khanal, 2020). Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αυξηθεί η εστίαση στην ανάπτυξη και χρήση ημιαυτόνομων και πλήρως αυτόνομων ρομπότ σε συνδυασμό με τις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους για την παρακολούθηση των υποδομών (Liu et al., 2014, Tsaimou et al., 2021b). Έχει αναπτυχθεί μια ευρεία γκάμα από ρομπότ που περιλαμβάνει ρομπότ αναρρίχησης (π.χ. ρομπότ με πόδια, τροχήλατων ρομπότ και ερπυστιοφόρων ρομπότ), μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) όπως τετρακόπτερα, οκτακόπτερα, μη επανδρωμένα οχήματα εδάφους (Unmanned Ground Vehicles, UGV) (π.χ. εργαστηριακό ρομπότ προηγμένης ρομποτικής και αυτοματισμού (Advanced Robotics and Automation, ARA), ρομποτική επιθεώρηση και χαρτογράφηση ρωγμών (Robotic Crack Inspection and Mapping, ROCIM), εργαλείο παρακολούθησης γεφυρών με ρομποτική (Robotics-Assisted Bridge Inspection Tool, RABIT)) και θαλάσσια ρομποτικά σκάφη (π.χ. μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (Unmanned Submersible Vehicles, USV), υποβρύχια θαλάσσια οχήματα (Unmanned Marine Vehicles, UMV), υποβρύχια

οχήματα (Unmanned Undersea Vehicles, UUV)). Στην Εικόνα 2.23 παρουσιάζονται όλες οι κατηγορίες των οχημάτων με παραδείγματα εμπορικού εξοπλισμού (Ahmed et al., 2020).



Εικόνα 2.23 Κατηγορίες πλατφορμών για την επιθεώρηση κατασκευών (Ahmed et al., 2020).

Στην περίπτωση όπου οι εξοπλισμοί επιθεώρησης εφαρμόζονται σε ρομποτικές πλατφόρμες, εισάγεται μια καινούρια έννοια, του συστήματος μη επανδρωμένων οχημάτων (Unmanned System, US). Μέθοδοι όπως η Υπέρυθρη Θερμογραφία, η Φωτογραμμετρία, οι Μέθοδοι Υπερήχων, το Γεωραντάρ και το LiDAR χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοια συστήματα, παρουσιάζοντας πολλά πλεονεκτήματα (Gonçalves & Henriques, 2015). Η γρήγορη συλλογή δεδομένων, η ενίσχυση της ασφάλειας των επιθεωρητών, η μείωση του χρόνου διακοπής της κυκλοφορίας της εν λειτουργία κατασκευής και, συνεπώς, η μείωση του κόστους των επιχειρήσεων αυτών είναι κάποια από τα οφέλη. Ωστόσο διαθέτουν και αρκετούς περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, όπως η ανάγκη για εξειδίκευση και για μέσα αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων (Gonçalves & Henriques, 2015). Συνεπώς, οι ρομποτικές πλατφόρμες αποτελούν ένα μέσο διευκόλυνσης των επιθεωρήσεων, ωστόσο η αποτελεσματικότητά τους διαφοροποιείται για κάθε υποδομή και για κάθε συνδυασμένη Μη Καταστρεπτική Μέθοδο.

Η χρήση μη επανδρωμένων οχημάτων, και ειδικότερα εναέριων συστημάτων (UAV) είναι άμεσα συνυφασμένη με την τεχνολογία της Φωτογραμμετρίας στον τομέα της παρακολούθησης. Περίπου το 45% των διατιθέμενων στην αγορά UAV αξιοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο και ειδικότερα στις επιθεωρήσεις (Shakhatreh et al., 2019). Η παρακολούθηση των υποδομών με UAV εξοπλισμένα με ενσωματωμένες κάμερες και αισθητήρες, μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά όταν εφαρμόζονται τεχνικές επεξεργασίας εικόνας (Sankarasrinivasan et al., 2015). Πλήθος λογισμικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων της κατασκευής και οι δυνατότητες που παρέχουν είναι σημαντικές για την αξιολόγηση. Σχετική αναφορά για τις δυνατότητες αυτές υπάρχει στην Ενότητα 2.2.2, στην παράγραφο της Φωτογραμμετρίας.

3. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Η αξία των λιμενικών κατασκευών για την κοινωνία αλλά και την οικονομία μιας περιοχής είναι πολύ μεγάλη (O'Byrne et al., 2018). Περισσότερο από το 90% του παγκόσμιου εμπορίου πραγματοποιείται μέσω της ναυτιλίας, έχοντας ως σύνδεσμο τα λιμάνια (Gaythwaite, 2016). Ωστόσο, η συστηματική λειτουργία τους σε συνδυασμό με το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται, τις κάνει ιδιαίτερα επιρρεπείς σε ταχεία γήρανση και φθορά (O'Byrne et al., 2018). Οι διαχειριστές οφείλουν να καθιστούν τις υποδομές τους ασφαλείς και λειτουργικές τόσο σε επίπεδο επιμέρους στοιχείων όσο και σε καθολικό επίπεδο. Ωστόσο, μεγάλος αριθμός λιμενικών έργων έχουν φτάσει ή ξεπεράσει το μέγιστο χρόνο του κύκλου ζωής τους. Για το λόγο αυτόν σημειώνεται έντονο ενδιαφέρον στις δραστηριότητες παρακολούθησης και συντήρησης, ώστε να διασφαλιστεί πως λειτουργούν ομαλά καθώς πλησιάζουν, ή ακόμη και ξεπερνούν, τη διάρκεια ζωής τους (Wenzel, 2003). Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, οι διαχειριστές λιμένων επιθυμούν και εφαρμόζουν, όπου είναι εφικτό, την επέκταση της διάρκειας ζωής των έργων αυτών. Η παρακολούθηση και αξιολόγηση των λιμενικών υποδομών με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών, αποτελούν το πιο σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη ενός τέτοιου σκοπού.

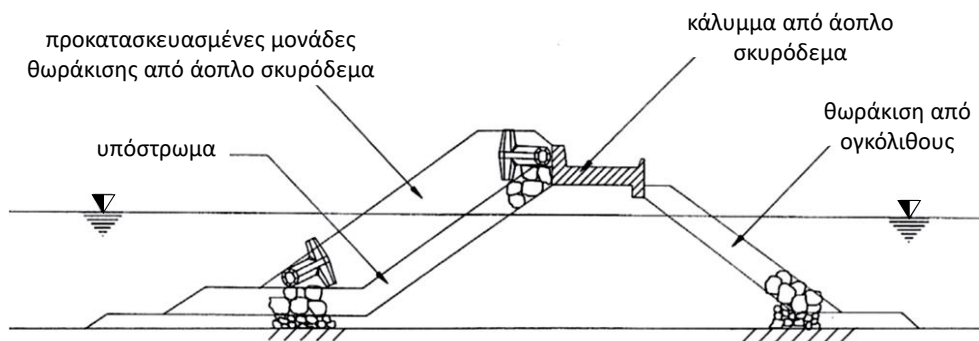
Ο τομέας των λιμενικών έργων περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος εγκαταστάσεων και κατασκευών. Σύμφωνα με τον Gaythwaite (2016) τα βασικά θαλάσσια έργα σκυροδέματος κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τους σκοπούς που εξυπηρετούν. Η πρώτη αφορά στα λιμενικά έργα και εμπεριέχει υποδομές ελλιμενισμού, εξυπηρέτησης και ναυσιπλοΐας των πλοίων. Τοποθετούνται σε περιοχές που είναι προστατευμένες από τις έντονες επιδράσεις των κυμάτων και του θαλάσσιου περιβάλλοντος ευρύτερα (Smith, 2016). Παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν οι αποβάθρες, οι πρόβολοι καθώς και οι κρηπιδότοιχοι. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στις παράκτιες κατασκευές που στόχο έχουν την προστασία της ακτογραμμής (Gaythwaite, 2016). Αντιμετωπίζουν έντονα τις επιπτώσεις των άμεσων θαλάσσιων δράσεων από τα κύματα και την κίνηση των ιζημάτων, αλλά και των έμμεσων δράσεων από τον παφλασμό των κυμάτων (Smith, 2016). Τα θαλάσσια τείχη, οι κυματοθραύστες και τα αναχώματα εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία των υποδομών. Τέλος, υπάρχουν και τα υπεράκτια έργα σκυροδέματος που ασχολούνται με την ανάκτηση των φυσικών πόρων (πετρέλαιο και φυσικό αέριο), καθώς και με την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (άνεμος, κύματα και παλιρροιακά ρεύματα). Πρόκειται για μια ευρέως διαδεδομένη κατηγορία στον κλάδο της θαλάσσιας υδραυλικής (Gaythwaite, 2016). Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πιο συνηθισμένα λιμενικά και παράκτια έργα από σκυρόδεμα.

Πίνακας 3.1 Λιμενικά και παράκτια έργα από σκυροδέμα (Smith, 2016).

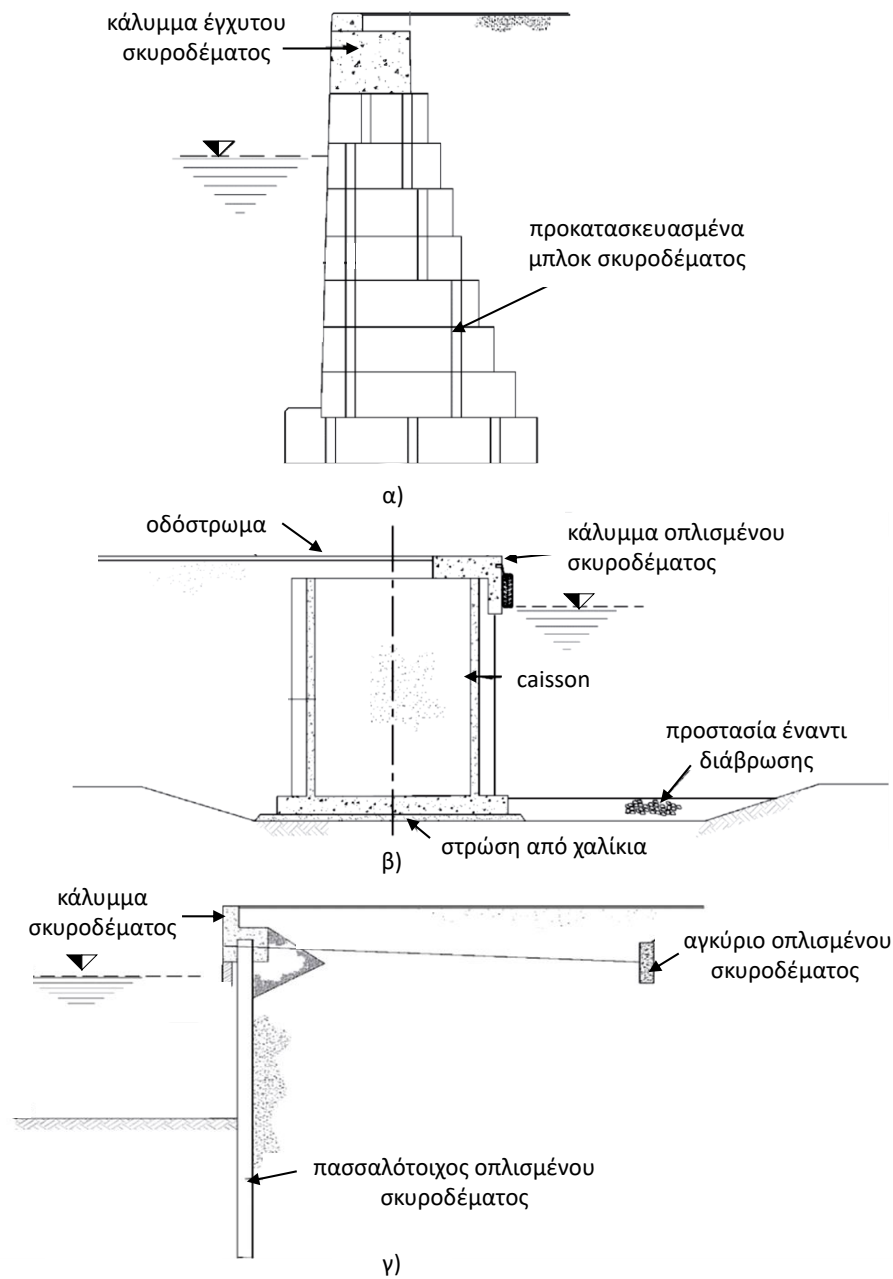
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Λιμενικά Έργα	• Κρηπιδότοιχοι	Έργο σκυροδέματος στο οποίο προσδένουν/ελλιμενίζονται τα πλοία με στόχο την απόθεση φορτίου ή την μετεπιβίβαση επιβατών/οχημάτων. Βασική λειτουργία του είναι η συγκράτηση του τμήματος εδάφους που βρίσκεται πίσω από αυτόν, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται ως χώρος στοίβαξης και διακίνησης του εν λόγω φορτίου.
	• Αποβάθρες	Έργο σκυροδέματος στο οποίο προσδένουν/ελλιμενίζονται τα πλοία με στόχο την εισαγωγή και εξαγωγή ή την μετεπιβίβαση επιβατών/οχημάτων. Βασική του λειτουργία αποτελεί η απόθεση και απευθείας μεταβίβαση φορτίου (κυρίως χύδην και υγρό φορτίο ή επιβατικό κοινό και οχήματα) προς και από την ξηρά.
	• Οδοστρώματα	Βρίσκονται ακριβώς δίπλα σε κατασκευές αντιστήριξης της αποβάθρας και είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε καθίζηση λόγω απώλειας εδάφους στήριξης.
	• Ράμπα Πλοίων και Σχάρα Καθέλκυσης	Λιμενική υποδομή που χρησιμοποιείται για την καθέλκυση σκαφών προς τη θάλασσα. Αφορά σε μια επιφάνεια σκυροδέματος σχεδιασμένη με κατάλληλη κλίση, η οποία βοηθά το εκάστοτε σκάφος να μεταβεί από την επιφάνεια του εδάφους σε ένα επιτρεπόμενο σημείο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.
	• Ξηρές Αποβάθρες και Ανελκυστήρες Πλοίων	Πρόκειται για υποδομές που χρησιμοποιούν παρόμοια κατασκευαστικά στοιχεία με εκείνα που περιγράφηκαν προηγουμένως για τους τοίχους των κρηπιδωμάτων και τις προβλήτες. Οι ξηρές αποβάθρες τείνουν να είναι ογκώδεις, βαριές κατασκευές για να αντιστέκονται στις υδροστατικές δυνάμεις που εμφανίζονται όταν αυτές αποστραγγίζονται.
Παράκτια Έργα	• Κυματοθραύστες	Έργο σκυροδέματος που στοχεύει στην προστασία των παράκτιων υποδομών μέσω της ανακατεύθυνσης των θαλάσσιων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
		θραυόμενων κυμάτων προς τα βαθιά και την αποτροπή της υπερπήδησης των κυμάτων αυτών από την κατασκευή.
	• Θαλάσσια Τείχη	Έργο σκυροδέματος που στοχεύει στην προστασία των παράκτιων υποδομών μέσω της ανακατεύθυνσης των θαλάσσιων θραυόμενων κυμάτων προς τα βαθιά και την αποτροπή της υπερπήδησης των κυμάτων αυτών από την κατασκευή.
	• Αναχώματα	Έργο που κατασκευάζεται κατά μήκος μιας ακτογραμμής με στόχο την προστασία της από την επίθεση των κυμάτων.
	• Παράκτιες Αποβάθρες	Έργο σκυροδέματος που ταυτίζεται με τις προβλήτες που βρίσκονται εντός προστατευμένων λιμανιών, ωστόσο διαφοροποιείται ως προς τα υδροδυναμικά φορτία που δέχεται ως κατασκευή από τα κύματα και τα ωκεάνια ρεύματα της θέσης κατασκευής του.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται, ενδεικτικά, συνήθη έργα σκυροδέματος που υφίστανται σε μια θαλάσσια περιοχή. Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζεται σε σχηματική μορφή ένας κυματοθραύστης, που αποτελεί έργο εξωτερικής προστασίας της ακτογραμμής, ενώ στην Εικόνα 3.2 αποτυπώνονται διάφορα είδη κρηπιδότοιχου.



Εικόνα 3.1 Τύπος παράκτιων έργων, κυματοθραύστης (Smith, 2016).



Εικόνα 3.2 Τύποι λιμενικών κατασκευών: α) κρηπιδότοιχος τύπου μπλοκ, β) κρηπιδότοιχος Caisson, γ) πασσαλότοιχος (Smith, 2016).

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα που αφορούν, κυρίως, στο κομμάτι της ανωδομής και περιλαμβάνει την συνδυαστική κατασκευή αποβάθρων, οδοστρωμάτων και κρηπιδότοιχων. Συνεπώς, στη συνέχεια, εξετάζονται οι μέθοδοι που έχουν αποτελεσματική χρήση σε αυτού του τύπου τις κατασκευές.

3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Οι λιμενικές κατασκευές όλων των τύπων είναι ευαίσθητες στην παρουσία πολλών φθορών και στην ανάπτυξη μηχανισμών αστοχίας. Κάποιες φθορές αφορούν σε κατασκευαστικά λάθη που έχουν προκληθεί εν αγνοία σε μια υποδομή, ενώ άλλες αναπτύσσονται με την πάροδο του χρόνου λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών γεγονότων (Chandrasekaran, 2019). Παρόλο που ορισμένες από αυτές μπορούν να εντοπιστούν με οπτικά ή απτά μέσα, άλλες πιθανόν να είναι κρυμμένες στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα μια ένδειξη φθοράς, αλλά η πραγματική έκταση ή η αιτία δημιουργίας της να μην είναι εμφανής. Για αυτές τις περιπτώσεις, κρίνεται αναγκαία η χρήση εξειδικευμένων τεχνικών παρακολούθησης για τη διεξοδική διερεύνηση της κατάστασης μιας λιμενικής υποδομής. Επιπλέον, έργα όπως οι αποβάθρες δεν πρέπει να βρίσκονται συχνά σε φάση επισκευής, διότι επηρεάζεται η λειτουργική αξία του συστήματος. Απαιτείται, λοιπόν, προληπτική συντήρηση ενώ είναι σε λειτουργία και οποιοσδήποτε επισκευές δεν πρέπει να παρακωλύουν τη χρήση τους (Chandrasekaran, 2019).

Ζητήματα που αφορούν στη δομική λειτουργία των λιμενικών έργων μπορούν να εξεταστούν ύστερα από παρακολούθηση και αποτύπωση της κατάστασής τους. Οι τρόποι υλοποίησης του στόχου αυτού αφορούν σε τεχνολογίες μη καταστρεπτικές για την υποδομή και σε συστήματα αισθητήρων. Παρόλο που οι μόνιμοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην παρακολούθηση των λιμενικών έργων, στην παρούσα εργασία επιλέγεται να εξετασθούν οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι, οι οποίες, επίσης, εμφανίζονται σε μεγάλο βαθμό στη διεθνή βιβλιογραφία. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται πως και η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας αποτελεί μέρος των τεχνολογιών αυτών για την παρούσα εργασία.

Ποικίλες μέθοδοι έχουν καταγραφεί για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος. Για παράδειγμα, οι Lauritzen et al. (2019) αναφέρουν την Ακουστική Μέθοδο και το Γεωραντάρ ως κατάλληλες τεχνικές για την εποπτεία λιμενικών κατασκευών. Σε αναφορά τους το σωματείο των πολιτικών μηχανικών των Ηνωμένων Πολιτειών (ASCE, 2015) παρουσιάζει τη μέθοδο Γεωραντάρ αλλά και τη Δοκιμή Υπερήχων ως κατάλληλες πρακτικές για τον εντοπισμό φθορών στα λιμενικά έργα. Ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 3.2) απεικονίζει μια καταγραφή των συνήθων τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε λιμενικές κατασκευές σύμφωνα βιβλιογραφικές αναφορές. Παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα λιμενικών υποδομών πάνω στα οποία έχει εφαρμοστεί κάθε μέθοδος.

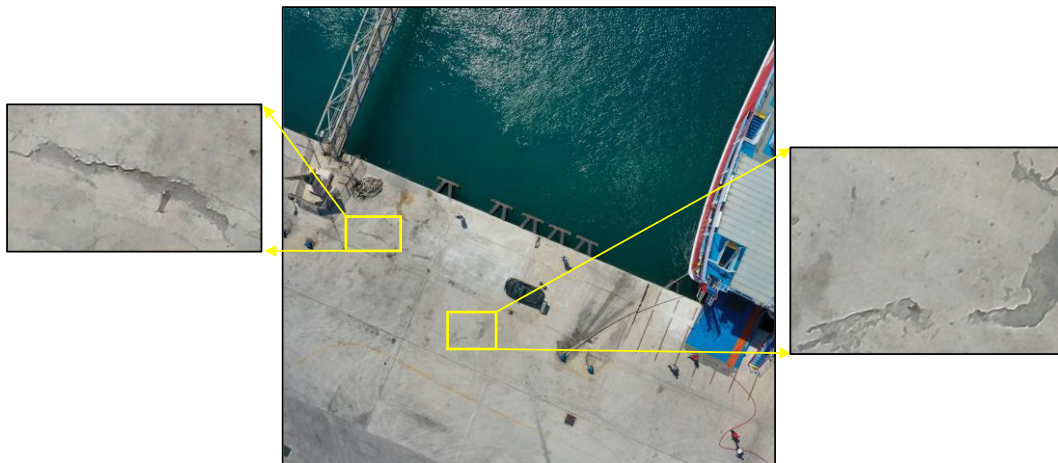


Πίνακας 3.2 Εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων σε βασικές λιμενικές υποδομές.

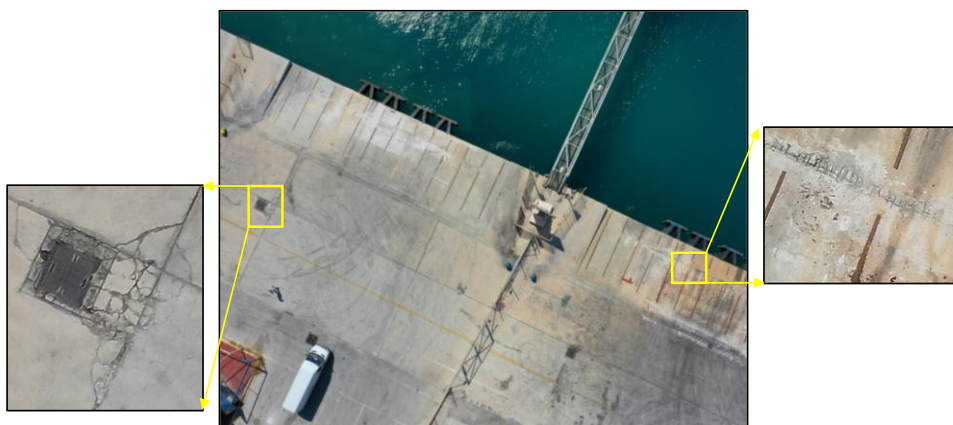
ΤΥΠΟΣ ΛΙΜΕΝΙΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ					
	Υπέρυθρη Θερμογραφία	Γεωραντάρ	Ακουστική Εκπομπή	Δοκιμή Υπερήχων	Φωτογραμμετρία	Ηχώ-Κρούση
Κρηπιδότοιχοι	Lauritzen et al. (2019)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	Paszotta et al. (2017)	ASCE (2015)
Αποβάθρες	ASCE (2015) Lauritzen et al. (2019)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	Paszotta et al. (2017)	ASCE (2015)
Οδοστρώματα	ASCE (2015)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	ASCE (2015)	Paszotta et al. (2017)	ASCE (2015)

3.2 ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΩΝ ΣΕ ΛΙΜΕΝΙΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Όπως όλες οι υποδομές έτσι και οι λιμενικές εμφανίζουν προβλήματα φθορών στη διάρκεια ζωής τους, μειώνοντας την αξιοπιστία τους. Στη διάρκεια του χρόνου γίνονται επιρρεπείς σε αισθητική, λειτουργική ή δομική υποβάθμιση, η οποία, συνήθως οδηγεί σε απώλεια της λειτουργικότητας των επιμέρους στοιχείων ή και ολόκληρης της κατασκευής (O'Byrne et al., 2018). Λόγω των δυσμενών συνθηκών αλλά και του επιθετικού περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται, είναι ευάλωτες σε ταχεία γήρανση (Stacey et al., 2008). Τα παραπάνω αποτυπώνονται με την ανάπτυξη φθορών. Τα περισσότερα είδη που εντοπίζονται είναι κοινά σε όλες τις κατασκευές από σκυρόδεμα. Ωστόσο, ορισμένες φθορές εμφανίζονται συχνότερα σε λιμενικές κατασκευές επιφέροντας σοβαρότερες συνέπειες σε τόσο σκληρές συνθήκες (ASCE, 2015). Στις Εικόνες 3.3-3.5 παρουσιάζονται κοινοί τύποι φθορών όπως αυτές εντοπίστηκαν κατά την επιτόπια καταγραφή με Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) που πραγματοποιήθηκε από την ομάδα του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων (ΕΛΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) στον λιμένα Λαυρίου.



Εικόνα 3.3 Παράδειγμα αποφλοίωσης επιφάνειας σκυροδέματος στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.



Εικόνα 3.4 Αποτύπωση της ρηγματώσης και της διάβρωσης οπλισμού στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.



Εικόνα 3.5 Αποτύπωση της ρηγμάτωσης (αριστερά) και της φθοράς από πιθανή κρούση στην αποβάθρα του τομέα ακτοπλοΐας του λιμένα Λαυρίου, όπως αποτυπώθηκε κατά την επιτόπια επισκόπηση της ομάδας του ΕΛΕ, ΕΜΠ με πτήση ΣμηΕΑ.

Όπως παρατηρείται από τις εικόνες ένας από τους κύριους τύπους φθοράς που εμφανίζεται σε λιμένα σκυροδέματος είναι η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού. Πρόκειται για έναν μηχανισμό που σχετίζεται με τη διείδυση χλωριόντων στην επικάλυψη σκυροδέματος (Gaythwaite, 2016). Ο διαβρωμένος χάλυβας οπλισμού διευρύνεται ασκώντας σημαντική πίεση στο σκυρόδεμα και επιφέροντας επιφανειακές βλάβες, όπως ρωγμές ή αποφλοιώσεις. Επιπλέον, αποτελεί κοινή αιτία υποβάθμισης και της ποιότητας του σκυροδέματος (ASCE, 2015, Gaythwaite, 2016). Άλλες μορφές φθορών που εντοπίζονται στα λιμενικά έργα αφορούν σε θρυμματισμό, απολέπιση και σχηματισμό κενών στην επιφάνεια του σκυροδέματος, σε φθορές λόγω χημικών και βιολογικών επιθέσεων, ή μπορεί να οφείλονται σε κρούση πλοίων και επιβολή δυσμενών φορτίσεων στην κατασκευή, καθώς, επίσης, και στην διάβρωσης ή την τριβή του εδάφους στο οποίο στηρίζονται (Πίνακας 3.3).

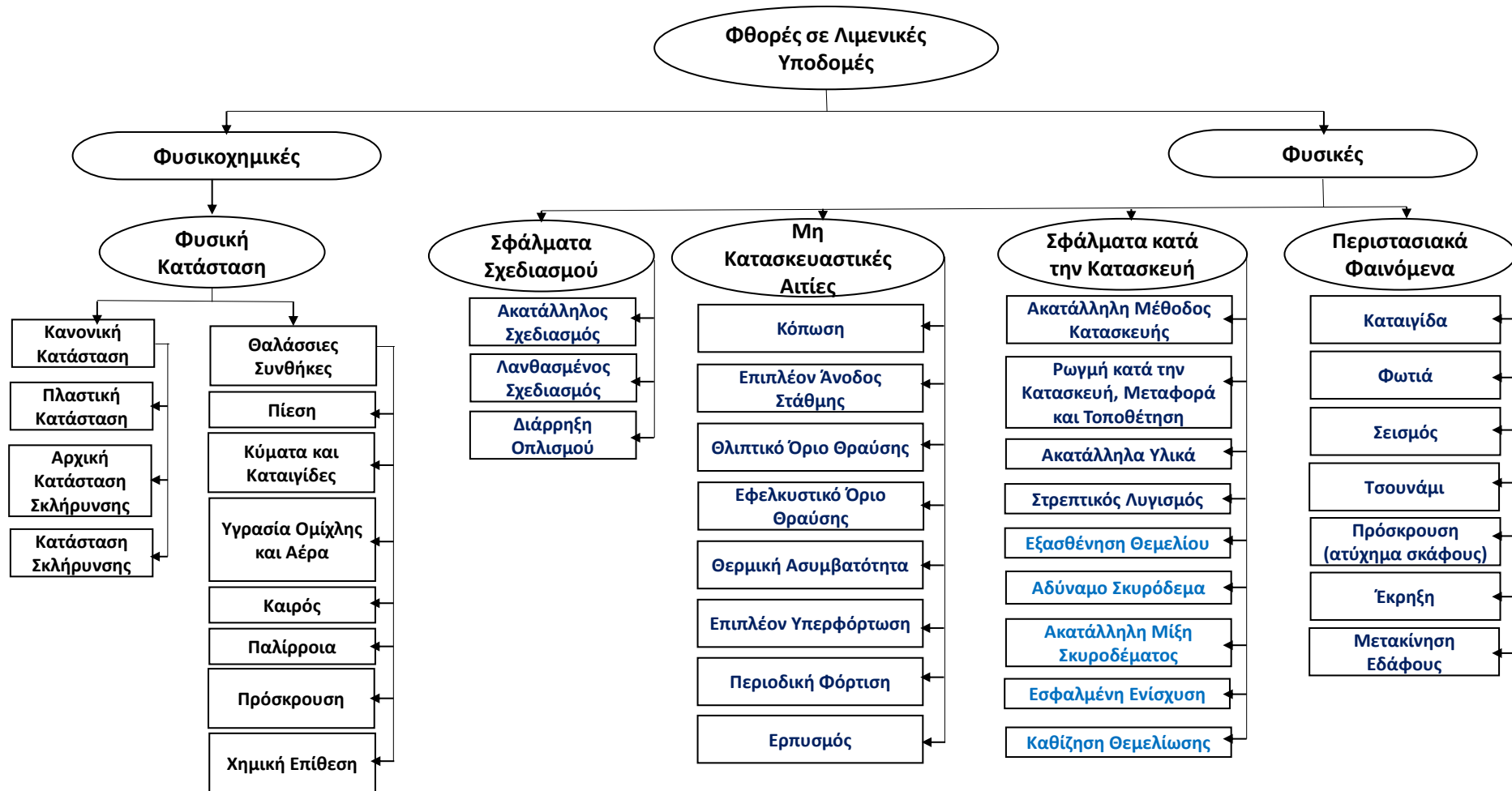
Πίνακας 3.3 Τύποι φθορών σε λιμενικές υποδομές σκυροδέματος.

ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΩΝ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Ρηγμάτωση	Γραμμικός διαχωρισμός του σκυροδέματος σε δύο ή περισσότερα τμήματα όταν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις μεγαλύτερες από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Διακρίνονται σε δομικές ρωγμές που προκαλούνται από την επιβολή φορτίων (εμπορεύματα, ελλιμενισμός και πρόσδεση πλοίων) και σε μη δομικές λόγω θαλάσσιου περιβάλλοντος, θερμοκρασιακών μεταβολών και υγρασίας.
Αποκόλληση	Διαχωρισμός στρωμάτων σκυροδέματος κατά μήκος ενός επιπέδου παράλληλου και κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, δηλαδή στο επίπεδο του οπλισμού ή πάνω από αυτόν.
Διάβρωση Οπλισμού	Οφείλεται σε μεταβολές στη χημική σύνθεση του σκυροδέματος λόγω έκθεσης στο θαλάσσιο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να φθείρεται η στρώση επικάλυψης του οπλισμού, ο οποίος εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον.
Αποφλοίωση	Διαδικασία αποκόλλησης ενός τμήματος σκυροδέματος, συνήθως σε σχήμα νιφάδας, από το σκυρόδεμα λόγω της επίδραση του περιβάλλοντος, λόγω πιέσεων ή λόγω εσωτερικών διαστολών.



ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΩΝ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Απολέπιση	Τοπικό ξεφλούδισμα των επιφανειακών στρωμάτων του σκυροδέματος.
Χημική Προσβολή	Χημική υποβάθμιση του σκυροδέματος που μπορεί να συμβεί λόγω επιθετικών παραγόντων όπως τα θειικά άλατα, μαλακού νερού, κρυστάλλωσης αλάτων και αντίδρασης των αλκαλικών αδρανών.
Θρυμματισμός Επιφανειακών Αδρανών	Κωνικό θραύσμα που εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και αποτυπώνεται σε μορφή οπής.
Κυψέλες	Σχηματισμός θυλάκων των χονδροειδών αδρανών κατά την σκυροδέτηση, λόγω ανεπαρκούς στερεοποίησης.
Εξάνθηση	Εναπόθεση αλάτων, συνήθως λευκού χρώματος, που κατά καιρούς αναπτύσσονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
Τριβή ή Διάβρωση	Προκύπτει από την αλληλεπίδραση ενός κινούμενου εξωτερικού μέσου (και των υλικών που μεταφέρονται από το μέσο) και της επιφάνειας του σκυροδέματος.
Φθορές Ψύξης-Απόψυξης	Εμφανίζονται όταν οι κύκλοι κατάψυξης και απόψυξης ενεργούν σε πορώδες σκυρόδεμα που έχει απορροφήσει νερό. Το νερό των πόρων διαστέλλεται καθώς παγώνει, προκαλώντας δυνάμεις διαστολής που φθείρουν το γύρω σκυρόδεμα.
Φθορές Κρούσης και Υπερφόρτωσης	Η φθορά από κρούση προκαλείται όταν πλοία ή άλλα αντικείμενα που χτυπούν ένα τμήμα από σκυρόδεμα. Η φθορά από υπερφόρτωση προκαλείται όταν επιβάλλονται φορτία στις κατασκευές μεγαλύτερα της αντοχής τους, που αναφέρονται επίσης ως υπερένταση.

Οι αιτίες που προκαλούν τις παραπάνω φθορές διακρίνονται μεταξύ φυσικών και φυσικοχημικών (Champiri et al., 2016). Οι φυσικοχημικές περιλαμβάνουν τις ενέργειες που οφείλονται στην αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και φύσης. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι πιθανές αστοχίες κατά την κατασκευή, και συγκεκριμένα, στη φάση σκλήρυνσης του σκυροδέματος, αλλά και από την επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος στη φάση λειτουργίας της (π.χ. δράσεις κυμάτων, παλίρροιας, καταιγίδα, πρόσκρουση πλοίων). Οι φυσικές είναι αυτές που οφείλονται στην άμεση δράση του ανθρώπου και της φύσης στην υποδομή, και περιλαμβάνουν τα σφάλματα σχεδιασμού, κατασκευής, περιστασιακά φαινόμενα (π.χ. σεισμός, τσουνάμι), καθώς και μη κατασκευαστικές αιτίες (π.χ. κόπωση, ερπυσμός, υπερφόρτωση, περαιτέρω αύξηση της θαλάσσιας στάθμης). Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται επιγραμματικά όλες οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν φθορά σε μια λιμενική κατασκευή σκυροδέματος καθώς και οι κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται.



Εικόνα 3.6 Αιτίες φθορών σε λιμενικές υποδομές (Champiri et al., 2016).



Είναι πλέον γνωστό πως η οπτική επισκόπηση των επιφανειακών φθορών μιας υποδομής σκυροδέματος για την αξιολόγηση της κατάστασής της δεν θεωρείται επαρκής. Εσωτερικές φθορές όπως η διάβρωση σπλισμού χρειάζεται να εκδηλωθούν επιφανειακά μέσω άλλων μηχανισμών (π.χ. αποφλοιώσεις επικάλυψης, επιφανειακές ρωγμές και αποκολλήσεις) για να γίνουν αντιληπτές. Ωστόσο, ο χρόνος στον οποίο μπορούν να εντοπιστούν λειτουργεί εις βάρος της κατασκευής. Πέραν τούτου, ακόμη και αν η παρουσία της εσωτερικής φθοράς έχει ανιχνευθεί, η έκταση και η σοβαρότητά της δεν μπορεί να αξιολογηθεί (ASCE, 2015). Για τις περιπτώσεις αυτές η χρήση εξειδικευμένων τεχνικών παρακολούθησης, όπως είναι οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι, κρίνεται απαραίτητη. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.4) αποτυπώνονται οι μέθοδοι παρακολούθησης που αφορούν στις σημαντικότερες φθορές σκυροδέματος καθώς και οι βιβλιογραφίες στις οποίες έχει γίνει αναφορά.



Πίνακας 3.4 Εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων για την ανίχνευση φθορών σε λιμενικές υποδομές σκυροδέματος.

ΤΥΠΟΣ ΦΘΟΡΑΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ					
	Υπέρυθρη Θερμογραφία	Γεωραντάρ	Ακουστική Εκπομπή	Μέθοδος Υπερήχων	Φωτογραμμετρία	Ηχώ-Κρούση
Ρηγμάτωση	Verma et al. (2013) Ismail (2017) Al Qurishee et al. (2019)	-	Verma et al. (2013) ASCE (2015) O'Byrne et al. (2019) Al Qurishee et al. (2019)	Ismail (2017) Al Qurishee et al. (2019)	Harris et al. (2016) O'Byrne et al. (2019) Mizuno (2018)	Verma et al. (2013)
Κενά	Verma et al. (2013) ASCE (2015) Al Qurishee et al. (2019)	ASCE (2015) Al Qurishee et al. (2019)	Verma et al. (2013)	Ismail (2017) Al Qurishee et al. (2019)	-	Verma et al. (2013) Al Qurishee et al. (2019)
Αποκόλληση	ASCE (2015) Harris et al. (2016) Ibrahim (2016)	Harris et al. (2016)	-	Ibrahim (2016)	Mizuno (2018)	-
Διάβρωση Οπλισμού	-	ASCE (2015) Harris et al. (2016)	ASCE (2015) O'Byrne et al. (2019) Al Qurishee et al. (2019)	-	-	-
Κυψέλες	Ismail (2017)	-	-	Ismail (2017) Al Qurishee et al. (2019)	-	Al Qurishee et al. (2019)

3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο Κεφάλαιο 3.2 (Πίνακας 3.2) παρουσιάστηκαν οι διάφορες Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση συνήθων τύπων λιμενικών υποδομών. Από το σύνολο των μεθόδων, αξίζει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά και ανάλυση σε τέσσερις από αυτές: 1. στην Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), 2. τη Φωτογραμμετρία σε συνδυασμό με μη επανδρωμένο όχημα (CRP), 3. το Γεωραντάρ (GPR), και 4. τη Δοκιμή Υπερήχων (UT). Πρόκειται για βασικές μεθόδους παρακολούθησης λιμενικών έργων με αρκετά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή τους. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που χρειάζονται να αναφερθούν, ώστε να διευκολύνουν τους διαχειριστές λιμενικών υποδομών στην επιλογή της καταλληλότερης.

Ξεκινώντας από την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), θεωρείται μια μέθοδος εμπορικά διαθέσιμη που μπορεί με ευκολία να εντοπίσει φθορές επιφανειακά αλλά και σε μικρά βάθη στην κατασκευή. Προσφέρεται για ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των φθορών μέσω των θερμικών εικόνων που απαθανατίζει (Harris et al., 2016). Επιτρέπει την άμεση οπτικοποίηση της κατασκευής και των φθορών σε αυτή, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο ανάλυσης. Ανιχνεύει ποικιλία φθορών, όπως κενά, αποκολλήσεις, ρωγμές, αποσάθρωση του σκυροδέματος, διαχωρισμό των διαφορετικών στρώσεων των υλικών της κατασκευής, διαφοροποιήσεις των υλικών, καθώς και αλλαγές στην πυκνότητα, την θερμική αγωγιμότητα και την θερμοχωρητικότητα. Είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση όλης της κατασκευής κι όχι μόνο συγκεκριμένων τμημάτων της (Rehman et al., 2016). Εφαρμόζεται σε απόσταση από την κατασκευή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές δύσβατες στους επιθεωρητές. Επίσης, πραγματοποιεί ταχείες επιθεωρήσεις με ελάχιστη παρακώλυση της κυκλοφορίας στην υποδομή. Ωστόσο, επηρεάζεται άμεσα από τις κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και αδυνατεί να προσδιορίσει το βάθος των φθορών (Omar & Nehdi, 2018). Επίσης διαθέτει έναν αρκετά κοστοβόρο εξοπλισμό και απαιτεί έμπειρους χειριστές (Tosti & Ferrante, 2020). Δεν παύει, όμως, να χαρακτηρίζεται ως μια οικονομικά αποδοτική τεχνολογία.

Η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας (CRP) σε συνδυασμό με μη επανδρωμένο όχημα (UAV), απαντάται συχνά σε προγράμματα παρακολούθησης κατασκευών σκυροδέματος, και ιδιαίτερα των γεφυρών. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εφαρμογή της μεθόδου και στις λιμενικές υποδομές (Tsaimou et al., 2021b). Κύριο πλεονέκτημά της είναι πως αποτελεί μια αρκετά οικονομική τεχνική με χαμηλό κόστος κεφαλαίου. Πέραν τούτου, δίνει συγκεκριμένα στοιχεία για τις φθορές που ανιχνεύει, όπως είναι η έκταση, ο όγκος και η θέση τους (Harris et al., 2016). Διαθέτει φορητό εξοπλισμό χαμηλού κόστους και εξάγει ακριβή αποτελέσματα. Έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει ως επί το πλείστον επιφανειακές φθορές, κι όχι τόσο εσωτερικές, εκτός αν η έκταση των εσωτερικών φθορών έχει εκδηλωθεί επιφανειακά. Όπως είναι γνωστό τα δεδομένα που συλλέγει είναι δύο διαστάσεων, χωρίς πληροφορίες ύψους. Για την ανάκτηση τέτοιων πληροφοριών και τη μετατροπή των ακατέργαστων στοιχείων σε σημεία τριών διαστάσεων, χρειάζεται συσχέτιση πολλών εικόνων χειροκίνητα. Συνεπώς, είναι μια μέθοδος που δεν παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, αλλά απαιτεί επεξεργασία. Επιπρόσθετα, η εκτέλεσή της επιτυγχάνεται τις ώρες που δεν υπάρχει πρόβλημα ορατότητας (Zhu & Brilakis, 2009).

Το Γεωραντάρ (GPR) αποτελεί μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται συστηματικά για την αξιολόγηση έργων πολιτικών μηχανικού. Η ικανότητά της να εφαρμόζεται σε αρκετά διαβρωτικά περιβάλλοντα,



την κάνει κατάλληλη για την παρακολούθηση λιμενικών υποδομών. Μπορεί να εντοπίζει πλήθος φθορών, όπως κενά και εσωτερικές ανωμαλίες σε μια υποδομή, πιθανές αποκολλήσεις και την έκτασή τους, υποβάθμιση του σκυροδέματος, αλλά και θαμμένα αντικείμενα στο εσωτερικό της. Έχει, επίσης, τη δυνατότητα απεικόνισης των φθορών που ανιχνεύει καθ' ύψος (ή κατά βάθος). Ακόμη, εκτιμά το πάχος των επιμέρους μελών της κατασκευής, όπως και της επικάλυψης σκυροδέματος (Rehman et al., 2016). Εφαρμόζεται χωρίς να έρχεται σε απευθείας επαφή με την υποδομή και έχει τη δυνατότητα να ερευνά μεγάλες επιφάνειες με 100% κάλυψη και σε πολύ σύντομο χρόνο. Είναι ίσως η καταλληλότερη για να εντοπίσει τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, όμως δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σοβαρότητα της φθοράς ή την διαφοροποίηση της διατομής του χάλυβα λόγω σκουριάς. Επιπλέον, παρουσιάζει αδυναμία στον εντοπισμό των εσωτερικών αποκολλήσεων, όταν υπάρχει απουσία υγρασίας στην υποδομή (Omar & Nehdi, 2018). Η εφαρμογή της μεθόδου στηρίζεται στην απόκτηση φορητού εξοπλισμού, ο οποίος προσφέρει τη δυνατότητα οπτικοποίησης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά, όμως απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία από εμπειρογνώμονες, ώστε να γίνει αντιληπτό τι απεικονίζουν (π.χ. είδος φθοράς). Επομένως, ο συνολικός χρόνος εφαρμογής της πολλαπλασιάζεται, λόγω της ανάγκης ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Τέλος, πρόκειται για μια αρκετά ακριβή μέθοδος συγκριτικά με άλλες, τόσο ως προς τον εξοπλισμό της όσο και ως προς τα λογισμικά για την επεξεργασία δεδομένων (Rehman et al., 2016).

Όσον αφορά τη Δοκιμή των Υπερήχων (UT) θεωρείται ως μια εύκολη στη χρήση μέθοδος με αξιόπιστα αποτελέσματα. Η ταχύτητα εφαρμογής της είναι αρκετά σύντομη και ο εξοπλισμός της είναι φορητός, διευκολύνοντας την εφαρμογή της μεθόδου. Ωστόσο, δεν μπορεί να εκτελεστεί σε όλα τα τμήματα μιας κατασκευής, καθώς περιορίζεται από το πάχος αυτής. Επίσης, απαιτεί έμπειρους χειριστές για την εκτέλεση της μεθόδου (Tosti & Ferrante, 2020). Γνωρίζοντας πως η αρχή της μεθόδου βασίζεται στις αποκρίσεις της κατασκευής σε διαταραχές που προκαλούνται από τον εξοπλισμό της, πολλές φορές παρατηρείται αδυναμία εντοπισμού φθορών εξαιτίας του θορύβου. Απαιτείται, λοιπόν επεξεργασία των δεδομένων για την εξάλειψη του θορύβου στο ληφθέν σήμα (Kot et al., 2021).

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

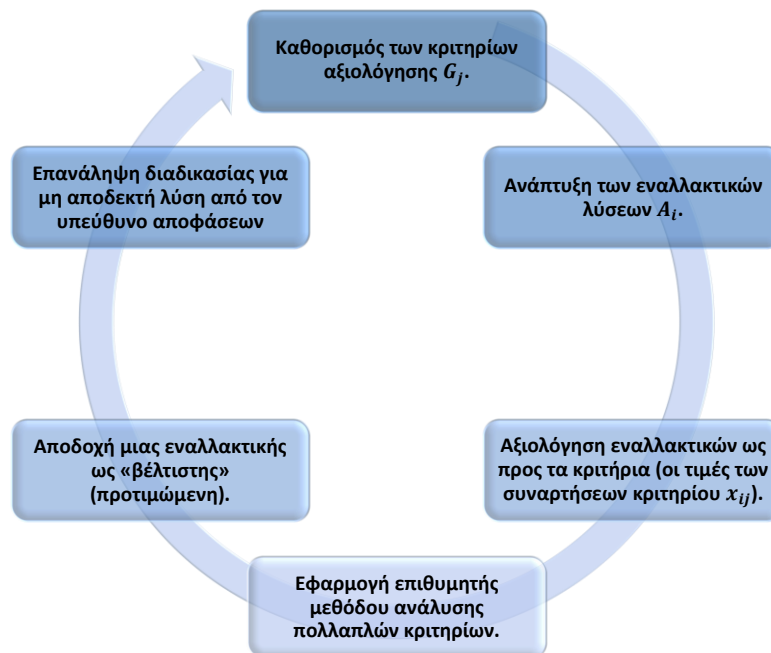
Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν κάποιες από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους για την εποπτεία και αξιολόγηση των λιμενικών έργων με έμφαση στις κατασκευές από σκυρόδεμα. Στόχος αποτελεί η επιλογή της πλέον κατάλληλης μεθόδου, σύμφωνα με την απόδοσή της σε διάφορες σημαντικές κατηγορίες. Οι τεχνολογίες που θα εξεταστούν πλέον θα καλούνται ως «εναλλακτικές», ενώ οι κατηγορίες ως «κριτήρια» (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013). Η επιλογή των εναλλακτικών και των κριτηρίων συνίσταται τόσο στη συνεχή παρουσία σε διεθνή βιβλιογραφία σχετικής θεματολογίας, όσο και στην προσπάθεια ένταξης σύγχρονων και υποσχόμενων πρακτικών παρακολούθησης στα λιμενικά έργα. Η πολλαπλότητα των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η εύρεση της βέλτιστης μεθόδου, καθώς και το γεγονός πως τα κριτήρια είναι κατά βάση αντικρουόμενα, κάνει την διαδικασία λήψης της ορθότερης απόφασης αρκετά περίπλοκη.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση, η οποία, διεθνώς απαντάται με τον όρο Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) αποτελεί το εργαλείο επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Βασίζεται στο κοινό εύρημα ότι στον πραγματικό κόσμο σπάνια χρησιμοποιείται ένα και μοναδικό κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση MCDA είναι αφιερωμένη στην ανάπτυξη κατάλληλων μεθοδολογιών για την υποστήριξη και τη βοήθεια των υπευθύνων λήψης αποφάσεων σε διάφορες καταστάσεις στις οποίες πρέπει να εξεταστούν ταυτόχρονα πολλοί αντιφατικοί παράγοντες (Spronk et al., 2016). Οι προσδοκίες του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων είναι να εντοπίσει μια εναλλακτική η οποία θα είναι η καλύτερη (βέλτιστη) σε όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα. Ωστόσο, είναι συνήθως αδύνατο να ικανοποιηθεί το σύνολο αυτών, διότι όπως προαναφέρθηκε, τα κριτήρια είναι λίγο πολύ αντιφατικά. Στόχος της MCDA είναι να προσδιορίσει τις βέλτιστες δυνατές συμβιβαστικές αποφάσεις σε ένα πρόβλημα (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013). Η μορφή ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί συνοπτικά να εκφραστεί μέσω του ακόλουθου μητρώου:

	g_1	g_2	...	g_j	...	g_m
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_m(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_m(a_2)$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
a_i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_m(a_i)$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_j(a_n)$	...	$g_m(a_n)$

όπου $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ είναι ένα σεν n εναλλακτικών ($i = 1, \dots, n$) μεταξύ των οποίων θα γίνει η επιλογή, $G = \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_m\}$ είναι ένα σύνολο m κριτηρίων (με $j = 1, \dots, m$) με βάση τα οποία αξιολογείται κάθε εναλλακτική, και $g_j(a_i)$ είναι ο βαθμός αξιολόγησης της εναλλακτικής a_i υπό το πρίσμα του εκάστοτε κριτηρίου g_j .

Τα βασικά βήματα μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα (Εικόνα 4.1).



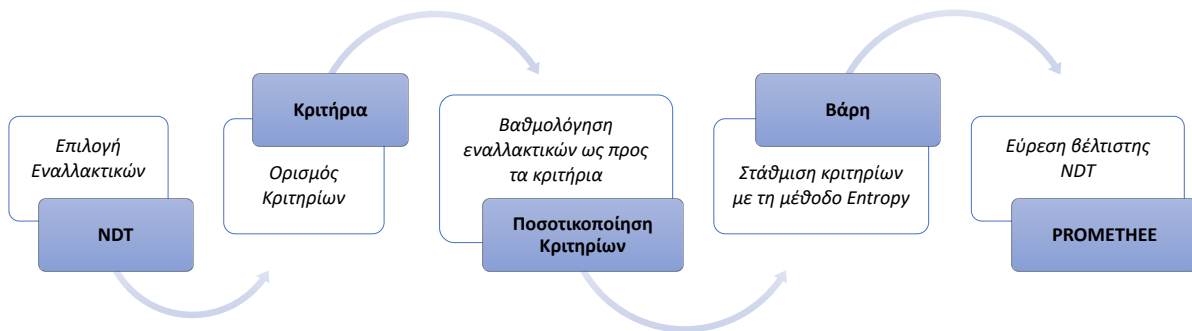
Εικόνα 4.1 Βήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης (Jahanshahloo et al., 2006).

Κατά την εφαρμογή της επιθυμητής μεθόδου MCDA, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων χρειάζεται να σταθμίσει τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί, δηλώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη σημαντικότητά τους. Η βαρύτητα των κριτηρίων προκύπτει είτε από τις προσωπικές προτιμήσεις του ιδίου ή από τις προτιμήσεις ειδικών, όπως προκύπτουν από ερωτηματολόγιο (Jahanshahloo et al., 2006).

Η πολυκριτηριακή ανάλυση διαθέτει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Κατά βάση ταξινομούνται σε πέντε κύριες κατηγορίες: στις μεθόδους βαθμολόγησης, στις μεθόδους με βάση την απόσταση, σε αυτές που βασίζονται σε σύγκριση κατά ζεύγη, στις μεθόδους κατάταξης και στις μεθόδους χρησιμότητας. Οι μέθοδοι βαθμολόγησης εφαρμόζουν άμεσα τη βασική αριθμητική για την εξεύρεση της προτιμότερης λύσης. Οι τεχνικές Simple Additive Weighting (SAW) και Complex Proportional Assessment (COPRAS) κατατάσσονται σε αυτήν την κατηγορία. Οι μέθοδοι με βάση την απόσταση οδηγούνται στην καλύτερη λύση αξιολογώντας την απόσταση αυτής από τη βέλτιστη και τη χειρότερη εναλλακτική. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι η Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) και η Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje ή διαφορετικά Multicriteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR). Άλλες τεχνικές, όπως η Analytic Hierarchy Process (AHP) ή η Analytic Network Process (ANP) συγκρίνουν τις εναλλακτικές κατά ζεύγη. Ενώ οι μέθοδοι κατάταξης Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE) και Elimination and Choice Expressing Reality Method (ELECTRE) βασίζουν την απόφαση στον καθορισμό ενός βαθμού κυριαρχίας μεταξύ των εναλλακτικών. Τέλος, η μέθοδος Multi Attribute Utility (MAUT) είναι ένα παράδειγμα πολυκριτηριακών μεθόδων που στηρίζονται σε βοηθητικά προγράμματα, τα οποία θεμελιώνουν την προτίμηση στον βαθμό ικανοποίησης που αναμένεται από κάθε εναλλακτική (Navarro et al., 2020).

4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PROMETHEE

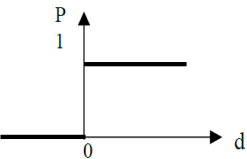
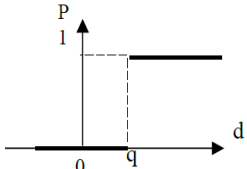
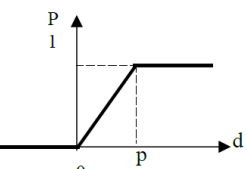
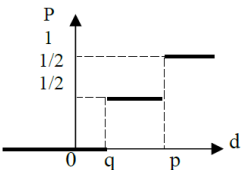
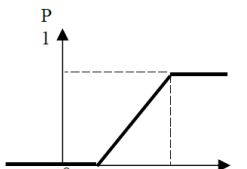
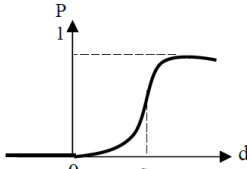
Στην παρούσα εργασία γίνεται εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE, η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον (Brans, 1982) και επεκτάθηκε περαιτέρω από τους (Brans & Vincke, 1985). Πρόκειται για μια μέθοδο υπεροχής η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα τη διερεύνηση βέλτιστων πρακτικών συντήρησης ή αποκατάστασης λιμενικών έργων (Tsaïmou et al., 2021a). Στοχεύει στην εύρεση της καταλληλότερης εναλλακτικής και στην ταξινόμησή των διαφόρων εναλλακτικών υπό το πρίσμα αντικρουόμενων κριτηρίων (Yang & Deuse, 2012, Spronk et al., 2016). Εξετάζει τις επιδόσεις των εναλλακτικών σε μια σειρά από σημαντικά, για το πρόβλημα, κριτήρια και συγκρίνει τις εναλλακτικές με βάση τις επιδόσεις. Η βαθμολόγηση των εναλλακτικών πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλης κλίμακας, η οποία μπορεί να είναι αριθμητική, νομισματική ή ποιοτική (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013). Η εκτέλεση της μεθόδου PROMETHEE στο παρόν πολυκριτηριακό πρόβλημα αφορά στα ακόλουθα βασικά βήματα. Πρώτα γίνεται η επιλογή των μεθόδων και των κριτηρίων για τα οποία θα γίνει η αξιολόγηση. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ποσοτικοποίηση και η στάθμιση των κριτηρίων αξιοποιώντας συνδυαστικά δεδομένα από την βιβλιογραφία και τη γνώμη ειδικών, όπως αυτή προκύπτει από τις γνώσεις και την εμπειρία τους. Τέλος, εφαρμόζεται το λογισμικό Visual PROMETHEE, από όπου εξάγεται η βέλτιστη τεχνολογία (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 Στάδια εφαρμογής μεθόδου PROMETHEE.

Βασικοί πυλώνες του PROMETHEE είναι ο καθορισμός της σχετικής προτίμησης των κριτηρίων με τη χρήση συναρτήσεων προτίμησης, ο προσδιορισμός της σχέσης κυριαρχίας μεταξύ των εναλλακτικών και η παροχή βοήθειας στη λήψη αποφάσεων μετά την κατάταξη των εναλλακτικών (Oubahman & Duleba, 2021). Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, δεν εφαρμόζει την ίδια κλίμακα αξιολόγησης και επίσης χρησιμοποιεί διαφορετικές συναρτήσεις προτίμησης για διαφορετικά χαρακτηριστικά αποφάσεων (Brans & Vincke, 1985, Podvezko & Podvezko, 2010). Όταν συγκρίνεται ένα ζεύγος εναλλακτικών (a, b) χρησιμοποιείται μια συνάρτηση προτίμησης (P) για να εκφράσει τη διαφορά του βαθμού προτίμησης (d) της a έναντι της b . Οι τιμές των P κυμαίνονται από 0 έως 1, με το άνω όριο να δηλώνει την ισχυρή προτίμηση της a σε σχέση με την b (Yang & Deuse, 2012). Οι Brans et al. (1986) αναφέρουν έξι βασικές συναρτήσεις προτίμησης (Πίνακας 4.1), όπου ο τύπος της συνάρτησης και οι τιμές κατωφλιού μπορούν να προσδιοριστούν από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, σύμφωνα με την προσωπική του οπτική (Oubahman & Duleba, 2021).

Πίνακας 4.1 Συναρτήσεις προτίμησης του PROMETHEE (Oubahman & Duleba, 2021).

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΠΡΟΤΙΜΗΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
	<p>Τύπος I: Κοινό Κριτήριο</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	--
	<p>Τύπος II: Κριτήριο U-καμπύλης</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$	q
	<p>Τύπος III: Κριτήριο V-καμπύλης</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p
	<p>Τύπος IV: Κριτήριο Επιπέδων</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{1}{2}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q
	<p>Τύπος V: Κριτήριο V-καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q
	<p>Τύπος VI: Κριτήριο Gauss</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}}, & d > 0 \end{cases}$	s



Κάθε συνάρτηση προτίμησης είναι κατάλληλη να εφαρμοστεί για συγκεκριμένη κατηγορία κριτηρίων. Για παράδειγμα, ο Τύπος I αποτελεί μια καλή επιλογή για ποιοτικά κριτήρια, συμπεριλαμβανομένου ενός μικρού αριθμού επιπέδων αξιολόγησης (όπως η συχνά χρησιμοποιούμενη κλίμακα 5 σημείων που κυμαίνεται από πολύ κακή έως πολύ καλή). Η λειτουργία της είναι πολύ απλή, καθώς δεν περιλαμβάνει κανένα κατώφλι και βασίζεται στη λογική ότι όσο μεγαλύτερη είναι μια τιμή τόσο το καλύτερο. Η συνάρτηση προτίμησης σχήματος U (Τύπος II) εισάγει την έννοια ενός κατωφλίου αδιαφορίας (q). Η συνάρτηση προτίμησης σχήματος V (Τύπος III) είναι μια ειδική περίπτωση της συνάρτησης Τύπου V, όπου το κατώφλι αδιαφορίας q είναι ίσο με 0. Είναι έτσι κατάλληλο για ποσοτικά κριτήρια όταν πρέπει να ληφθούν υπόψη ακόμη και μικρές αποκλίσεις. Από την άλλη, ο Τύπος IV συνάρτησης προτίμησης ταιριάζει καλύτερα σε ποιοτικά κριτήρια όταν ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων θέλει να διαμορφώσει τον βαθμό προτίμησης ανάλογα με την απόκλιση μεταξύ των επιπέδων αξιολόγησης. Όπως έχει προαναφερθεί η συνάρτηση Τύπου V αποτελεί επίσης μια καλή επιλογή για ποσοτικά κριτήρια. Συνήθως χαρακτηρίζεται και ως η καλύτερη επιλογή για αυτή την κατηγορία κριτηρίων όταν επιθυμείται ένα όριο αδιαφορίας (q). Τέλος, η συνάρτηση προτίμησης Gauss είναι μια εναλλακτική λύση έναντι της συνάρτησης Τύπου V. Έχει πιο ομαλό σχήμα, αλλά είναι πιο δύσκολο να δημιουργηθεί επειδή βασίζεται σε ένα μόνο κατώφλι (s) που βρίσκεται μεταξύ των ορίων q και p και έχει μια λιγότερο προφανή ερμηνεία. Ωστόσο, χρησιμοποιείται σπάνια στην πράξη (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013).

Ανάλογα με τον τύπο της συνάρτησης που επιλέγεται προσδιορίζονται το πολύ δύο τιμές κατωφλιών.

- (1) q : το κατώφλι αδιαφορίας
- (2) p : το κατώφλι προτίμησης
- (3) s : το κατώφλι Gauss

Το κατώφλι αδιαφορίας q είναι η μεγαλύτερη απόκλιση που μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Για να προσδιοριστεί η τιμή του q θα πρέπει αρχικά να ληφθεί μια πολύ μικρή απόκλιση (για παράδειγμα λίγα ευρώ) της υπό εξέταση τιμής του εκάστοτε κριτηρίου, η οποία στη συνέχεια θα αυξηθεί προοδευτικά έως ότου πάψει να είναι αμελητέα. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το q είναι ακριβώς κάτω από αυτήν την πρώτη σημαντική τιμή. Το κατώφλι προτίμησης p είναι η μικρότερη απόκλιση που θεωρείται επαρκής για τη δημιουργία ισχυρής προτίμησης. Σε αντίθεση με το κατώφλι q , λαμβάνεται υπόψη μια πολύ μεγάλη αρχική απόκλιση (για παράδειγμα αρκετές χιλιάδες ευρώ) ώστε να προκύψει η τιμή του p , η οποία σταδιακά μειώνεται μέχρι να εμφανιστεί σε κάποιο όριο. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως το κατώφλι p είναι ελαφρώς πάνω από αυτήν την τελευταία τιμή. Όσον αφορά το κατώφλι Gauss (s), αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της καμπύλης Gauss (παρόμοια με την τυπική απόκλιση στη στατιστική). Πρόκειται, επομένως, για μια απόκλιση όπου ο βαθμός προτίμησης είναι 0.39, οπότε βρίσκεται μεταξύ της τιμής q και της p . Ωστόσο, η τιμή αυτού το κατωφλιού είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί. Ένας βασικός κανόνας που συνήθως ακολουθείται είναι η εύρεση του μέσου όρου των κατωφλιών q , p όταν αυτές είναι γνωστές (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013).

$$s = \frac{q + p}{2} \quad (4.1)$$

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο PROMETHEE για την πολυκριτηριακή ανάλυση εμπεριέχουν διάφορες εκδοχές οι οποίες διακρίνονται με βάση των τρόπο που πραγματοποιείται η κατάταξη, με τις πιο συνήθεις να είναι το PROMETHEE I και το PROMETHEE II. Το PROMETHEE I προσφέρει μερική κατάταξη των διαθέσιμων εναλλακτικών, σε αντίθεση με το PROMETHEE II που παρέχει μια πλήρη κατάταξη, από την περισσότερο προς τη λιγότερο προτιμητέα (Brans, 1982). Μια τρίτη εκδοχή είναι το PROMETHEE GAIA (Geometric Analysis for Interactive Aid) που επιτρέπει την γραφική απεικόνιση της βασικής λύσης και διευκολύνει την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κριτηρίων (Oubahman & Duleba, 2021). Και οι τα τρία εργαλεία εμπεριέχονται στο λογισμικό Visual PROMETHEE (Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013) το οποίο και χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη διπλωματική.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE για την εύρεση της βέλτιστης εναλλακτικής στο υπό εξέταση πολυκριτηριακό πρόβλημα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, έχοντας ως δεδομένο ένα σύνολο m κριτηρίων $G = \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_m\}$, με $j = 1, \dots, m$, κι ένα σετ εναλλακτικών $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$, όπου $i = 1, \dots, n$, προκύπτει η τιμή $g_j(a_i)$ που εκφράζει την αξιολόγηση της εναλλακτικής a_i σύμφωνα με το κριτήριο g_j . Για δεδομένο σετ εναλλακτικών A η διαδικασία αξιολόγησης του PROMETHEE περιλαμβάνει συγκρίσεις κατά ζεύγη, έστω (a_1, a_2) , υπό το πρίσμα κάποιου κριτηρίου και με σκοπό την ταξινόμησή τους. Το εύρος της απόκλισης d_j που βασίζεται στην σύγκριση του ζεύγους των εναλλακτικών σε σχέση με το j -οστό κριτήριο υπολογίζεται ως εξής:

$$d_j(a_1, a_2) = g_j(a_1) - g_j(a_2), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

όπου ο δείκτης j δηλώνει το κριτήριο και m ο πεπερασμένος αριθμός κριτηρίων.

Η προτίμηση μεταξύ δύο εναλλακτικών για ένα κριτήριο j προκύπτει με τη βοήθεια των συναρτήσεων προτίμησης P_j (βλέπε Πίνακα 4.1). Σε περίπτωση μεγιστοποιημένης προτίμησης ισχύει

$$P_j(a, a) = F_j[d_j(a, a_2)], \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.3)$$

ενώ σε περίπτωση ελαχιστοποιημένης προτίμησης έχουμε

$$P_j(a_1, a_2) = F_j[-d_j(a_1, a_2)], \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.4)$$

όπου ο δείκτης j δηλώνει το κριτήριο και m ο πεπερασμένος αριθμός κριτηρίων. Όπως καταγράφηκε και προγενέστερα, οι συναρτήσεις προτίμησης ομαλοποιούνται μεταξύ 0 και 1, με τις υψηλότερες τιμές να δείχνουν ισχυρότερη προτίμηση της a_1 έναντι της a_2 όσον αφορά το κριτήριο g_j , ενώ με τις χαμηλότερες να αποτυπώνεται η ισχνή προτίμηση της εναλλακτικής a_1 σε σχέση με την a_2 .

$$0 \leq P_j(a_1, a_2) \leq 1 \quad (4.5)$$

Επόμενο στάδιο αποτελεί η εισαγωγή των συντελεστών βαρύτητας w_j στη μέθοδο PROMETHEE για κάθε κριτήριο j , όπως προκύπτουν από βιβλιογραφικές αναφορές ή/και από τις απόψεις ειδικών. Οι συντελεστές βαρύτητας υποδηλώνουν τη σημασία κάθε κριτηρίου στο πολυκριτηριακό πρόβλημα. Υψηλότερες τιμές της βαρύτητας σημαίνουν μεγαλύτερη σημαντικότητα του κριτηρίου στο οποίο αφορούν. Στην περίπτωση ίσων βαρών εξετάζεται η περίπτωση ισοβαρούς ανάλυσης ενός προβλήματος, ενώ στην περίπτωση ποικίλων βαρών στα κριτήρια εξετάζεται η ανισοβαρής ανάλυση.

Σε οποιαδήποτε θεώρηση οι τιμές του συνόλου των βαρών πρέπει να ικανοποιούν πάντα τον περιορισμό

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad w_j \geq 0 \quad (4.6)$$

Τελευταίο στάδιο αποτελεί η εύρεση του δείκτη προτίμησης $\pi(\alpha_1, \alpha_2)$, που μετρά τον βαθμό ολικής προτίμησης της εναλλακτικής α_1 σε σχέση με την α_2 ως προς όλα τα j κριτήρια,

$$\pi(\alpha_1, \alpha_2) = \sum_{j=1}^m w_j \times P_j(\alpha_1, \alpha_2) \in [0,1] \quad (4.7)$$

Όταν η τιμή του δείκτη προτίμησης είναι μηδενική, σημαίνει πως όλες οι τιμές των συναρτήσεων προτίμησης $P_j(\alpha_1, \alpha_2)$ είναι ίσες με 0. Επομένως, η εναλλακτική α_1 δεν προτιμάται ούτε στο ελάχιστο από την α_2 σε κανένα κριτήριο. Ενώ, όταν το $\pi(\alpha_1, \alpha_2)$ ισούται με τη μονάδα, τότε όλες οι τιμές των $P_j(\alpha_1, \alpha_2)$ είναι επίσης ίσες με 1. Το γεγονός αυτό δηλώνει την έντονη προτίμηση της α_1 έναντι της α_2 σε όλα τα κριτήρια. Εν γένει, όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης προτίμησης, τόσο υψηλότερη είναι η ισχύς προτίμησης μιας εναλλακτικής σε σχέση με μια άλλη. Κάποιες από τις ιδιότητες που ισχύουν είναι οι παρακάτω

$$\begin{cases} \pi(a_i, a_i) = 0 \\ 0 \leq \pi(a_i, a_i) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a_i, a_k) + \pi(a_k, a_i) \leq 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

όπου η εναλλακτική με δείκτη k αποτελεί μέρος των m εναλλακτικών λύσεων.

Εφαρμόζοντας την διαδικασία για κάθε πιθανό ζεύγος των m εναλλακτικών, μπορούν να καθοριστούν δύο τρόποι μέτρησης της συνολικής απόδοσης. Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται ροή εξόδου ή θετική ροή, και δίνεται από τη σχέση

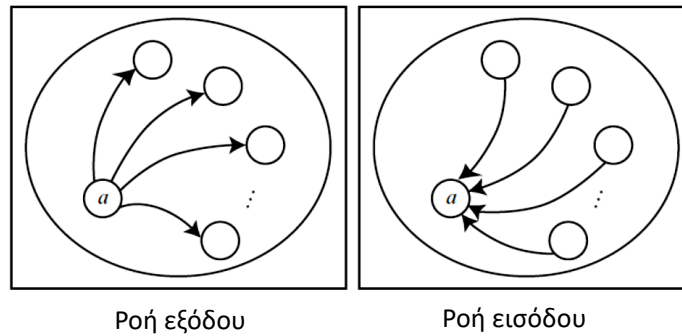
$$\varphi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a_i, x) \quad (4.9)$$

Ο τρόπος αυτός παρουσιάζει την υπεροχή της εναλλακτικής a_i ως προς τις υπόλοιπες x εναλλακτικές στο σύνολο A (Εικόνα 4.3, αριστερά). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική i , αφού λαμβάνει υπόψη τα θετικά σημεία της.

Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται η ροή εισόδου ή αρνητική ροή,

$$\varphi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a_i, x) \quad (4.10)$$

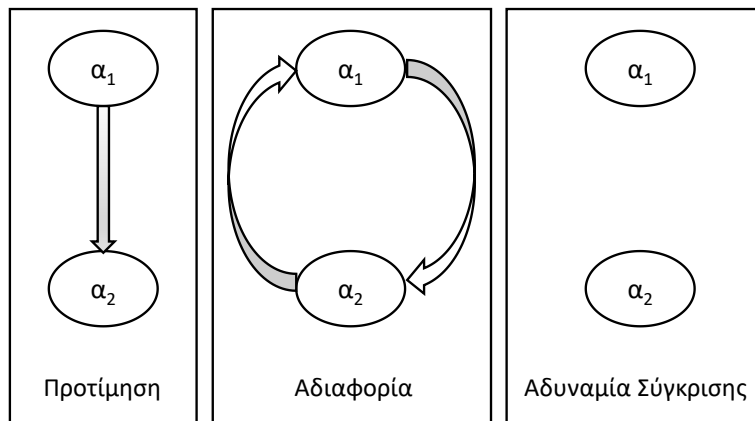
και εκφράζει την υπεροχή όλων των υπόλοιπων x εναλλακτικών έναντι της a_i (Εικόνα 4.2, δεξιά). Όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική i , μιας και βασίζεται στα αρνητικά στοιχεία της a_i .



Εικόνα 4.3 Ροές εισόδου και εξόδου στο PROMETHEE (Brans & De Smet, 2016).

Κατά τη φάση σύγκρισης των εναλλακτικών ανά ζεύγη μπορούν να προκύψουν τρεις καταστάσεις μεταξύ τους. Ειδικότερα, αφορούν στην προτίμηση της μιας έναντι της άλλης, στην αδιαφορία μεταξύ των δύο και στην αδυναμία σύγκρισης (Εικόνα 4.4). Κάθε μια από αυτές τις σχέσεις εντοπίζεται κατά τη φάση εφαρμογής του PROMETHEE I με τη βοήθεια των δεικτών θετικής και αρνητικής ροής. Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- (1) Προτίμηση: $\varphi^+(\alpha_1) > \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) < \varphi^-(\alpha_2)$ ή
 $\varphi^+(\alpha_1) > \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) = \varphi^-(\alpha_2)$ ή
 $\varphi^+(\alpha_1) = \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) < \varphi^-(\alpha_2)$
- (2) Αδιαφορία: $\varphi^+(\alpha_1) = \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) = \varphi^-(\alpha_2)$
- (3) Αδυναμία Σύγκρισης: $\varphi^+(\alpha_1) > \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) > \varphi^-(\alpha_2)$ ή
 $\varphi^+(\alpha_1) < \varphi^+(\alpha_2)$ και $\varphi^-(\alpha_1) < \varphi^-(\alpha_2)$



Εικόνα 4.4 Πιθανές καταστάσεις προτίμησης μεταξύ ενός ζεύγους εναλλακτικών.

Οι μέθοδοι PROMETHEE I και II χρησιμοποιούν αυτούς τους δύο τρόπους για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων με βάση τη σχέση υπεροχής τους (Brans & Vincke, 1985). Το PROMETHEE I δημιουργεί μια συγκριτική μερική κατάταξη των εναλλακτικών η οποία βασίζεται στις επιμέρους

κατατάξεις όπως προκύπτουν από τις ροές εισόδου και εξόδου. Από την άλλη πλευρά, το PROMETHEE II παρέχει μια πλήρη κατάταξη με βάση τον δείκτη καθαρής ροής

$$\varphi(a_i) = \varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i) \quad (4.11)$$

ο οποίος αποτελεί έναν δείκτη συνολικής απόδοσης των εναλλακτικών λύσεων (Yang & Deuse, 2012, Spronk et al., 2016, Oubahman & Duleba, 2021). Ουσιαστικά, λαμβάνει υπόψη τόσο τα δυνατά όσο και τα αδύνατα σημεία της εναλλακτικής και τα συγκεντρώνει σε μια μόνο βαθμολογία, θετική ή αρνητική. Όσο μεγαλύτερο είναι το $\varphi(a_i)$ τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική.

Σε πραγματικές εφαρμογές, συνιστάται σε αναλυτές και υπευθύνους λήψης αποφάσεων η εξέταση τόσο του PROMETHEE I όσο και του PROMETHEE II. Η πλήρης κατάταξη είναι εύκολη στη χρήση, αλλά η ανάλυση των ασύγκριτων στοιχείων που πιθανό να εμφανιστούν κατά την εφαρμογή του PROMETHEE I και της μερικής κατάταξης των εναλλακτικών, βοηθά στην οριστικοποίηση μιας σωστής απόφασης (Brans & De Smet, 2016).

4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ

Πλήθος ερευνών έχει πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση και κατάταξη των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων ως τεχνικές παρακολούθησης των υποδομών σκυροδέματος (Yehia et al., 2007, Oh et al., 2013a, Gucunski et al., 2014, Lee & Kalos, 2015, Omar & Nehdi, 2016, Omar et al., 2017, Hesse et al., 2017, O'Byrne et al., 2019, Kušar et al., 2018, Abdelkhalik & Zayed, 2021). Η αξιολόγηση αυτή συνίσταται στην απόδοσή τους σε έναν αριθμό κριτηρίων. Ο τρόπος καταγραφής της επίδοσης κάθε μεθόδου μπορεί να αποτυπωθεί με ποιοτικό ή ποσοτικό τρόπο (Abdelkhalik & Zayed, 2021). Ποιοτική θεωρείται η βαθμολόγηση των εναλλακτικών ενός προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από υφιστάμενες βιβλιογραφικά έρευνες και από τις προσωπικές απόψεις ειδικών στο αντικείμενο (Yehia et al., 2007, Omar & Nehdi, 2016, Hesse et al., 2017, Abdelkhalik & Zayed, 2021). Ποσοτικός θεωρείται ο τρόπος αξιολόγησης που προκύπτει ύστερα από την διεξαγωγή εργαστηριακών μετρήσεων και μετρήσεων στο πεδίο (Oh et al., 2013a, Gucunski et al., 2014). Τα κριτήρια που εξετάζονται σε κάθε έρευνα πολλές φορές ποικίλουν. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης καταγραφή των σημαντικότερων κριτηρίων.

Μια από τις καίριες βιβλιογραφίες πάνω στην οποία βασίστηκαν αρκετές μεταγενέστερες έρευνες αποτελεί εκείνη των Yehia et al. (2007). Η εργασία τους αναφέρεται στην αξιολόγηση γεφυρών μέσω σημαντικών τεχνολογιών, όπως αυτές προέκυψαν από ερωτηματολόγιο που διανεμήθηκε σε Υπουργεία Μεταφορών πενήντα Πολιτειών της Αμερικής. Από το σύνολο των υπουργείων μόνο 3 στα 10 χρησιμοποιούσαν Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους για την εποπτεία γεφυρών. Τα κριτήρια που προτάθηκαν και για τα οποία αξιολογήθηκαν μέθοδοι, όπως το Γεωραντάρ (GPR), η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και η Δοκιμή Κρούση-Ηχώ (IE) είναι η ταχύτητα εφαρμογής της μεθόδου, τα αποτελέσματά της, η φύση της μεθόδου, το βάθος εντοπισμού φθορών και η ακρίβειά του, η δυνατότητα ανίχνευσης επιφανειακών φθορών, η ανάγκη προετοιμασίας του επιθεωρούμενου μέλους, το πιθανό κλείσιμο λωρίδας κυκλοφορίας και το κόστος εξοπλισμού. Επόμενες βιβλιογραφίες χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια. Για παράδειγμα, οι Oh et al. (2013a) εκτίμησαν την απόδοση τριών μεθόδων για την αξιολόγηση γέφυρας υπό το πρίσμα των κριτηρίων κόστους



(κεφαλαίου, λειτουργικό), χρόνου (εφαρμογής μεθόδου, ανάλυσης δεδομένων), επιρροής συνθηκών πεδίων (περιβαλλοντικές συνθήκες, θόρυβος πεδίου), εξειδίκευσης χειριστή, αντικειμενικότητας και επαναληψιμότητας, προετοιμασίας επιφάνειας, διακοπής λωρίδας κυκλοφορίας, ακρίβειας εντοπισμού φθορών, βάρους και μεγέθους εξοπλισμού. Η βαθμολόγησή τους προέκυψε με ποσοτικό τρόπο, έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές και από μετρήσεις στο πεδίο. Από την άλλη, οι Lee & Kalos (2015) αρέστηκαν στην εξέταση του κριτηρίου της αποτελεσματικότητας, της δυσκολίας εφαρμογής και της απόδοσης κάθε μεθόδου σε ένα πλήθος δεκάξι Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων. Κάθε μια μέθοδος αξιολογήθηκε ποιοτικά με τη χρήση ερωτηματολογίου που απευθυνόταν επίσης στα Υπουργεία Μεταφορών των Η.Π.Α. Ο βαθμός απόκρισης στην έρευνα αυτή θεωρήθηκε αρκετά ικανοποιητικός, καθώς απάντησαν 40 από τις 52 πολιτείες και επικράτειες της Αμερικής.

Οι O'Byrne et al. (2019) πρότειναν κριτήρια με τα οποία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της απόδοσης των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στην εποπτεία των λιμενικών υποδομών, και πιο συγκεκριμένα των υποθαλάσσιων κατασκευών. Επιγραμματικά τα κριτήρια αυτά αφορούν στο κόστος, στην ευαισθησία του εξοπλισμού, στην ασφάλεια υποβρύχιας χρήσης του, στην φορητότητα, στην ταχύτητα, στην κάλυψη, δηλαδή στην ικανότητα αξιολόγησης μεγαλύτερων τμημάτων με αποτελεσματικότητα, στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, στην ευκολία λειτουργίας, στην ανάγκη για εκπαίδευση των χειριστών και στην ευελιξία, η οποία συνεπάγεται τη δυνατότητα του εξοπλισμού να εντοπίζει ποικίλες μορφές φθορών. Άλλες βιβλιογραφίες εργάζονται με τα κριτήρια του κόστους, της διάρκειας της μεθόδου, της αξιοπιστίας και της πολυπλοκότητας εξαγωγής των αποτελεσμάτων, της ύπαρξης προτύπου για τη διεξαγωγή των μετρήσεων διότι υποδηλώνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, και της χρηστικότητας (Kušar et al., 2018). Τα κριτήρια της συγκεκριμένης βιβλιογραφίας καθώς και η απόδοση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων σε αυτά, έχουν προκύψει ύστερα από έρευνα σχετικών εργασιών, αλλά και από εκτιμήσεις μελών του ευρωπαϊκού επιστημονικού προγράμματος COST Action TU1406. Το πρόγραμμα αυτό εξετάζει τις προδιαγραφές ποιότητας των γεφυρών και την ύπαρξη προτύπων σε ευρωπαϊκό επίπεδο (COST, 2014). Πέραν τούτου, έρευνες που πραγματοποιούν και εργαστηριακές δοκιμές αναφέρουν το ποσοστό διακύμανσης των μετρήσεων από τις πραγματικές τιμές (bias), την ακρίβεια, την αξιοπιστία και το μέσο κόστος ως παραμέτρους (Hesse et al., 2017).

Πολλές εργασίες εισήγαγαν την εξέταση και υποκριτηρίων πέραν των βασικών κριτηρίων στην αξιολόγηση των τεχνολογιών. Αυτό αποσκοπεί σε μια εκτενέστερη και με μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρηση της επίδοσης των μεθόδων στα κυρίως κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, οι Gucunski et al. (2014) ύστερα από δεδομένα που συλλέχθηκαν από γέφυρα της περιοχής Haymarket στη Βιρτζίνια των Ηνωμένων Πολιτειών, καθώς και εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δύο δοκίμια στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, αξιολόγησαν εννέα Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους. Δέκα ομάδες καταρτισμένων ανθρώπων από τον ακαδημαϊκό, βιομηχανικό και κυβερνητικό χώρο εξέτασαν τεχνολογίες, όπως η Υπέρυθρη Θερμογραφία, το Γεωραντάρ και η Μέθοδος Υπερήχων ως προς έξι κριτήρια και δεκατρία υποκριτήρια. Το πρώτο κριτήριο αφορά στην ακρίβεια, και αναλύεται στην ακρίβεια με την οποία μπορεί κάθε τεχνολογία να ανιχνεύσει την παρουσία φθοράς, τη δυνατότητα εντοπισμού της στην αρχή δημιουργίας της και την ικανότητα διάκρισης μεταξύ των σταδίων που βρίσκονται οι φθορές (πρώιμο ή σοβαρό για την κατασκευή). Ως δεύτερο κριτήριο ορίζεται η ταχύτητα, η οποία εξετάζεται με βάση την ταχύτητα συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων. Επόμενο είναι η ευκολία στη χρήση μιας μεθόδου. Συνίσταται, πρώτον, από την ευκολία συλλογής



δεδομένων, δηλαδή από την εμπειρογνομosύνη και το πλήθος των χειριστών, την ευκολία ελιγμών και την προσπάθεια που απαιτείται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού. Δεύτερον, αφορά στην εμπειρογνομosύνη που χρειάζεται για την ανάλυση των δεδομένων και τρίτον, στην δυνατότητα αυτοματοποίησης της εκάστοτε τεχνολογίας. Το κόστος είναι ένα ακόμη κριτήριο και απαρτίζεται από τα υποκριτήρια του κόστους εξοπλισμού, συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Τελευταίο κριτήριο στη συγκεκριμένη έρευνα θεωρείται η επαναληψιμότητα, που προσδιορίζεται από τις επαναλήψεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου για την απόκτηση των ακατέργαστων δεδομένων, καθώς και τις επαναληπτικές διαδικασίες για την ανάλυσή τους, με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Οι Omar & Nehdi (2016) έχουν επίσης ενσωματώσει υποκριτήρια στα κριτήριά τους για την αξιολόγηση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων. Πέραν του κριτηρίου του κόστους, το οποίο εξετάζεται με τον ίδιο τρόπο ως προς τα υποκριτήριά του, αναλύονται διαφορετικά κριτήρια και υποκριτήρια συγκριτικά με εκείνα των Gucunski et al. (2014). Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το κριτήριο της ταχύτητας με βάση την ταχύτητα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων και της δυνατότητας αυτοματισμού. Επιπρόσθετα, περιγράφεται το κριτήριο της απλότητας ως προς τη σημασία ύπαρξης έμπειρου χειριστή, έμπειρου αναλυτή και ως προς τις επιπτώσεις του περιβάλλοντος και της κυκλοφορίας στη συλλογή δεδομένων, καθώς επίσης και το κριτήριο της ακρίβειας, λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια με την οποία κάθε μέθοδος εντοπίζει τη θέση, το βάθος και τη σοβαρότητα της φθοράς. Τέλος, παρουσιάζεται το κριτήριο της ικανότητας εντοπισμού ενός τύπου φθοράς, δηλαδή της δυνατότητας ανίχνευσης της εσωτερικής αποκόλλησης, της εσωτερικής ρηγμάτωσης και της διάβρωσης του σπλισμού. Η επίδοση των έξι τεχνολογιών που εξετάζονται βασίστηκε σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε και στην οποία έλαβαν μέρος ειδικοί και σύμβουλοι στις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους, ερευνητές και Υπουργεία Μεταφορών του Καναδά και των ΗΠΑ. Όλα τα στοιχεία προκύπτουν από τις 27 απαντήσεις που συλλέχθηκαν σε ένα σύνολο 35 ειδικών.

Μεταγενέστερες αναφορές ακολουθούν επίσης το ίδιο μοτίβο αξιολόγησης. Η πιο πρόσφατη από αυτές αφορά στην παρακολούθηση γεφυρών με τη βοήθεια οχτώ μεθόδων επισκόπησης (Abdelkhalik & Zayed, 2021). Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, 65 ειδικοί (ακαδημαϊκοί, σύμβουλοι και μέλη του κυβερνητικού χώρου) από επτά διαφορετικές χώρες (ΗΠΑ, Καναδάς, Χόνγκ Κόνγκ, Κίνα, Ιαπωνία, Νότια Κορέα και Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) κλήθηκαν να εκτιμήσουν την απόδοση μεθόδων, όπως το Γεωραντάρ, τη Φωτογραμμετρία και την Υπέρυθρη Θερμογραφία μέσω κατάλληλου ερωτηματολογίου. Οι 24 εξ αυτών-τουλάχιστον ένας από κάθε χώρα-έκριναν τις τεχνολογίες βάσει πέντε κριτηρίων (ικανότητα ανίχνευσης φθορών, απόδοση κάτω από διαφορετικά περιβάλλοντα, ευκολία χρήσης, κόστος και ταχύτητα), δεκατριών υποκριτηρίων και σαράντα παραμέτρων. Το σύνολο των κριτηρίων, υποκριτηρίων και παραμέτρων αναλύονται διεξοδικά στη βιβλιογραφία αυτή. Αποτελεί, ίσως, την πληρέστερη μέχρι στιγμής έρευνα για την αξιολόγηση των Μη Καταστρεπτικών τεχνολογιών στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των γεφυρών.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα κριτήρια και τα υποκριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διεθνείς βιβλιογραφίες για την αξιολόγηση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων ως τεχνικές παρακολούθησης έργων από σκυρόδεμα (Πίνακας 4.2).



Πίνακας 4.2 Σύνολο κριτηρίων και υποκριτηρίων στη διεθνή βιβλιογραφία.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΥΠΟΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
Ικανότητα Ανίχνευσης Φθορών	<ul style="list-style-type: none">• Επιφανειακές Φθορές• Ανίχνευση Επιφανειακών Ρωγμών• Αποκόλληση• Ικανότητα Ανίχνευσης Εσωτερικής Ρηγμάτωσης• Υποβάθμιση Σκυροδέματος• Διάβρωση	Abdelkhalek & Zayed (2021) Omar & Nehdi (2016) Yehia et al. (2007)
Ταχύτητα-Διάρκεια	<ul style="list-style-type: none">• Ταχύτητα Συλλογής Δεδομένων• Ταχύτητα Ανάλυσης Δεδομένων• Αυτοματισμός	Abdelkhalek & Zayed (2021) Kušar et al. (2018) O'Byrne et al. (2019) Omar & Nehdi (2016) Gucunski et al. (2014) Oh et al. (2013a) Yehia et al. (2007)
Κόστος	<ul style="list-style-type: none">• Κόστος Συλλογής Δεδομένων• Κόστος Εξοπλισμού• Κόστος Ανάλυσης Δεδομένων• Κόστος Κεφαλαίου• Λειτουργικό Κόστος	Abdelkhalek & Zayed (2021) Kušar et al. (2018) O'Byrne et al. (2019) Hesse et al. (2017) Omar & Nehdi (2016) Gucunski et al. (2014) Oh et al. (2013a) Yehia et al. (2007)



ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΥΠΟΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
Ακρίβεια	<ul style="list-style-type: none">Ακρίβεια Θέσης ΦθοράςΑκρίβεια Βάθους ΦθοράςΑκρίβεια Σοβαρότητας ΦθοράςΑκρίβεια Εντοπισμού της Έκτασης της ΦθοράςΑκρίβεια Εντοπισμού της Απαρχής της Φθοράς	Omar & Nehdi (2016) Hesse et al. (2017) Gucunski et al. (2014) Oh et al. (2013a) Yehia et al. (2007)
Ευκολία στη Χρήση	<ul style="list-style-type: none">Ευκολία στη Συλλογή ΔεδομένωνΕυκολία στην Ανάλυση ΔεδομένωνΔυνατότητα ΑυτοματισμούΔυσκολία Εφαρμογής της ΜεθόδουΠολυπλοκότητα Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	Abdelkhalek & Zayed (2021) O'Byrne et al. (2019) Kušar et al. (2018) Gucunski et al. (2014)
Απλότητα	<ul style="list-style-type: none">Εξειδίκευση ΧειριστήΕξειδίκευση ΑναλυτήΕκπαίδευσηΕπιρροή των Συνθηκών Πεδίου	O'Byrne et al. (2019) Omar & Nehdi (2016) Oh et al. (2013a)
Αξιοπιστία	<ul style="list-style-type: none">Αξιοπιστία ΑποτελεσμάτωνΠοσοστό Διακύμανσης από Πραγματική Τιμή (Bias)	Kušar et al. (2018) O'Byrne et al. (2019) Hesse et al. (2017)
Επαναληψιμότητα	<ul style="list-style-type: none">Επαναληψιμότητα κατά την Συλλογή ΔεδομένωνΕπαναληψιμότητα κατά την Εξαγωγή των Αποτελεσμάτων	Gucunski et al. (2014) Oh et al. (2013a)
Αποδοτικότητα κάτω από Διαφορετικά Περιβάλλοντα	<ul style="list-style-type: none">Αποδοτικότητα σε Διαφορετικές ΕπικαλύψειςΣυνέπειαΕυαισθησία	Abdelkhalek & Zayed (2021) O'Byrne et al. (2019)



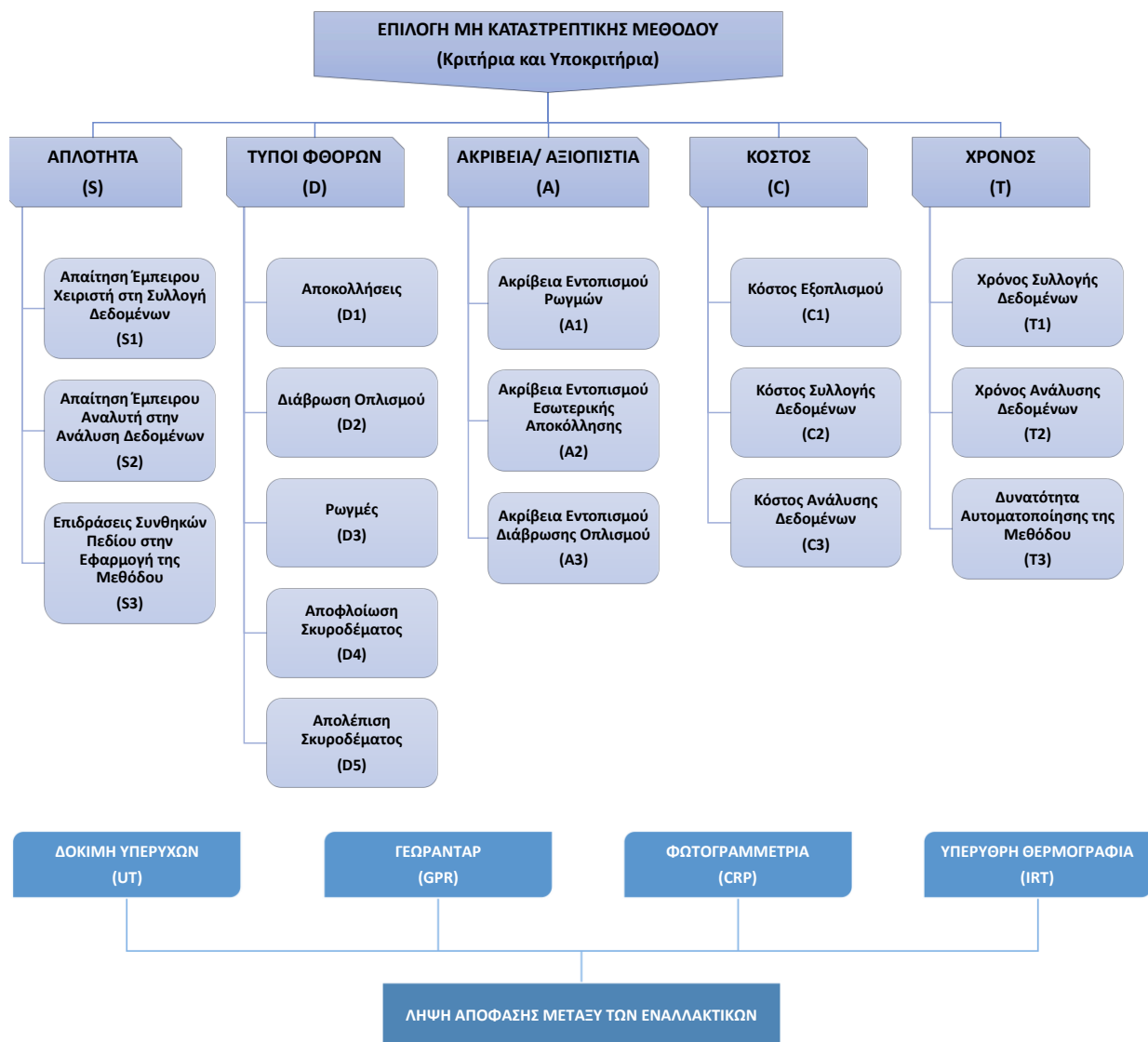
ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΥΠΟΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
Προετοιμασία Επιφάνειας		Oh et al. (2013a) Yehia et al. (2007)
Κλείσιμο Λωρίδας Κυκλοφορίας		Oh et al. (2013a) Yehia et al. (2007)
Προτυποποίηση		Kušar et al. (2018)
Χρηστικότητα		Kušar et al. (2018)
Φορητότητα		O'Byrne et al. (2019)
Κάλυψη		O'Byrne et al. (2019)
Ευελιξία		O'Byrne et al. (2019)
Ασφάλεια		O'Byrne et al. (2019)
Αποτελεσματικότητα		Lee & Kalos (2015)
Δείκτης Απόδοσης		Lee & Kalos (2015)
Βάρος & Μέγεθος Εξοπλισμού		Oh et al. (2013a)

Με γνώμονα τα υφιστάμενα κριτήρια και την συχνότητα με την οποία αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επίδοσης των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στην παρακολούθηση των υποδομών σκυροδέματος, προκύπτουν οι παράμετροι των μεθόδων εποπτείας των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος. Τα πέντε επιλεγμένα κριτήρια για την βαθμολόγηση των τεχνολογιών είναι: η απλότητα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, οι τύποι των φθορών που μπορούν να εντοπιστούν στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της κατασκευής, η ακρίβεια/ αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, το κόστος συλλογής και ανάλυσης δεδομένων καθώς και ο χρόνος συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Τα κριτήρια αυτά ερμηνεύονται ως προς συγκεκριμένες συνιστώσες (υποκριτήρια). Ειδικότερα, η απλότητα αφορά στην αξιολόγηση των τεχνολογιών σε σχέση με τη σημαντικότητα ύπαρξης έμπειρου χειριστή και αναλυτή, καθώς και με το βαθμό επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών και των συνθηκών πεδίου. Οι τύποι φθορών αναφέρονται στον αριθμό των ελαττωμάτων που ανιχνεύει κάθε μέθοδος. Οι συνήθεις μορφές φθορών που υφίστανται σε κατασκευές σκυροδέματος και εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- (1) Αποκολλήσεις
- (2) Διάβρωση Οπλισμού
- (3) Ρωγμές
- (4) Αποφλοίωση Σκυροδέματος
- (5) Απολέπιση Σκυροδέματος

Στο κριτήριο της ακρίβειας/ αξιοπιστίας οι μέθοδοι αξιολογούνται ως προς την ακρίβεια με την οποία εντοπίζουν τρεις από τις σημαντικότερες φθορές, τις εσωτερικές αποκολλήσεις, της διάβρωση του χάλυβα οπλισμού και τις ρωγμές. Το σκεπτικό πίσω από τον περιορισμό των τύπων φθορών σε τρεις μόνο κατηγορίες είναι πως ανιχνεύονται με περισσότερη ευκολία από τις μεθόδους και πως πιστεύεται ότι απασχολούν περισσότερο τους οργανισμούς μεταφορών (Omar & Nehdi, 2016). Το κόστος εξετάζεται με βάση το κόστος συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων, αλλά και με βάση το κόστος αγοράς των οργάνων κάθε μέθοδο. Τέλος, ο χρόνος αντιπροσωπεύει την ταχύτητα με την οποία οι τεχνολογίες συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα, και τη σημασία ύπαρξης μιας διαδικασίας αυτοματισμού. Όλα τα κριτήρια κωδικοποιούνται στην Εικόνα 4.5, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της μετέπειτα ανάλυσης.

Στο υποκεφάλαιο 2.2.2 περιεγράφηκαν ποικίλες τεχνικές για την παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών. Ωστόσο, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση τεσσάρων τεχνολογιών: (α) την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), (β) τη Δοκιμή Υπερήχων (UT), (γ) το Γεωραντάρ (GPR) και (δ) τη Φωτογραμμετρία με την χρήση UAV (CRP), για την εύρεση της καταλληλότερης. Η επιλογή των μεθόδων αυτών πραγματοποιήθηκε ύστερα από σχετική έρευνα της διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο. Στην Εικόνα 4.5 αποτυπώνεται η ανεπτυγμένη ιεραρχική δομή των κριτηρίων και υποκριτηρίων, καθώς και οι εναλλακτικές τεχνολογίες.



Εικόνα 4.5 Ιεραρχική δομή για την επιλογή της βέλτιστης Μη Καταστρεπτικής Μεθόδου.

Η επιλογή της τελικής μεθόδου θα προκύψει ύστερα από την ανάλυση της επίδοσης των εναλλακτικών στο πλήθος των επιλεγμένων κριτηρίων. Η επίδοση αυτή αποτυπώνεται μέσω κατάλληλων τιμών που προσδίδονται σε κάθε ένα από τα κριτήρια, και οι οποίες υπακούουν σε κάποιο κλίμακα. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε κλίμακα εύρους 1 έως 5, η οποία απαντάται συχνά σε άρθρα αξιολόγησης των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων (Gattulli & Chiaramonte, 2005, Gucunski et al., 2014, Rehman et al., 2016). Το ανώτερο όριο υποδηλώνει τη βέλτιστη απόδοση της εναλλακτικής σε κάποιο κριτήριο, κατατάσσοντας την σε ευνοϊκότερη θέση προτίμησης, ενώ το κατώτερο στην χειρότερη δυνατή απόδοση. Σύμφωνα με την εικόνα που παρουσιάζει κάθε μέθοδος σε κάθε ένα από τα κριτήρια, ταξινομείται σε κατάλληλη θέση. Εκείνη που ανταποκρίνεται καλύτερα στο σύνολο των κριτηρίων θεωρείται και η βέλτιστη επιλογή. Ο τρόπος βαθμολόγησης των εναλλακτικών θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια της διπλωματικής.

4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΡΩΝ

Σημαντικό κομμάτι της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποτελεί η στάθμιση των επιμέρους κριτηρίων με την απόδοση συντελεστών βαρύτητας. Με τη δημιουργία κατάλληλου ερωτηματολογίου που εξετάζει την επίδοση των μεθόδων στα εξεταζόμενα κριτήρια, μπορούν να προσδιοριστούν τα βάρη (Lee & Kalos, 2015, Akgul, 2021). Στόχος είναι η διανομή του ερωτηματολογίου σε μερίδα του ακαδημαϊκού κοινού που σχετίζονται με το αντικείμενο και έχουν γνώσεις σε τουλάχιστον δύο από τις εξεταζόμενες μεθόδους. Για να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος χρόνος συμπλήρωσης, αλλά και να διευκολυνθεί η διανομή του, η σύνταξη πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονική μορφή. Η δομή του αφορά σε τρεις βασικές ενότητες, όπως παρουσιάζονται και στο Παράρτημα Α. Η πρώτη ενότητα αναφέρει γενικές πληροφορίες για τις μεθόδους, ώστε οι συμμετέχοντες να λάβουν γνώση για αυτές. Η δεύτερη περιλαμβάνει μια ερώτηση που εξετάζει τη σχέση των ερωτηθέντων με τις μεθόδους. Η τελευταία ενότητα περιέχει το σύνολο των ερωτήσεων που αφορούν στη σημαντικότητα των εξεταζόμενων κριτηρίων για κάθε μέθοδο. Από το πλήθος των ειδικών στους οποίους απευθύνεται το ερωτηματολόγιο απαιτείται ο βαθμός απόκρισης να ισούται τουλάχιστον με το 60 ± 20 % των ερωτηθέντων. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση που διεξήχθη από τον Baruch (1999), το ποσοστό αυτό θεωρείται εύλογο για μια ακαδημαϊκή έρευνα.

Λόγω συνθηκών, το ερωτηματολόγιο του Παραρτήματος Α δεν ήταν εφικτό να διανεμηθεί και να απαντηθεί, κι έτσι δεν έχει αξιοποιηθεί στην εργασία. Ωστόσο, για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής υιοθετήθηκε μια συνδυαστική προσέγγιση που αξιοποιεί συγχρόνως δεδομένα αξιολόγησης υφιστάμενων ερευνών της διεθνούς βιβλιογραφίας και απόψεις ειδικών. Πρόκειται για μια πιο ευέλικτη μεθοδολογία με προοπτικές αναπροσαρμογής ανάλογα με τις ανάγκες και το κοινό στο οποίο απευθύνεται. Κατά την εφαρμογή της, αξιοποιεί στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας για τις μεθόδους της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και των Υπερήχων (UT), ενώ για τη μέθοδο της Φωτογραμμετρίας με χρήση μη επανδρωμένου οχήματος (CRP) λαμβάνει υπόψη τη γνώμη των ειδικών (Ter Berg et al., 2019). Η απουσία της Φωτογραμμετρίας από υφιστάμενες συγκριτικές έρευνες είναι ο λόγος ενσωμάτωσης της άποψης των ειδικών επί τη συγκεκριμένη μέθοδο στο υβριδικό μοντέλο. Εξετάστηκε, λοιπόν, η λύση μιας δομημένης συνέντευξης που εμπεριέχει ερωτήσεις σχετικές με την επίδοση της μεθόδου σε συγκεκριμένα κριτήρια (Παράρτημα Β). Τα κριτήρια αυτά οφείλουν να είναι κοινά για το σύνολο των μεθόδων, ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκριτική αξιολόγησή τους. Επομένως, προτείνεται η παρουσίαση τριών σημαντικών βιβλιογραφιών με τα κριτήριά τους (Gucunski et al., 2014, Lee & Kalos, 2015, και Kušar et al., 2018), και η επιλογή μιας εξ αυτών για την σύγκριση και των τεσσάρων τεχνολογιών.

Συνοπτικά και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας προτείνεται η υιοθέτηση των ακόλουθων δύο προσεγγίσεων στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη διανομή και τη λήψη απαντήσεων σε ένα πλήρες ερωτηματολόγιο σχετικό με όλες τις επιθυμητές μεθόδους παρακολούθησης:

1. Αξιοποίηση υφιστάμενων ερευνών για την σύγκριση των μεθόδων που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Η προσέγγιση αυτή έχει ως στόχο τη διερεύνηση των πιθανών αποκλίσεων ή συγκλίσεων ως προς την ανάδειξη της βέλτιστης μεθόδου παρακολούθησης ανάλογα με τα κριτήρια που εφαρμόζονται και το κοινό στο οποίο απευθύνονται, ακολουθώντας μία κοινή

πρακτική (μέθοδος PROMETHEE) για την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκειμένου να δημιουργηθεί η ίδια βάση για μία αρχική σύγκριση.

2. Συνδυαστική αξιοποίηση της πιο σύγχρονης και με μεγαλύτερη ποικιλία κριτηρίων έρευνας για την βαθμολόγηση των μεθόδων παρακολούθησης που συναντώνται στην βιβλιογραφία με τα δεδομένα που συλλέγονται για την μέθοδο ή τις μεθόδους που εκλείπουν από την βιβλιογραφία όπως προκύπτουν από τις απόψεις και την εμπειρία των ειδικών. Στην προσέγγιση αυτήν μπορούν να εφαρμοστούν δύο θεωρήσεις: α) ισοβαρής θεώρηση (ίσα βάρη για το κάθε κριτήριο) και β) ανισοβαρής θεώρηση όπου πραγματοποιείται στάθμιση κριτηρίων σύμφωνα με την μέθοδο της Εντροπίας.

4.3.1 Μέθοδος Εντροπίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εξάγοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τα κριτήρια τόσο από τις βιβλιογραφικές αναφορές όσο και από τις απόψεις των ειδικών επιτυγχάνεται η εύρεση των βαρών μέσω της μεθόδου της Εντροπίας. Εν γένει, η μέθοδος της Εντροπίας αποτελεί ένα εργαλείο για τον υπολογισμό της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων και υποκριτηρίων χωρίς να λαμβάνει σημαντικά υπόψη την άποψη του ανθρώπου που παίρνει τις αποφάσεις. Πρόκειται στην ουσία για μια αντικειμενική μέθοδο που παρέχει τη διακριτική ικανότητα των κριτηρίων. Η μέθοδος της Εντροπίας είναι ευρέως διαδεδομένη στον προσδιορισμό της στάθμισης των κριτηρίων σε προβλήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης και έχει παρουσιαστεί σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές (Garg et al., 2015, Sierra et al., 2018, Odu, 2019, Şahin, 2021). Σε μια πολυκριτηριακή ανάλυση στην οποία χρησιμοποιούνται πολλά και διαφορετικά κριτήρια, η βαρύτητα κάθε κριτηρίου είναι άμεσα εξαρτώμενη της πληροφορίας που παρέχεται από την διακριτική ικανότητα του κριτηρίου στο σύνολο των εξεταζόμενων εναλλακτικών επιλογών. Όσο δηλαδή μεγαλύτερη είναι η διαφοροποίηση των αποδόσεων των i εναλλακτικών σε σχέση με κάθε κριτήριο j , τόσο πιο σημαντικό είναι το κριτήριο και άρα τόσο μεγαλύτερο το βάρος του w_j . Η Εντροπία του Shannon χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διακριτικής ικανότητας των κριτηρίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην πολυκριτηριακή ανάλυση υπάρχουν πολλά κριτήρια με ποικίλες μονάδες μέτρησης, το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει είναι μια κανονικοποίηση των επιδόσεων των εναλλακτικών επιλογών σε κάθε κριτήριο αξιολόγησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια εφαρμογής της μεθόδου αυτής.

1. Δημιουργία του κανονικοποιημένου πίνακα απόφασης

Θεωρώντας τον πίνακα απόφασης X , τα στοιχεία του οποίου είναι οι επιδόσεις x_{ij} των n εναλλακτικών επιλογών σε m κριτήρια

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

το στοιχείο κάθε στήλης διαιρείται με το άθροισμα των n στοιχείων αυτής και προκύπτει η κανονικοποιημένη τιμή

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.12)$$

και προκύπτει ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης D

$$D = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2j} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix}$$

Σκοπός είναι όλες οι επιδόσεις να είναι εκφρασμένες σε μια κοινή βάση, ανεξάρτητες των μονάδων μέτρησης και συγκρίσιμες μεταξύ τους, καθώς η τιμή τους θα κυμαίνεται πάντα από 0 έως 1. Η μεγαλύτερη όμως σημασία του λόγου p_{ij} είναι ότι μέσω των διαφοροποιημένων τιμών που δημιουργούνται για κάθε μια εναλλακτική σε σχέση με τις υπόλοιπες, ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης, αποτελεί μέτρο της ενδογενούς πληροφορίας που παρέχεται για το σύνολο των εναλλακτικών υπό το πρίσμα κάθε κριτηρίου χωριστά.

2. Υπολογισμός της Εντροπίας για κάθε κριτήριο

Κάνοντας χρήση της παραδοχής ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφοροποίηση των τιμών απόδοσης των εναλλακτικών και του γεγονότος ότι ο λόγος p_{ij} αποτελεί μέτρο απόδοσης της πληροφορίας, η συνολική πληροφορία κάθε κριτηρίου υπολογίζεται κάνοντας χρήση του τύπου της Εντροπίας και ειδικότερα του τύπου

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \times \ln p_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

όπου j είναι ο αριθμός των κριτηρίων αξιολόγησης και k είναι μια σταθερά

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (4.14)$$

όπου n είναι ο αριθμός των εναλλακτικών επιλογών και εξασφαλίζει ότι πάντα η Εντροπία θα βρίσκεται μεταξύ των ορίων, $0 \leq E_j \leq 1$.

3. Υπολογισμός του βαθμού διαφοροποίησης

Ο βαθμός διαφοροποίησης αποτελεί μέτρο της παρεχόμενης πληροφορίας των κριτηρίων και υπολογίζεται από τον τύπο

$$D_j = 1 - E_j \quad (4.15)$$

για κάθε κριτήριο j του πίνακα απόφασης. Από τη σχέση αυτή συνεπάγεται πως όσο μεγαλύτερος ο βαθμός διαφοροποίησης των τιμών των εναλλακτικών υπό το κριτήριο j , τόσο μεγαλύτερη και η πληροφορία.



4. Υπολογισμός της βαρύτητας των κριτηρίων

Η βαρύτητα των κριτηρίων υπολογίζεται από το πηλίκο του βαθμού διαφοροποίησης κάθε κριτηρίου χωριστά προς το άθροισμα των βαθμών διαφοροποίησης του συνόλου των κριτηρίων

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (4.16)$$

για κάθε κριτήριο j του πίνακα απόφασης.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Visual PROMETHEE με στόχο την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου παρακολούθησης των λιμενικών υποδομών, σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι τέσσερις σύγχρονες τεχνολογίες που εξετάζονται: η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), το Γεωραντάρ (GPR), η Μέθοδος Υπερήχων (UT) και η Φωτογραμμετρία (CRP), αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια που καθορίστηκαν από την σχετική βιβλιογραφία. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 σχετικά με την δυνατότητα διεξαγωγής ερωτηματολογίων για την βαθμολόγηση και την στάθμιση των κριτηρίων, η διαδικασία της πολυκριτηριακής αξιολόγησης των σύγχρονων μεθόδων βασίστηκε στην υιοθέτηση δύο προσεγγίσεων:

1. Αξιοποίηση υφιστάμενων ερευνών για την σύγκριση των τριών μεθόδων (Υπέρυθρη Θερμογραφία - IRT, Γεωραντάρ - GPR, Μέθοδος Υπερήχων - UT) που συναντώνται στην βιβλιογραφία.
2. Συνδυαστική αξιοποίηση της πιο σύγχρονης και με μεγαλύτερο αριθμό κριτηρίων έρευνας για την βαθμολόγηση των τριών μεθόδων (Υπέρυθρη Θερμογραφία - IRT, Γεωραντάρ - GPR, Μέθοδος Υπερήχων - UT) που συναντώνται στην βιβλιογραφία, καθώς και της μεθόδου της Φωτογραμμετρίας (CRP) σύμφωνα με τις απόψεις και την εμπειρία των ειδικών. Στην προσέγγιση αυτήν εφαρμόστηκαν δύο θεωρήσεις: α) ισοβαρής θεώρηση (ίσα βάρη για το κάθε κριτήριο) και β) ανισοβαρής θεώρηση (στάθμιση κριτηρίων σύμφωνα με την μέθοδο της Εντροπίας).

5.1 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Όπως έχει επισημανθεί και προγενέστερα, υπάρχει περιορισμένος αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών στο ζήτημα της παρακολούθησης λιμενικών υποδομών με Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους. Το περιβάλλον και οι συνθήκες στις οποίες εγκαθίστανται, όμως, παρομοιάζουν με εκείνες των γεφυρών (O'Byrne et al., 2019). Συνεπώς, επιλέγεται η ανάλυση να πραγματοποιηθεί για έναν αριθμό ερευνών που αφορούν σε παρακολούθηση και αξιολόγηση γεφυρών. Σημαντικές βιβλιογραφίες στον τομέα αυτό θεωρούνται των Gucunski et al. (2014), των Lee & Kalos (2015), και των Kušar et al. (2018). Κοινό γνώρισμα τους είναι η αξιολόγηση τριών εκ των τεσσάρων τεχνολογιών με διαφορετικές πολυκριτηριακές μεθόδους. Η Φωτογραμμετρία (CRP) δεν εξετάζεται σε καμία από αυτές. Πιθανή αιτία αποτελεί το γεγονός πως η εφαρμογή της συνδέεται πλέον άρρηκτα με τις πρόσφατες τάσεις της τεχνολογίας που αφορούν στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), με αποτέλεσμα να γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής τα τελευταία πλέον χρόνια.

Για κάθε μια από τις βιβλιογραφίες των Gucunski et al. (2014), των Lee & Kalos (2015), και των Kušar et al. (2018) θα πραγματοποιηθεί ισοβαρής ανάλυση, ώστε να διαπιστωθεί η απόδοση της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και της Δοκιμής Υπερήχων (UT) σε διαφορετικά κάθε φορά κριτήρια, χωρίς να αξιολογείται η σημαντικότητά τους, καθώς όλα τα κριτήρια θεωρούνται ισότιμα. Η προσέγγιση αυτή είναι χρήσιμη για την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων για τις τρεις τεχνολογίες ανάλογα με την απόδοσή τους σε διάφορους παράγοντες.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση πραγματοποιείται με το λογισμικό Visual PROMETHEE για καθεμία από τις έρευνες χωριστά και σύμφωνα με τα κριτήρια που περιέχει έκαστη.

5.1.1 Τιμές Κριτηρίων από Βιβλιογραφικές Αναφορές

Βασικό μέλημα είναι η παρουσίαση των τριών βιβλιογραφικών αναφορών για τις οποίες γίνεται λόγος, και ειδικότερα των κριτηρίων που αυτές εξετάζουν και των επιδόσεων της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και της Δοκιμής Υπερήχων (UT) σε αυτά. Η πιο πρόσφατη βιβλιογραφία αφορά σε έρευνα των Kušar et al. (2018). Τα κριτήρια στα οποία βασίζεται είναι η αξιοπιστία των δεδομένων/αποτελεσμάτων, το κόστος, η ποικιλομορφία στη χρήση των μεθόδων, η ύπαρξη προτύπων, η κατανάλωση χρόνου και η πολυπλοκότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων (Πίνακας 5.1). Οι τιμές των τεχνολογιών στο σύνολο των κριτηρίων προέκυψαν ύστερα από βαθμολόγηση που πραγματοποιήθηκε από ομάδα ανθρώπων σχετικών με τις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους και την παρακολούθηση γεφυρών. Οι ειδικοί αξιολόγησαν τις μεθόδους ως προς κάθε κριτήριο δίνοντας τιμές σύμφωνα με την κλίμακα 1 έως 3. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή με την οποία βαθμολογείται μια τεχνολογία, τόσο μικρότερη είναι και η απόδοσή της στο εκάστοτε κριτήριο. Μέθοδοι με μεγαλύτερη βαθμολογία υπερिशύουν έναντι εκείνων με μικρότερη βαθμολογία. Τα τελικά αποτελέσματα καθώς και η σημασία των τιμών της κλίμακας για το κάθε κριτήριο παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακες 5.2, 5.3).

Πίνακας 5.1 Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων (Kušar et al., 2018).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Αξιοπιστία Αποτελεσμάτων	Περιγράφει την αξιοπιστία ή την ακρίβεια των αποτελεσμάτων/ μετρήσεων. Ασχολείται με την τεχνολογική αρτιότητα της δοκιμής (ακρίβεια) και την ευαισθησία της μεθόδου σε διάφορους εξωτερικούς παράγοντες.
Κόστος	Προσδιορίζει το κόστος απόκτησης του εξοπλισμού, εκτέλεσης της μεθόδου και ανάλυσης των δεδομένων.
Χρηστικότητα	Αφορά στον αριθμό των παραμέτρων που μπορούν να μετρηθούν μέσω της υπό εξέταση τεχνολογίας.
Προτυποποίηση	Η ύπαρξη προτύπου κάνει τα αποτελέσματα μιας μεθόδου πιο αξιόπιστα.
Διάρκεια Μεθόδου	Ορίζει την ταχύτητα εκτέλεσης της μεθόδου και απόκτησης των δεδομένων. Σχετίζεται κυρίως με τον χρόνο που αφιερώνει ο επιθεωρητής, αλλά μπορεί επίσης να σχετίζεται με πιθανή διακοπή της κυκλοφορίας.
Πολυπλοκότητα Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	Αναφέρεται στα συλλεγόμενα ακατέργαστα δεδομένα και στην ανάγκη για μακρές και απαιτητικές αναλύσεις μέχρι την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος (απαιτήσεις σε υπολογιστικό εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό).

Πίνακας 5.2 Βαθμολόγηση κριτηρίων (Kuřar et al., 2018).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗ		
	3	2	1
Αξιοπιστία Αποτελεσμάτων	Υψηλή Οι εξωτερικοί παράγοντες δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα.	Μέτρια Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα.	Χαμηλή Απαιτούνται συμπληρωματικές έρευνες για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.
Κόστος	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό
Χρηστικότητα	Δυνατότητα εξέτασης ποικίλων υλικών και των παραμέτρων/ φθορών του.	Δυνατότητα εξέτασης ενός υλικού και περιορισμένων σε αριθμό παραμέτρων/ φθορών.	Περιορισμένη χρηστικότητα, με δυνατότητα ανίχνευσης ενός τύπου φθοράς.
Προτυποποίηση	Ύπαρξη ευρωπαϊκού προτύπου.	Ύπαρξη εθνικού προτύπου.	Απουσία σχετικού προτύπου.
Διάρκεια Μεθόδου	Μικρή Ο συνολικός χρόνος επιθεώρησης δεν αυξάνεται δραστικά σε σύγκριση με μια οπτική επισκόπηση.	Μέτρια Ο συνολικός χρόνος επιθεώρησης επιμηκύνεται.	Μεγάλη Ο συνολικός χρόνος επιθεώρησης είναι διπλάσιος συγκριτικά με εκείνον της οπτικής επιθεώρησης.
Πολυπλοκότητα Εξαγωγής Αποτελεσμάτων	Άμεσα αποτελέσματα.	Απαιτείται κάποια ανάλυση.	Απαιτείται παρατεταμένη ανάλυση και υψηλή επαγγελματική κατάρτιση.

Πίνακας 5.3 Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Kuřar et al. (2018).

NDT	ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ					
	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	2	2	3	1	2	1
GPR	2	1	3	2	2	1
UT	2	2	3	1	1	1

Η δεύτερη βιβλιογραφία που εξετάζεται είναι εκείνη των Lee & Kalos (2015). Σκοπός της έρευνάς τους αποτελεί η διαπίστωση του βαθμού στον οποίο χρησιμοποιούνται τεχνολογίες σαν κι αυτές σε οργανισμούς μεταφορών των ΗΠΑ. Δημιουργήθηκε, λοιπόν, ερωτηματολόγιο στο οποίο ζητήθηκε

από ειδικούς, όπως μηχανικούς, ανθρώπους σε τομείς επιθεωρήσεων γεφυρών και εμπειρογνώμονες των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων να αξιολογήσουν τις μεθόδους. Τα κριτήρια πάνω στα οποία βασίστηκε η αξιολόγηση αφορούν στη δυσκολία εφαρμογής της μεθόδου, στην αποτελεσματικότητά της και την αποδοτικότητά της. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται το σύνολο των κριτηρίων μαζί με μια συνοπτική περιγραφή τους. Επίσης, η τελική βαθμολόγηση των μεθόδων, όπως αυτή αποδόθηκε από μερίδα ειδικών και ύστερα από σχετική ανάλυση που πραγματοποίησαν οι ερευνητές αποτυπώνεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.4 Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων (Kuřar et al., 2018).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Δυσκολία Εφαρμογής	Αφορά στο βαθμό δυσκολίας που παρουσιάζει μια μέθοδος κατά τη χρήση της.
Αποτελεσματικότητα	Περιγράφει το πόσο αποδοτική είναι κάθε μέθοδος κατά την ανίχνευση των φθορών.
Αποδοτικότητα	Προσδιορίζει τον βαθμό απόδοσης κάθε μεθόδου, ο οποίος προκύπτει ως ο λόγος της αποτελεσματικότητας προς τον δείκτη δυσκολίας της μεθόδου.

Πίνακας 5.5 Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Lee & Kalos (2015).

NDT	ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ		
	ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ
IRT	2.39	3.11	1.30
GPR	3.39	3.29	0.97
UT	3.15	3.04	0.96

Οι Gucunski et al. (2014) ασχολήθηκαν επίσης με την αξιολόγηση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στον τομέα των γεφυρών. Οι τρεις τεχνολογίες βαθμολογήθηκαν και ταξινομήθηκαν υπό το πρίσμα πέντε μέτρων απόδοσης: της ακρίβειας, της επαναληψιμότητας, της ταχύτητας, της ευκολίας στη χρήση και του κόστους. Οι εξεταζόμενες μέθοδοι αξιολογήθηκαν για την απόδοσή τους στα κριτήρια αυτά για ένα σύνολο σημαντικών φθορών. Οι φθορές στις οποίες γίνεται λόγος αφορούν στις αποκολλήσεις, στις ρωγμές, στη διάβρωση του χάλυβα σπλισμού και στην υποβάθμιση της ποιότητας του σκυροδέματος. Στην συγκεκριμένη εργασία, για λόγους ευκολίας σύγκρισης, θα ληφθούν υπόψη μόνο οι τιμές που αφορούν στην φθορά της εσωτερικής αποκόλλησης καθώς αποτελεί κοινό τύπο φθοράς και για τις τρεις μεθόδους. Το πλήθος των κριτηρίων, όπως περιγράφονται από τους Gucunski et al. (2014), καθώς και οι τιμές που λαμβάνουν οι μέθοδοι και υποδεικνύουν την επίδοσή τους στα κριτήρια αυτά, παρουσιάζονται ακολούθως (Πίνακες 5.6, 5.7).

Πίνακας 5.6 Εξεταζόμενα κριτήρια για την αξιολόγηση των μεθόδων (Gucunski et al., 2014).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Ακρίβεια	Βασίζεται στην ακρίβεια με την οποία ανιχνεύεται η παρουσία αποκολλήσεων, το πρώιμο στάδιο αποκόλλησης που μπορεί να εντοπιστεί και στο πόσο καλά μπορεί μια τεχνολογία να διακρίνει τα διάφορα στάδια της φθοράς (αρχική, προχωρημένη και σοβαρή αποκόλληση).
Επαναληψιμότητα	Αφορά είτε στην δυνατότητα επανάληψης της μεθόδου κατά τη φάση συλλογής ακατέργαστων δεδομένων, είτε κατά τη φάση ανάλυσης ή κατά τη δάση εξαγωγής των αποτελεσμάτων.
Ταχύτητα	Προσδιορίζει την ταχύτητα συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων.
Ευκολία στη Χρήση	Εξετάζει την εμπειρογνομosύνη που απαιτεί κάθε τεχνολογία για τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων, τον αριθμό των χειριστών, τη σωματική προσπάθεια για την εγκατάσταση του εξοπλισμού, την ευκολία ελιγμών και τη δυνατότητα για αυτοματοποίηση.
Κόστος	Περιγράφει το κόστος εξοπλισμού, συλλογής και ανάλυσης δεδομένων.

Πίνακας 5.7 Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων στα κριτήρια των Gućunski et al. (2014).

NDT	ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ				
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΕΥΚΟΛΙΑ ΧΡΗΣΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ
IRT	2.2	2.0	4.1	4.0	3.0
GPR	2.1	4.0	3.9	2.2	3.0
UT	2.8	3.0	2.4	1.4	4.0

5.1.2 Ισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Κατά την ισοβαρή πολυκριτηριακή ανάλυση μέσω της μεθόδου PROMETHEE όλα τα κριτήρια κάθε βιβλιογραφίας που εξετάζονται θεωρούνται ίσης βαρύτητας. Έχοντας ως δεδομένο το στοιχείο αυτό, πραγματοποιείται η ανάλυση μέσω του λογισμικού Visual PROMETHEE για τις τρεις έρευνες. Η διαδικασία που εφαρμόζεται θα περιγραφεί αναλυτικά για μια εξ αυτών, και συνίσταται στα εξής βήματα.

Πρώτο βήμα αποτελεί η εύρεση και καταγραφή των κριτηρίων και των τιμών των εναλλακτικών στην υπό εξέταση βιβλιογραφία, όπως έχει περιγραφεί εκτενώς παραπάνω. Παρόλα αυτά, θα παρατεθούν οι τιμές για την έρευνα των Kuřar et al. (2018), ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση (Πίνακας 5.8).

Πίνακας 5.8 Τιμές Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων για τα εξεταζόμενα κριτήρια Kušar et al. (2018).

NDT	ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ					
	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	2	2	3	1	2	1
GPR	2	1	3	2	2	1
UT	2	2	3	1	1	1

Όπως γίνεται αντιληπτό, η κλίμακα με την οποία έχει βαθμολογηθεί κάθε μια από τις μεθόδους στα υπό εξέταση κριτήρια είναι η 1 έως 3. Ωστόσο, λόγω της διαφοροποίησής της από τις κλίμακες που χρησιμοποιούνται στις υπόλοιπες βιβλιογραφίες, προτιμήθηκε η επιλογή μιας κοινής κλίμακας 1 – 5 (Πίνακας 5.9). Σύμφωνα με την κλίμακα αυτή, η τιμή 1 αντιστοιχεί στη χειρότερη απόδοση της εναλλακτικής σε κάποιο κριτήριο, ενώ η τιμή 5 στην καλύτερη. Το στάδιο αυτό εφαρμόζεται και για τις βιβλιογραφίες των Lee & Kalos (2015) και των Gucunski et al. (2014) αντίστοιχα, και αποτυπώνεται στους Πίνακες 5.10 και 5.11.

Πίνακας 5.9 Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Kušar et al. (2018).

	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	3	3	5	1	3	1
GPR	3	1	5	2	3	1
UT	3	3	5	1	1	1

Πίνακας 5.10 Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Lee & Kalos (2015).

	ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ
IRT	3	4	2
GPR	2	4	1
UT	2	4	1

Πίνακας 5.11 Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Gucunski et al. (2014).

	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΕΥΚΟΛΙΑ ΧΡΗΣΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ
IRT	3	2	5	4	4
GPR	3	4	4	3	3
UT	3	3	3	2	3

Το επόμενο βήμα αφορά στη χρήση του λογισμικού Visual PROMETHEE και στην εισαγωγή των δεδομένων. Αρχικά, εκχωρούνται ο αριθμός και το όνομα των εναλλακτικών, ο αριθμός και η ονομασία των κριτηρίων και η υπό εξέταση βιβλιογραφία. Έπειτα, πληκτρολογούνται τα βάρη των κριτηρίων, τα οποία στην ισοβαρή ανάλυση θεωρούνται ίσα για όλα τα κριτήρια. Επιλέγεται, επίσης, η συνάρτηση προτίμησης, όπου προκύπτει να είναι η συνάρτηση Usual στο παρόν πρόβλημα. Για τη συνάρτηση αυτή δεν απαιτείται κάποιο κατώφλι. Τέλος, εισάγονται οι τιμές κάθε εναλλακτικής για κάθε ένα από τα κριτήρια με βάση την κλίμακα 1 – 5, η οποία ορίζεται ποιοτικά από το πρόγραμμα ως εξής:







- (1) 1: very bad (πολύ κακή απόδοση)
- (2) 2: bad (κακή απόδοση)
- (3) 3: average (μέτρια απόδοση)
- (4) 4: good (καλή απόδοση)
- (5) 5: very good (πολύ καλή απόδοση)

Έχοντας ενσωματώσει τα παραπάνω στοιχεία στο πρόγραμμα του Visual PROMETHEE εκτελείται η πολυκριτηριακή μέθοδος PROMETHEE. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι ολοκληρωμένοι πίνακες αξιολόγησης των εναλλακτικών για κάθε βιβλιογραφία (Πίνακες 5.12-5.14).









Πίνακας 5.12 Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Kuzar et al. (2018).

Kuzar Ισοβαρής	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗ...	ΠΡΟΤΥΠΟΠ...	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛΟΚ...	
Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences							
Min/Max	max	max	max	max	max	max	
Weight	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics							
Minimum	3,00	1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	
Maximum	3,00	3,00	5,00	2,00	3,00	1,00	
Average	3,00	2,33	5,00	1,33	2,33	1,00	
Standard Dev.	0,00	0,94	0,00	0,47	0,94	0,00	
Evaluations							
Infrared Thermo...	■	average	average	very good	very bad	average	very bad
Ground Penetrati...	■	average	very bad	very good	bad	average	very bad
Ultrasonic Testing	■	average	average	very good	very bad	very bad	very bad

Πίνακας 5.13 Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Lee & Kalos (2015).

Lee Kalos_Ισοβαρής	ΔΥΣΚΟΛΙΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜ...	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟ...	
Unit	5-point	5-point	5-point	
Cluster/Group				
Preferences				
Min/Max	max	max	max	
Weight	33,33	33,33	33,33	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	
Statistics				
Minimum	2,00	4,00	1,00	
Maximum	3,00	4,00	2,00	
Average	2,33	4,00	1,33	
Standard Dev.	0,47	0,00	0,47	
Evaluations				
Infrared Thermo...		average	good	bad
Ground Penetrati...		bad	good	very bad
Ultrasonic Testing		bad	good	very bad

Πίνακας 5.14 Πίνακας αξιολόγησης μεθόδου PROMETHEE για την έρευνα των Gucunski et al. (2014).

Gucunski_Ισοβαρής	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙ...	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΕΥΚΟΛΙΑ ΧΡ...	ΚΟΣΤΟΣ	
Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	
Cluster/Group						
Preferences						
Min/Max	max	max	max	max	max	
Weight	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics						
Minimum	3,00	2,00	3,00	2,00	3,00	
Maximum	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	
Average	3,00	3,00	4,00	3,00	3,33	
Standard Dev.	0,00	0,82	0,82	0,82	0,47	
Evaluations						
Infrared Thermo...		average	bad	very good	good	good
Ground Penetrati...		average	good	good	average	average
Ultrasonic Testing		average	average	average	bad	average

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την εισαγωγή όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εφαρμογή της συγκεκριμένης πολυκριτηριακής μεθόδου είναι δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για κάθε μια από τις βιβλιογραφίες.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές των εναλλακτικών σε κάθε ένα από τα κριτήρια ξεχωριστά, όπως αυτές προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE (Πίνακες 5.15-5.17). Οι τιμές που λαμβάνουν οι εναλλακτικές σε κάθε κριτήριο κυμαίνονται μεταξύ -1.00 και 1.00. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στο κατώτερο όριο και αφορά στη χειρίστη απόδοση μιας εναλλακτικής σε κάποιο κριτήριο. Αντίθετα, η τιμή 1.00 αντικατοπτρίζει την βέλτιστη απόδοση μιας εναλλακτικής σε κάποιο κριτήριο. Για παράδειγμα, εξετάζοντας το κριτήριο του κόστους στην έρευνα των Kušar et al. (2018), παρατηρείται ότι η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και η Δοκιμή Υπερήχων (UT) λαμβάνουν τιμή 0.50, ενώ το Γεωραντάρ (GPR) -1.00. Το αποτέλεσμα αυτό δηλώνει πως το Γεωραντάρ (GPR) είναι πιο ακριβή μέθοδος από τις άλλες δύο, ενώ η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και η Δοκιμή Υπερήχων (UT) έχουν ίδιο κόστος, το οποίο είναι και μικρότερο από του Γεωραντάρ (GPR). Τα κριτήρια στα οποία και οι τρεις τεχνολογίες παρουσιάζουν μηδενική τιμή σημαίνει πως καμία δεν υπερέχει έναντι της άλλης σε αυτά τα κριτήρια.

Πίνακας 5.15 Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Kušar et al. (2018).

	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	0.00	0.50	0.00	-0.50	0.50	0.00
GPR	0.00	-1.00	0.00	1.00	0.50	0.00
UT	0.00	0.50	0.00	-0.50	-1.00	0.00

Πίνακας 5.16 Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Lee & Kalos (2015).

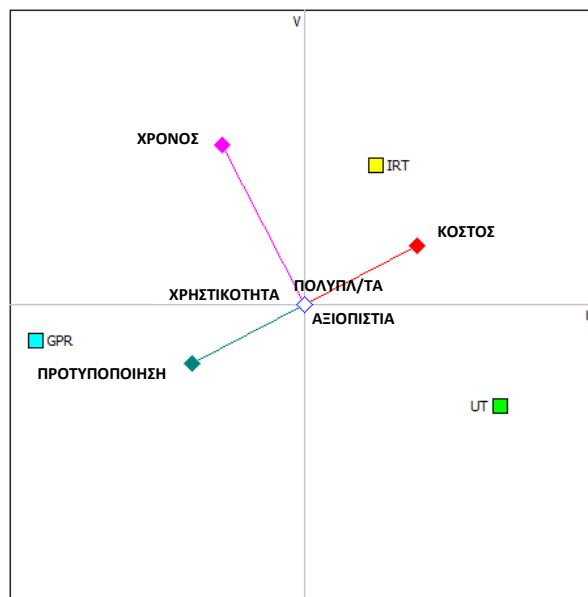
	ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ
IRT	1.00	0.00	1.00
GPR	-0.50	0.00	-0.50
UT	-0.50	0.00	-0.50

Πίνακας 5.17 Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο Gucunski et al. (2014).

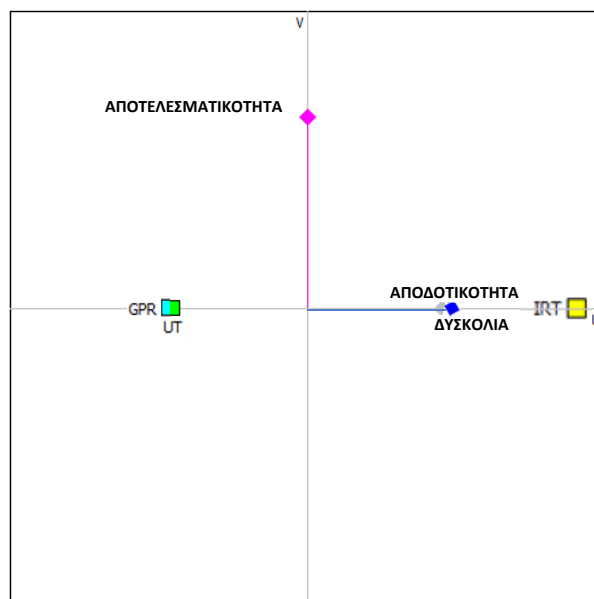
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΕΥΚΟΛΙΑ ΧΡΗΣΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ
IRT	0.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
GPR	0.00	1.00	0.00	0.00	-0.50
UT	0.00	0.00	-1.00	-1.00	-0.50

Οι παραπάνω τιμές μπορούν να παρουσιαστούν και γραφικά με τη βοήθεια του εργαλείου PROMETHEE GAIA (Εικόνες 5.1 έως 5.3). Πρόκειται για μια προέκταση του λογισμικού Visual PROMETHEE που διευκολύνει την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κριτηρίων, αλλά και των εναλλακτικών. Συγκεκριμένα, αναπαριστά τις εναλλακτικές μέσω σημείων και τα κριτήρια μέσω διανυσμάτων σε ένα κοινό διάγραμμα, από όπου μπορεί να βρεθεί ποια εναλλακτική είναι καλύτερη

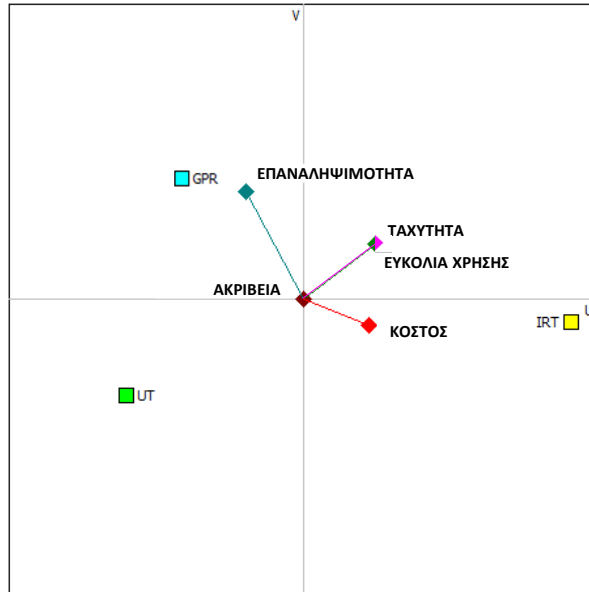
ή χειρότερη σε κάθε ένα από τα κριτήρια. Οι μέθοδοι που βρίσκονται στο επίπεδο που ορίζει ο άξονας ενός κριτηρίου, παρουσιάζουν καλή εικόνα στο συγκεκριμένο κριτήριο. Για παράδειγμα, στην έρευνα των Kuřar et al., 2018 παρατηρείται πως το Γεωραντάρ (GPR) δεν βρίσκεται στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες των κριτηρίων κόστους, αξιοπιστίας και πολυπλοκότητας (οι άξονες των δύο τελευταίων ταυτίζονται), γεγονός το οποίο υποδεικνύει την κακή απόδοση της μεθόδου στα κριτήρια αυτά. Επίσης, όταν μια μέθοδος βρίσκεται στο επίπεδο αυτό και η προβολή της ως προς το κέντρο των αξόνων είναι μικρότερη συγκριτικά με μιας δεύτερης μεθόδου, τότε η πρώτη είναι καλύτερη στο κριτήριο αυτό. Συγκρίνοντας λοιπόν τις μεθόδους Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), Γεωραντάρ (GPR) ως προς το κριτήριο του κόστους, παρατηρείται ότι οι προβολές τους στον άξονα του κριτηρίου είναι περίπου ίσες, άρα και οι δύο είναι εξίσου οικονομικές ως μέθοδοι.



Εικόνα 5.1 Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Kuřar et al. (2018).



Εικόνα 5.2 Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Lee & Kalos (2015).



Εικόνα 5.3 Γραφική απεικόνιση των τιμών κριτηρίων των Gucunski et al. (2014).

Γνωρίζοντας τις τιμές των εναλλακτικών στα κριτήρια είναι πλέον δυνατή η μερική (PROMETHEE I) και ολική (PROMETHEE II) κατάταξή τους. Κατά το στάδιο της μερικής κατάταξης υπολογίζονται οι δείκτες φ^+ , φ^- που αντιστοιχούν στη θετική ροή, δηλαδή στο βαθμό που μια εναλλακτική κυριαρχεί των υπολοίπων, και στην αρνητική ροή, δηλαδή στο βαθμό που η ίδια εναλλακτική υποσκελίζεται από τις υπόλοιπες στην πλειοψηφία των κριτηρίων. Μικρότερες τιμές του δείκτη αρνητικής ροής, αλλά και υψηλότερες τιμές της θετικής ροής σημαίνουν τοποθέτηση της εναλλακτικής σε καλύτερη θέση προτίμησης.

Στη φάση της ολικής κατάταξης (PROMETHEE II), κάθε εναλλακτική λαμβάνει μια θέση προτίμησης σύμφωνα με την επίδοσή της στο σύνολο των κριτηρίων που εξετάζονται σε κάθε σενάριο. Την επίδοση μιας εναλλακτικής αναπαριστά ο δείκτης καθαρής ροής (φ), ο οποίος ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά των δεικτών φ^+ και φ^- . Μεγαλύτερες θετικές τιμές του δείκτη φ υποδηλώνουν ισχυρότερη προτίμηση μιας εναλλακτικής υπό το πρίσμα όλων των κριτηρίων. Όλες οι τιμές των δεικτών ροής σε συνδυασμό με την τελική θέση προτίμησης των εναλλακτικών για κάθε σενάριο αποτυπώνονται στους ακόλουθους Πίνακες 5.18, 5.19 και 5.20.

Πίνακας 5.18 Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Kušar et al. (2018).

NDT	ΔΕΙΚΤΗΣ φ			ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
	φ^+	φ^-	φ	
IRT	0.1667	0.0833	0.0833	1 ^η
GPR	0.2500	0.1667	0.0833	1 ^η
UT	0.0833	0.2500	-0.1667	3 ^η

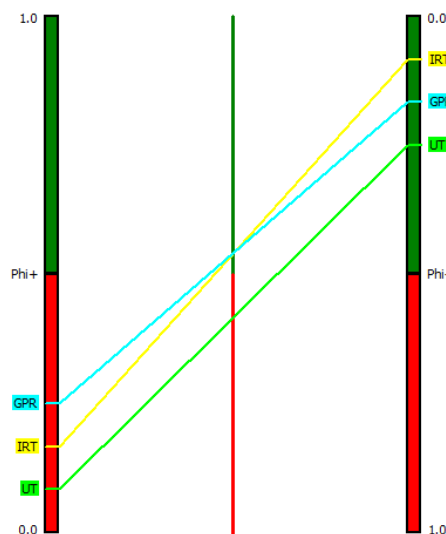
Πίνακας 5.19 Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Lee & Kalos (2015).

NDT	ΔΕΙΚΤΗΣ φ			ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
	φ^+	φ^-	φ	
IRT	0.6667	0.0000	0.6667	1 ^η
GPR	0.0000	0.3333	-0.3333	2 ^η
UT	0.0000	0.3333	-0.3333	2 ^η

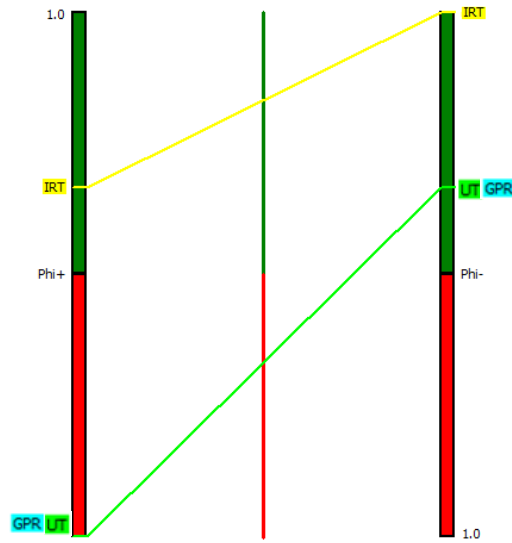
Πίνακας 5.20 Δείκτης φ και τελική κατάταξη εναλλακτικών Gucunski et al. (2014).

NDT	ΔΕΙΚΤΗΣ φ			ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
	φ^+	φ^-	φ	
IRT	0.6000	0.2000	0.4000	1 ^η
GPR	0.4000	0.3000	0.1000	2 ^η
UT	0.1000	0.6000	-0.5000	3 ^η

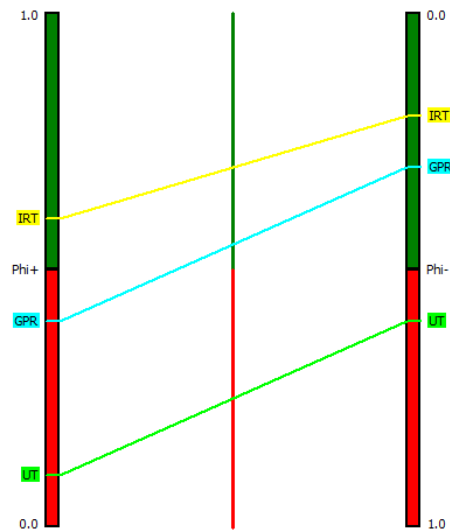
Το λογισμικό Visual PROMETHEE διαθέτει μια πληθώρα εργαλείων που συντελούν στην εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων που εξάγονται. Οι πίνακες που παρατέθηκαν προηγουμένως για κάθε βιβλιογραφία μπορούν να απεικονιστούν και σε διαγραμματική μορφή, διευκολύνοντας έτσι την κατανόησή τους. Για την παρουσίαση της μερικής ταξινόμησης των εναλλακτικών από την καλύτερη προς τη χειρότερη χρησιμοποιούνται δύο παράλληλες κατακόρυφες μπάρες, με την αριστερή να καταγράφει την τιμή του φ^+ και την δεξιά την τιμή του φ^- (Εικόνες 5.4 έως 5.6). Ως βέλτιστη εναλλακτική θεωρείται εκείνη με τη μέγιστη δυνατή τιμή του φ^+ και την ελάχιστη δυνατή τιμή του φ^- . Επομένως, εναλλακτικές με τιμές στο πράσινο τμήμα και των δύο στηλών του διαγράμματος υπερσχύουν από εναλλακτικές που βρίσκονται στο κόκκινο τμήμα.



Εικόνα 5.4 Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Kušar et al. (2018).

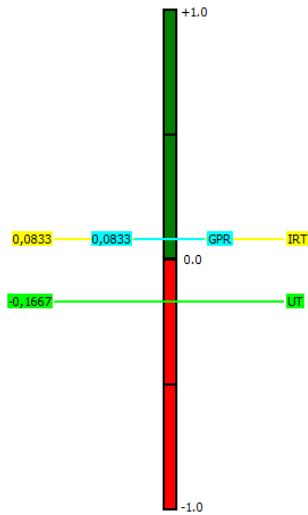


Εικόνα 5.5 Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Lee & Kalos (2015).

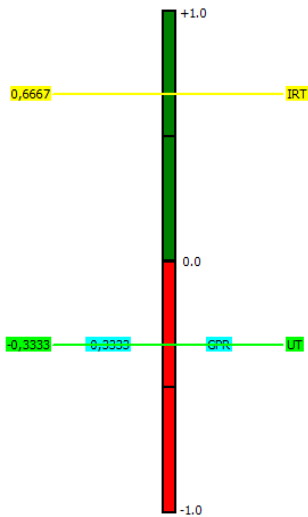


Εικόνα 5.6 Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) Gucunski et al. (2014).

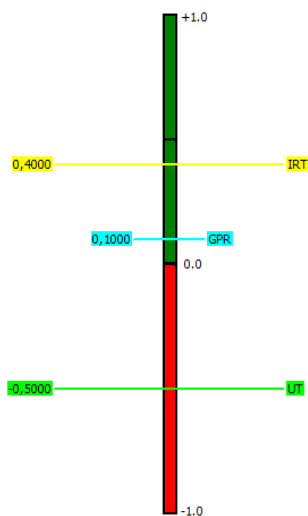
Η ολική κατάταξη των εναλλακτικών για κάθε έρευνα αναπαρίσταται στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνες 5.7 έως 5.9). Οι μέθοδοι που βρίσκονται υψηλότερα προτιμώνται έναντι εκείνων που βρίσκονται χαμηλότερα. Τα αποτελέσματα της πλήρους κατάταξης αποτυπώνονται και στο διάγραμμα του PROMETHEE I, μέσω της κεντρικής κατακόρυφης γραμμής. Στα σημεία όπου το ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από τους δείκτες θετικής και αρνητικής ροής μιας εναλλακτικής τέμνει την μεσαία κατακόρυφο παρουσιάζεται η θέση της κατάταξής της σε σχέση με τις υπόλοιπες.



Εικόνα 5.7 Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Kuřar et al. (2018).



Εικόνα 5.8 Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Lee & Kalos (2015).



Εικόνα 5.9 Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) Gucunski et al. (2014).

5.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Επόμενος στόχος αποτελεί η ένταξη της μεθόδου της Φωτογραμμετρίας (CRP) στην πολυκριτηριακή ανάλυση των μεθόδων παρακολούθησης και η σύγκρισή της με τις υπόλοιπες μεθόδους. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να εκτιμηθούν και οι τέσσερις μέθοδοι υπό το πρίσμα κοινών κριτηρίων. Επιλέχθηκε, λοιπόν, η βιβλιογραφία των Kušar et al., (2018) με τα κριτήριά της, έχοντας ως γνώμονα το πλήθος των κριτηρίων που εξετάζει, τον τρόπο αξιολόγησης των τεχνολογιών (π.χ. βασιζόμενη σε προηγούμενες έρευνες, χρήση ερωτηματολογίου και αριθμό συμμετεχόντων σε αυτό) και το έτος δημοσίευσής της. Για τις μεθόδους της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και της Δοκιμής Υπερήχων (UT) λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα που περιέχονται στη βιβλιογραφία αυτή, ενώ για τη Φωτογραμμετρία (CRP) τα στοιχεία που προέκυψαν από τη γνώμη των ειδικών. Με γνώμονα την έρευνα των Kušar et al. (2018) συντάχθηκαν ερωτήσεις που βασίστηκαν στα κριτήρια που εξετάζει και διανεμήθηκαν σε μια ομάδα ειδικών. Πρόκειται για μια δομημένη συνέντευξη όπου ο αριθμός και η μορφή των ερωτημάτων συμβαδίζει με το πλήθος και τη σημασία της προαναφερθείσας βιβλιογραφίας. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται το έντυπο το οποίο κλήθηκαν να απαντήσουν οι ειδικοί για τη μέθοδο της Φωτογραμμετρίας (CRP).

Έχοντας πλέον στοιχεία για το σύνολο των μεθόδων, εκτελείται μια ισοβαρής και μια ανισοβαρής ανάλυση μέσω του PROMETHEE. Η ανισοβαρής ανάλυση πραγματοποιείται ύστερα από στάθμιση των κριτηρίων, όπως αυτή προκύπτει με την εφαρμογή της Εντροπίας. Απώτερος στόχος της όλης διαδικασίας είναι η μερική (PROMETHEE I) και συνολική κατάταξη των μεθόδων (PROMETHEE II), ώστε να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή μέθοδος στο σύνολο των τεσσάρων τεχνολογιών.

5.2.1 Βαθμολόγηση Μεθόδων στα Εξεταζόμενα Κριτήρια

Η βαθμολόγηση των τριών μεθόδων με βάση την εξεταζόμενη βιβλιογραφία (Kušar et al., 2018) έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 5.5.1. Στο σημείο αυτό θα προστεθούν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις απαντήσεις των ειδικών για την μέθοδο της Φωτογραμμετρίας (CRP). Από τις απαντήσεις που συλλέχθηκαν βρέθηκαν οι τελικές τιμές της τεχνολογίας της Φωτογραμμετρίας (CRP) σε κάθε ένα από τα κριτήρια. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η μέση τιμή των βαθμολογιών για κάθε κριτήριο, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνιστούν τις επιδόσεις της Φωτογραμμετρίας (CRP). Στον Πίνακα 5.21 απεικονίζονται οι τιμές των τεσσάρων μεθόδων για τα κριτήρια της έρευνας των Kušar et al. (2018), ύστερα και από την ενσωμάτωση των βαθμολογιών της Φωτογραμμετρίας (CRP), όπως προέκυψε από την εμπειριστατωμένη γνώμη των ειδικών.

Πίνακας 5.21 Τιμές κριτηρίων Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων και Φωτογραμμετρίας.

NDT	ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ					
	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	3	3	5	1	3	1
GPR	3	1	5	2	3	1
UT	3	3	5	1	1	1
CRP	4	3	4	2	4	3

5.2.2 Προσδιορισμός Βαρών

Κομμάτι της μεθοδολογίας αποτελεί η εφαρμογή ανισοβαρούς ανάλυσης μέσω της μεθόδου PROMETHEE. Κατά την ανάλυση αυτή τα κριτήρια δεν θεωρούνται πλέον ισότιμα, αλλά σταθμίζονται με κάποιο βάρος. Η μέθοδος της Εντροπίας χρησιμοποιείται για την απόδοση βαρών στα κριτήρια, και την ανάδειξη της σημαντικότητας καθενός από αυτά. Για την εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνεται υπόψη ο Πίνακας 5.21 με τις τιμές των εναλλακτικών στο πλήθος των κριτηρίων. Ο πίνακας αυτός αποτελεί τον πίνακα απόφασης X για το πρόβλημα.

$$X = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 5 & 1 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 5 & 2 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 4 & 2 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

Πρώτο βήμα στον υπολογισμό των βαρών είναι η κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης. Μέσω της σχέσης (4.12) εξάγεται ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης D .

$$D = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.30 & 0.26 & 0.17 & 0.27 & 0.17 \\ 0.23 & 0.10 & 0.26 & 0.33 & 0.27 & 0.17 \\ 0.23 & 0.30 & 0.26 & 0.17 & 0.09 & 0.17 \\ 0.31 & 0.30 & 0.21 & 0.33 & 0.36 & 0.50 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια, από τη σχέση (4.13) υπολογίζεται η εντροπία για κάθε κριτήριο και από τις σχέσεις (4.15) και (4.16) προκύπτουν τα τελικά βάρη των κριτηρίων (Πίνακας 5.22).

Πίνακας 5.22 Στάθμιση κριτηρίων με τη μέθοδο Εντροπίας.

ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ					
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΑΠΟΤΕΛ/ΤΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΤΕΛ/ΤΩΝ
0.14 %	1.16 %	0.07 %	0.90 %	1.46 %	96.27 %

5.2.3 Ισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Η πρώτη ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί για τις τέσσερις εναλλακτικές αφορά σε αυτή της ισοβαρούς ανάλυσης μέσω του λογισμικού Visual PROMETHEE. Μιας και η διαδικασία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην υποενότητα 5.1.2, εδώ θα παρατεθούν μόνο τα βασικά στάδια και τα αποτελέσματά της. Ειδικότερα, ισχύουν όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ισοβαρή ανάλυση της βιβλιογραφίας των Kuřar et al. (2018), με τη μόνη διαφορά της προσθήκης και των τιμών της Φωτογραμμετρίας (CRP), όπως αυτές προέκυψαν από τη γνώμη των ειδικών. Εφαρμόζοντας, λοιπόν τη μέθοδο PROMETHEE και για το σύνολο των τεχνολογιών προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας αξιολόγησης (Πίνακας 5.23).

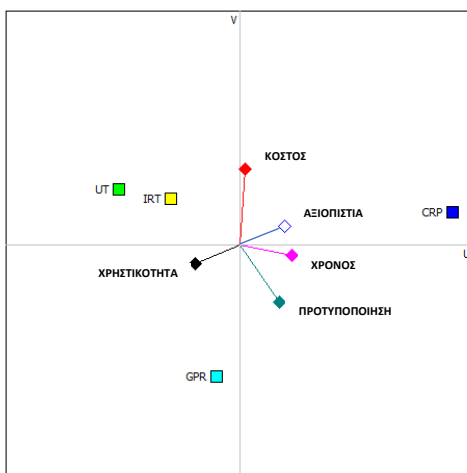
Πίνακας 5.23 Πίνακας αξιολόγησης Ισοβαρούς ανάλυσης.

Ισοβαρής	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗ...	ΠΡΟΤΥΠΟΠ...	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛΟΚ...
Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	max	max	max	max	max	max
Weight	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	3,00	1,00	4,00	1,00	1,00	1,00
Maximum	4,00	3,00	5,00	2,00	4,00	3,00
Average	3,25	2,50	4,75	1,50	2,75	1,50
Standard Dev.	0,43	0,87	0,43	0,50	1,09	0,87
Evaluations						
Infrared Thermo...	average	average	very good	very bad	average	very bad
Ground Penetrati...	average	very bad	very good	bad	average	very bad
Ultrasonic Testing	average	average	very good	very bad	very bad	very bad
Photogrammetry	good	average	good	bad	good	average

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τιμές των εναλλακτικών σε κάθε ένα από τα εξεταζόμενα κριτήρια τόσο σε πινακοποιημένη (Πίνακας 5.24) όσο και σε διαγραμματική μορφή (Εικόνα 5.10). Το εύρος των τιμών που λαμβάνουν είναι μεταξύ -1.00 και 1.00 , απεικονίζοντας τη χειρότερη απόδοση μιας εναλλακτικής σε κάποιο κριτήριο και την καλύτερη απόδοση, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.24 Τιμές εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο για Ισοβαρή ανάλυση.

	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛ/ΤΑ
IRT	-0.33	0.33	0.33	-0.67	0.00	-0.33
GPR	-0.33	-1.00	0.33	0.67	0.00	-0.33
UT	-0.33	0.33	0.33	-0.67	-1.00	-0.33
CRP	1.00	0.33	-1.00	0.67	1.00	1.00

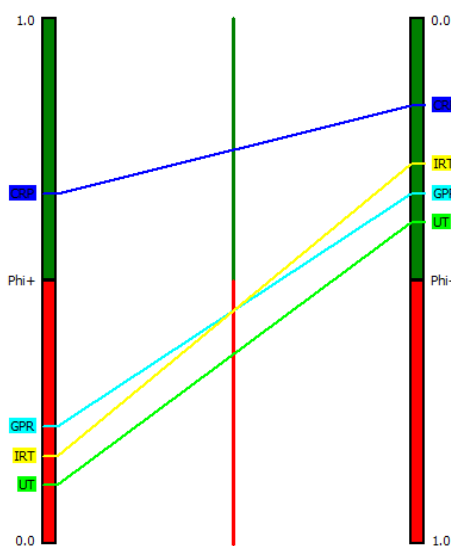


Εικόνα 5.10 Γραφική απεικόνιση των τιμών των κριτηρίων για την Ισοβαρή ανάλυση.

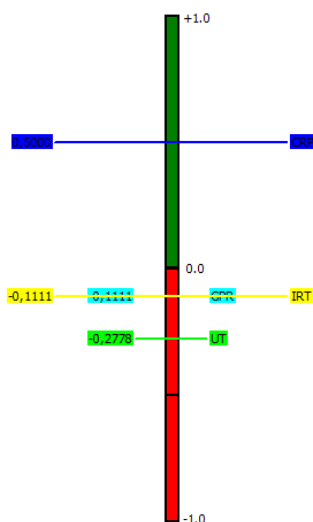
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των δεικτών ροής και η θέση των εναλλακτικών μετά και την ένταξη της Φωτογραμμετρίας (CRP) στη συγκριτική αξιολόγηση (Πίνακας 5.25, Εικόνες 5.11, 5.12).

Πίνακας 5.25 Δείκτες φ για Ισοβαρή ανάλυση.

NDT	ΔΕΙΚΤΗΣ φ			ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
	φ^+	φ^-	φ	
IRT	0.1667	0.2778	-0.1111	3 ^η
GPR	0.2222	0.3333	-0.1111	2 ^η
UT	0.1111	0.3889	-0.2778	4 ^η
CRP	0.6667	0.1667	0.5000	1 ^η



Εικόνα 5.11 Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) για Ισοβαρή ανάλυση.



Εικόνα 5.12 Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) για Ισοβαρή ανάλυση.

5.2.4 Ανισοβαρής Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Το δεύτερο σκέλος αφορά στην εφαρμογή της ανισοβαρούς ανάλυσης μέσω της πολυκριτηριακής μεθόδου. Στην ανάλυση αυτή δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όχι μόνο στις τιμές κάθε εναλλακτικής στα κριτήρια, αλλά και στην σημαντικότητα των κριτηρίων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που κάποια κριτήρια είναι καίρια για τη λήψη της απόφασης, τότε η μέθοδος με την καλύτερη απόδοση σε αυτά ίσως είναι και η βέλτιστη. Η σημαντικότητα των έξι κριτηρίων της έρευνας που εξετάζεται υπολογίστηκε μέσω της Εντροπίας και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5.22.

Κατά την ανισοβαρή ανάλυση ακολουθείται το ίδιο μοτίβο που εφαρμόστηκε και στην ισοβαρή. Η μοναδική διαφοροποίηση παρατηρείται στην εισαγωγή άνισων βαρών σε κάθε ένα από τα κριτήρια. Εισάγοντας, λοιπόν, τα βάρη του Πίνακα 5.22 στην ανάλυση ο πίνακας αξιολόγησης μεταβάλλεται ως εξής (Πίνακας 5.26).

Πίνακας 5.26 Πίνακας αξιολόγησης Ανισοβαρούς ανάλυσης.

Ανισοβαρής	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ	ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗ...	ΠΡΟΤΥΠΟΠ...	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΟΛΥΠΛΟΚ...
Unit	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	max	max	max	max	max	max
Weight	0,14	1,16	0,07	0,90	1,46	96,27
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	3,00	1,00	4,00	1,00	1,00	1,00
Maximum	4,00	3,00	5,00	2,00	4,00	3,00
Average	3,25	2,50	4,75	1,50	2,75	1,50
Standard Dev.	0,43	0,87	0,43	0,50	1,09	0,87
Evaluations						
Infrared Thermo...	average	average	very good	very bad	average	very bad
Ground Penetrati...	average	very bad	very good	bad	average	very bad
Ultrasonic Testing	average	average	very good	very bad	very bad	very bad
Photogrammetry	good	average	good	bad	good	average

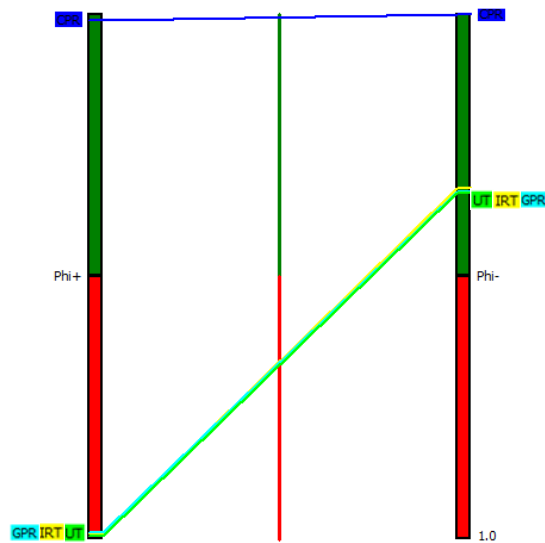
Όσον αφορά τις τιμές των μεθόδων σε κάθε ένα από τα κριτήρια παρατηρείται πως παραμένουν ίδιες με εκείνες της ισοβαρούς (βλέπε Πίνακας 5.24 και Εικόνα 5.10). Ο λόγος είναι πως οι τιμές που λαμβάνουν οι μέθοδοι σε κάθε ένα κριτήριο δεν επηρεάζονται από τα βάρη τους σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας. Η στάθμιση των κριτηρίων παίζει ρόλο στην τελική κατάταξη των μεθόδων υπό το πρίσμα του συνόλου των κριτηρίων και όχι καθενός ξεχωριστά. Επομένως, δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση των στοιχείων αυτών εκ νέου για την ανισοβαρή θεώρηση.

Το κομμάτι των αποτελεσμάτων που εξάγονται και αφορούν στους δείκτες θετικής, αρνητικής και ολικής ροής αποτυπώνεται στον Πίνακα 5.28. Στην τελευταία στήλη του πίνακα καταγράφεται και η ολική κατάταξη των τεσσάρων εναλλακτικών για την πολυκριτηριακή ανάλυση με βάρη, όπως αυτή προέκυψε κατά την εφαρμογή του PROMETHEE II.

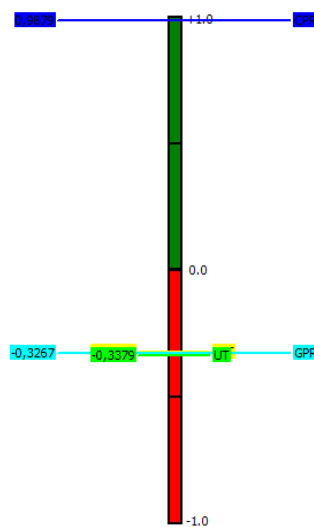
Πίνακας 5.27 Δείκτες φ για Ανισοβαρή ανάλυση.

NDT	ΔΕΙΚΤΗΣ φ			ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
	φ^+	φ^-	φ	
IRT	0.0090	0.3322	-0.3233	2 ^η
GPR	0.0111	0.3378	-0.3267	3 ^η
UT	0.0041	0.3420	-0.3379	4 ^η
CRP	0.9886	0.0007	0.9879	1 ^η

Στις Εικόνες 5.13 και 5.14) παρουσιάζεται η μερική και τελική κατάταξη των τεσσάρων μεθόδων.



Εικόνα 5.13 Μερική κατάταξη (PROMETHEE I) για Ανισοβαρή ανάλυση.



Εικόνα 5.14 Ολική κατάταξη (PROMETHEE II) για Ανισοβαρή ανάλυση.

5.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.3.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Υφιστάμενων Ερευνών

Εφαρμόζοντας την πολυκριτηριακή ανάλυση αρχικά για τις τρεις υφιστάμενες έρευνες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, προκύπτουν κάποια σημαντικά στοιχεία. Εξετάζοντας κάθε βιβλιογραφία ξεχωριστά προκύπτει μια πλήρης κατάταξη των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων, από την περισσότερο προς τη λιγότερο προτιμητέα. Ειδικότερα, σύμφωνα με την έρευνα των Kuşar et al. (2018), στην πρώτη θέση επιλογής ισοβαθμούν δύο από τις τρεις μεθόδους, η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και το Γεωραντάρ (GPR). Το γεγονός αυτό επισημαίνεται από την τιμή που έχει λάβει ο δείκτης καθαρής ροής φ , ο οποίος ισούται με 0.0833 και για τις δύο μεθόδους. Στην τρίτη θέση κατατάσσεται η μέθοδος των Υπερήχων (UT) με τιμή φ ίση με -0.1667 . Η ύπαρξη κοινού δείκτη καθαρής ροής υποδηλώνει την αδιαφορία μεταξύ δύο εναλλακτικών. Συνεπώς, όποια από τις μεθόδους της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) και του Γεωραντάρ (GPR) επιλεγεί είναι το ίδιο για τον αποφασίζοντα. Ωστόσο, η μεγαλύτερη τιμή της καθαρής ροής τους από εκείνη της μεθόδου Υπερήχων (UT) δηλώνει τη σαφή προτίμηση των δύο έναντι της τελευταίας.

Στη δεύτερη βιβλιογραφική αναφορά των Lee & Kalos (2015), παρατηρείται επίσης ισοψηφία, αλλά για τη δεύτερη θέση. Πρώτη και με διαφορά κατατάσσεται η τεχνολογία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) με θετικό δείκτη φ ίσο με 0.6667, ενώ ακολουθούν η Δοκιμή Υπερήχων (UT) και το Γεωραντάρ (GPR) με αρνητικό δείκτη φ και τιμή -0.3333 . Από όσα αναφέρθηκαν για την περίπτωση ισοβαθμίας είναι προφανές πως είναι αδιάφορο ποια από τις μεθόδους Γεωραντάρ (GPR) και Υπερήχοι (UT) θα επιλεγεί ως η δεύτερη καλύτερη. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η κυριαρχία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) συγκριτικά με τις υπόλοιπες δύο, σκεπτόμενοι τη μεγάλη διαφορά που παρουσιάζουν στους δείκτες φ . Από την άλλη, η τρίτη κατά σειρά ανάλυση (των Gucunski et al, 2014) έδωσε πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα ως προς τη σειρά προτίμησης των μεθόδων. Συγκεκριμένα, ανέδειξε ιεραρχικά καλύτερη τη μέθοδο της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), ύστερα το Γεωραντάρ (GPR) και τέλος την τεχνολογία των Υπερήχων (UT). Οι δείκτες καθαρής ροής που δηλώνουν τη σειρά αυτή είναι 0.4000, 0.1000 και -0.5000 αντίστοιχα.

Τα παραπάνω στοιχεία είναι απόρροια της συνολικής ταξινόμησης των μεθόδων όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή του PROMETHEE II. Για την παροχή περισσότερης πληροφορίας στον αποφασίζοντα κατά το στάδιο λήψης της απόφασης, υλοποιήθηκε και το PROMETHEE I. Ως αποτέλεσμα ήταν η μερική κατάταξη των εναλλακτικών και η αναγνώριση των καταστάσεων προτίμησης, αδιαφορίας αλλά και αδυναμίας σύγκρισης μεταξύ τους. Εξετάζοντας, λοιπόν, τους δείκτες θετικής (φ^+) και αρνητικής ροής (φ^-) των εναλλακτικών για την πρώτη βιβλιογραφία (Kuşar et al., 2018) εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα. Η σύγκριση του Γεωραντάρ (GPR) με την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) έδειξε πως αυτές οι δύο μέθοδοι είναι μη συγκρίσιμες, γιατί ο δείκτης θετικής ροής και ο δείκτης αρνητικής ροής της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) είναι μικρότερος ($0.1667 < 0.2500$) και μεγαλύτερος αντίστοιχα ($0.1667 > 0.0833$) από τους δείκτες του Γεωραντάρ (GPR). Όσον αφορά τους θετικούς δείκτες φ^+ του Γεωραντάρ (GPR) και της Δοκιμής Υπερήχων (UT) προκύπτει πως η τιμή της πρώτης μεθόδου είναι μεγαλύτερη από εκείνη της τελευταίας. Επιπλέον, η αρνητική ροή του Γεωραντάρ (GPR) είναι μικρότερη από εκείνη των Υπερήχων (UT) ($0.1667 < 0.2500$). Οι σχέσεις αυτές υποδεικνύουν την ισχυρή προτίμηση του Γεωραντάρ (GPR) έναντι της μεθόδου Υπερήχων (UT). Πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία και για

το τελευταίο ζεύγος εναλλακτικών παρατηρείται πως και η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) υπερισχύει της Δοκιμής των Υπερήχων (UT). Για τις ροές εξόδου ισχύει η σχέση μεταξύ των τιμών $0.1667 > 0.0833$, ενώ για τις ροές εισόδου η σχέση $0.1667 < 0.2500$, με τις πρώτες τιμές να αναφέρονται στη Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και τις τελευταίες στη μέθοδο Υπερήχων (UT). Συμπερασματικά, διαπιστώνεται πως οι μέθοδοι Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και Γεωραντάρ (GPR) προτιμώνται έναντι της Δοκιμής Υπερήχων (UT), ωστόσο οι δύο πρώτες είναι ασύγκριτες μεταξύ τους, κάτι που δείχνει και στον υπεύθυνο λήψης των αποφάσεων πως η συγκεκριμένη είναι η πιο δύσκολη σύγκριση του προβλήματος.

Εφαρμόζοντας την ανάλυση και για τη δεύτερη βιβλιογραφία (Lee & Kalos, 2015) εξήχθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα. Κατά τη σύγκριση των εναλλακτικών της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) και του Γεωραντάρ (GPR) βρέθηκε πως η τιμή φ^+ της πρώτης είναι μεγαλύτερη από ότι της δεύτερης μεθόδου ($0.6667 > 0.0000$). Το αντίστροφο ισχύει για τις τιμές φ^- ($0.0000 < 0.3333$), γεγονός το οποίο συνεπάγεται την κυριαρχία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) σε σχέση με το Γεωραντάρ (GPR). Ωστόσο, υλοποιώντας τη σύγκριση του ζεύγους της Δοκιμής Υπερήχων (UT) και του Γεωραντάρ (GPR), εντοπίστηκε ισοβαθμία μεταξύ των θετικών ($0.0000 = 0.0000$) και αρνητικών ρών του ζεύγους ($0.3333 = 0.3333$). Το συμβάν αυτό απεικονίζει την πλήρη αδιαφορία ανάμεσα στις δύο αυτές τεχνολογίες. Τέλος, εξετάζοντας το σετ με εναλλακτικές την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) και την μέθοδο Υπερήχων (UT) προκύπτει πως η θετική ροή της πρώτης με τιμή ίση με 0.6667 είναι μεγαλύτερη της δεύτερης (0.0000). Στον αντίποδα, για τις αρνητικές ροές ισχύει η ανίσωση $0.0000 < 0.3333$. Επομένως, η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) προτιμάται και της Δοκιμής Υπερήχων (UT). Αποτελεί, δηλαδή, την πλέον κυρίαρχη μέθοδο στην έρευνα των Lee & Kalos (2015).

Τέλος, εξετάζοντας την τρίτη βιβλιογραφία (Gucunski et al., 2014) πραγματοποιείται επίσης σύγκριση των ακόλουθων ζευγών εναλλακτικών, Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)-Γεωραντάρ (GPR), Γεωραντάρ (GPR)-Δοκιμή Υπερήχων (UT) και Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)-Δοκιμή Υπερήχων (UT). Στο πρώτο ζεύγος βρέθηκε πως η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) προτιμάται του Γεωραντάρ (GPR), μιας και για τις θετικές ροές προέκυψε η ανίσωση $0.6000 > 0.2000$, ενώ για τις αρνητικές η $0.2000 < 0.3000$. Στο δεύτερο ζεύγος δηλώνεται η κυριαρχία του Γεωραντάρ (GPR) έναντι της Δοκιμής Υπερήχων (UT) (φ^+ : $0.4000 > 0.1000$ και φ^- : $0.3000 < 0.6000$), ενώ μεταξύ των εναλλακτικών του τρίτου ζεύγους προτιμάται η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) σε σχέση με τη μέθοδο Υπερήχων (UT) (φ^+ : $0.6000 > 0.1000$ και φ^- : $0.2000 < 0.6000$). Συνεπώς, η σειρά προτίμησης των μεθόδων από την πλέον προς τη λιγότερο προτιμητέα για το παρόν σενάριο είναι η εξής: Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), Γεωραντάρ (GPR), Δοκιμή Υπερήχων (UT).

Όσον αφορά την απόδοση των μεθόδων σε κάθε ένα από τα κριτήρια ξεχωριστά προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (βλέπε Πίνακες 5.15 έως 5.17). Στην έρευνα των Kušar et al. (2018) παρατηρείται πως καμία μέθοδος δεν υπερέχει έναντι της άλλης σε τρία από τα έξι κριτήρια, στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, στη χρησιμότητα της κάθε μεθόδου και στην πολυπλοκότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων, μιας και όλες λαμβάνουν την τιμή 0.00. Ως προς το κριτήριο της προτυποποίησης διαφαίνεται πως η μέθοδος Γεωραντάρ (GPR) έχει τα περισσότερα πρότυπα με βάση τα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος (1.00). Ωστόσο, το κριτήριο του χρόνου και του κόστους δείχνουν ως χειρότερη μέθοδο τη Δοκιμή Υπερήχων -UT (-1.00) και το Γεωραντάρ -GPR (-1.00) αντίστοιχα.

Στην έρευνα των Lee & Kalos (2015), παρατηρείται πως η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) είναι η πλέον εύκολη μέθοδος στην εφαρμογή της (1.00) και η πιο αποδοτική (1.00). Στο κριτήριο της αποτελεσματικότητας και οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζουν την ίδια εικόνα και καμία δεν υπερέρχει έναντι της άλλης (0.00). Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Gucunski et al. (2014) εντοπίζεται η κυριαρχία της μεθόδου της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) στην πλειοψηφία των κριτηρίων και συγκεκριμένα στην ευκολία χρήσης (1.00), στο κόστος (1.00) και στην ταχύτητα (1.00). Επιπλέον η μέθοδος των Υπερήχων (UT) παρουσιάζει τη χειρότερη εικόνα στα κριτήρια της ταχύτητας (-1.00) και της ευκολίας χρήσης (-1.00). Το Γεωραντάρ (GPR) από την άλλη έχει την καλύτερη απόδοση στο κριτήριο της επαναληψιμότητας (1.00), ενώ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι ίδια και για τις τρεις μεθόδους (0.00).

5.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Συνόλου Μεθόδων

Στο δεύτερο σκέλος της ανάλυσης εφαρμόστηκε η μέθοδος PROMETHEE για τις τέσσερις εναλλακτικές και για κριτήρια με και χωρίς βάρη. Στην περίπτωση της ισοβαρούς ανάλυσης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Αρχικά, με τη βοήθεια των δεικτών καθαρής ροής φ και εφαρμόζοντας το PROMETHEE II, πραγματοποιείται η πλήρης ταξινόμηση των τεσσάρων εναλλακτικών. Ειδικότερα, ως βέλτιστη μέθοδος θεωρείται η Φωτογραμμετρία (CRP) με τη χρήση UAV, καθώς διαθέτει το μεγαλύτερο μη αρνητικό δείκτη $\varphi = 0.5000$. Δεύτερο σε σειρά επιλογής είναι το Γεωραντάρ (GPR) με τιμή καθαρής ροής ίση με -0.1111 . Τρίτη, η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) με τιμή του φ επίσης -0.1111 . Την τελευταία θέση προτίμησης καταλαμβάνει η Δοκιμή Υπερήχων (UT) με το δείκτη φ να ισούται με -0.2778 .

Κατά την εφαρμογή του PROMETHEE I προκύπτει η μερική ταξινόμηση των εναλλακτικών. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τις ροές εξόδου και εισόδου του Γεωραντάρ (GPR) με εκείνες της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) ($\varphi^+ : 0.2222 > 0.1667, \varphi^- : 0.3333 > 0.2778$) φανερώνεται η αδυναμία σύγκρισης των μεθόδων αυτών. Εξετάζοντας τους ίδιους δείκτες ροής για τη σύγκριση της Φωτογραμμετρίας (CRP) με την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) ($\varphi^+ : 0.6667 > 0.1667, \varphi^- : 0.1667 < 0.2778$), με τη Δοκιμή Υπερήχων (UT) ($\varphi^+ : 0.6667 > 0.1111, \varphi^- : 0.1667 < 0.3889$) και με το Γεωραντάρ (GPR) ($\varphi^+ : 0.6667 > 0.2222, \varphi^- : 0.1667 < 0.3333$), προκύπτει η κυριαρχία της πρώτης έναντι των υπολοίπων. Στην περίπτωση ελέγχου της Δοκιμής Υπερήχων (UT) σε σχέση με την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) ($\varphi^+ : 0.1111 < 0.1667, \varphi^- : 0.3889 > 0.2778$), αλλά και το Γεωραντάρ (GPR) ($\varphi^+ : 0.1111 < 0.2222, \varphi^- : 0.3889 < 0.3333$) φαίνεται πως η Δοκιμή Υπερήχων (UT) έρχεται τελευταία σε προτίμηση στο παρόν πρόβλημα.

Στην ανισοβαρή ανάλυση, σύμφωνα με τους δείκτες καθαρής ροής, η τελική κατάταξη των τεχνολογιών έχει ως εξής. Πρώτη στη θέση επιλογής, με μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες, τοποθετείται η Φωτογραμμετρία (CRP) ($\varphi = 0.9879$), δεύτερη η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) ($\varphi = -0.3233$), τρίτο το Γεωραντάρ (GPR) ($\varphi = -0.3267$) και τέταρτη η μέθοδος των Υπερήχων (UT) ($\varphi = -0.3379$). Στο στάδιο της εφαρμογής του PROMETHEE I και της μερικής ταξινόμησης των εναλλακτικών παρατηρούνται τα ακόλουθα. Αρχικά, οι δείκτες θετικής ροής της Φωτογραμμετρίας (CRP) υπερέρχουν έναντι των άλλων τριών τεχνολογιών. Επιπλέον, οι δείκτες αρνητικής ροής της ίδιας τεχνολογίας υποσκελίζονται σε σύγκριση με εκείνους των υπολοίπων. Συγκεκριμένα, οι τιμές των δεικτών φ^+ και φ^- της Φωτογραμμετρίας (CRP) ισούνται με 0.9886 και 0.0007. Ενώ οι τιμές για την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) είναι 0.0090 και 0.3322, για το Γεωραντάρ (GPR) 0.0111 και 0.3378



και για τη Δοκιμή Υπερήχων (UT) 0.0041 και 0.3420 αντίστοιχα. Τα παραπάνω συνεπάγονται την προτίμηση της Φωτογραμμετρίας (CRP) στο σύνολο των τεσσάρων εναλλακτικών. Κατά τη σύγκριση της Δοκιμής Υπερήχων (UT) με τις τεχνολογίες του Γεωραντάρ (GPR) και της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) προκύπτει πως η τιμή της ροής εξόδου (φ^+) της πρώτης είναι μικρότερη από των άλλων δύο μεθόδων ($0.0041 < 0.0111, 0.0041 < 0.0090$), ενώ η τιμή της ροής εισόδου (φ^-) είναι μεγαλύτερη ($0.3420 > 0.3378, 0.3420 > 0.3322$). Επομένως, η μέθοδος των Υπερήχων (UT) κυριαρχείται από τις άλλες δύο μεθόδους. Όσο για τις μεθόδους Γεωραντάρ (GPR) και Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) φαίνεται πως είναι ασύγκριτες μεταξύ τους, μιας και οι δύο δείκτες φ του Γεωραντάρ (GPR) είναι μεγαλύτεροι από της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) ($\varphi^+ : 0.0111 > 0.0090$ και $\varphi^- : 0.3378 > 0.3322$).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ

Οι λιμενικές κατασκευές αποτελούν σημαντικά έργα για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας περιοχής. Ωστόσο, ο κορεσμός που παρατηρείται στην κατασκευή νέων υποδομών τέτοιου τύπου οδηγεί στην ανάγκη για παρακολούθηση των υφιστάμενων λιμένων. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της παρακολούθησης των λιμενικών έργων. Η παρούσα διπλωματική στοχεύει στην ανάπτυξη μιας ευέλικτης μεθοδολογίας, σύμφωνα με την οποία μπορεί να προκύψει η βέλτιστη δυνατή μέθοδος. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει σημαντικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας, καθώς επίσης και από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

6.1.1 Ευρήματα από Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σύμφωνα με την διεξοδική βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι όσον αφορά στο κομμάτι των μεθόδων, καμία από τις τεχνολογίες που περιγράφηκαν δεν έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης μεγάλου πλήθους φθορών. Ειδικότερα, οι μέθοδοι της Φωτογραμμετρίας (CRP) και της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για φθορές στην επιφάνεια των λιμενικών υποδομών. Στον αντίποδα, τεχνολογίες όπως το Γεωραντάρ (GPR) και οι Υπέρηχοι (UT) εντοπίζουν φθορές κάτω από την επιφάνεια της κατασκευής. Συνεπώς, πολλές φορές απαιτείται ο συνδυασμός μεθόδων για την αξιόπιστη καταγραφή της κατάστασης των υποδομών.

Επιπλέον, ο τρόπος εφαρμογής κάθε μιας στο πεδίο διαφέρει, κάνοντας την πιο εύκολη ή πιο δύσκολη στη χρήση. Για παράδειγμα, η Δοκιμή Υπερήχων (UT) απαιτεί τον έλεγχο συγκεκριμένων σημείων πάνω στις λιμενικές υποδομές. Συνεπώς, είναι αναγκαία μια προεργασία ως προς τον εντοπισμό των κρίσιμων σημείων που χρήζουν παρακολούθηση. Απαιτείται, δηλαδή, μια σχετική εμπειρία του χειριστή ως προς τα πιθανά σημεία φθορών μιας υποδομής σκυροδέματος και ιδιαίτερα μιας λιμενικής υποδομής. Οι μέθοδοι της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και της Φωτογραμμετρίας (CRP) με χρήση μη επανδρωμένου οχήματος πραγματοποιούν σάρωση στην κατασκευή, κάνοντας έτσι την διαδικασία αρκετά πιο γρήγορη και εύκολη. Λόγω του τρόπου λειτουργίας τους, μπορεί να δημιουργηθεί κι ένα τρισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής, με βάση το οποίο θα πραγματοποιούνται μεταγενέστερες παρακολουθήσεις.

Παρόλο που οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι θεωρούνται πιο προηγμένες τεχνολογίες για την αξιολόγηση των υποδομών, η οπτική επισκόπηση συνεχίζει να αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο. Ακόμη και μετά την εκτέλεση μιας Μη Καταστρεπτικής Μεθόδου, πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η οπτική ταυτοποίηση των σημείων των φθορών πάνω στην κατασκευή από εξειδικευμένους επιθεωρητές. Σε δυσπρόσιτες περιοχές μιας κατασκευής, είναι αρκετά δύσκολο να πραγματοποιηθεί μια ενέργεια σαν κι αυτή. Επομένως, η αξιολόγηση τέτοιων τμημάτων ίσως και να μη θεωρηθεί τόσο ακριβής στα αποτελέσματά της.

Όσον αφορά στην επιλογή μιας μεθόδου για την παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράγοντες. Παρόλο που πολλές από τις μεθόδους μπορεί να χαρακτηρίζονται ως πιο αξιόπιστες στα αποτελέσματά τους, το κόστος αλλά και η ανεπαρκής διαθεσιμότητά τους μπορεί να τις κάνει αποτρεπτικές. Επομένως, η προτίμηση μιας μεθόδου πρέπει να πραγματοποιείται βασιζόμενη στο τελικό όφελος που θα είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων όπως το κόστος, η αξιοπιστία, η έλλειψη εμπειρίας κ.ά.

6.1.2 Ευρήματα Ανάλυσης

Εφαρμόζοντας τις δύο προσεγγίσεις για την συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων παρακολούθησης των λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα (1. μέσω υφιστάμενων βιβλιογραφικών ερευνών για τις μεθόδους της Υπέρυθρης Θερμογραφίας – IRT, του Γεωραντάρ – GPR και της Δοκιμής Υπερήχων - UT, 2. μέσω υβριδικού μοντέλου υφιστάμενης βιβλιογραφικής έρευνας για τις τρεις μεθόδους και γνώμης των ειδικών για τη μέθοδο της Φωτογραμμετρίας - CRP.) εξάγονται ποικίλα συμπεράσματα. Αρχικά, κατά την εκτέλεση της ισοβαρούς ανάλυσης για τις υφιστάμενες βιβλιογραφίες που περιγράφηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο, διαπιστώθηκε ότι και στις τρεις έρευνες προέκυψε η ίδια βέλτιστη μέθοδος, και συγκεκριμένα εκείνη της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT). Μάλιστα στις δύο από τις τρεις έρευνες είχε την καλύτερη εικόνα στην πλειοψηφία των κριτηρίων που κάθε μια αναφέρει. Ειδικότερα, στην έρευνα των Lee & Kalos (2015) υπερέχει των υπολοίπων στα κριτήρια της δυσκολίας εφαρμογής και της αποδοτικότητας, στην έρευνα των Gucunski et al. (2014) στα κριτήρια της ταχύτητας, του κόστους και της ευκολίας στη χρήση, ενώ σε εκείνη των Kušar et al. (2018) δεν κυριαρχεί σε κανένα από τα κριτήρια. Ωστόσο, η συνολική της εικόνα στο πλήθος των κριτηρίων συγκριτικά με τις υπόλοιπες συντελεί στην ανάδειξή της ως καλύτερη μέθοδος. Ως δεύτερη στη σειρά μπορεί να θεωρηθεί η μέθοδος του Γεωραντάρ (GPR), διότι συγκριτικά με τη Δοκιμή Υπερήχων (UT) δεν κατέλαβε σε καμία από τις βιβλιογραφίες την τελευταία θέση. Συνεπώς, για τα διαφορετικά κριτήρια που διερευνώνται σε καθεμία από τις τρεις έρευνες, τη διαφορετική χρονική περίοδο πραγματοποίησης της κάθε έρευνας και για διαφορετικό κοινό στο οποίο έγινε η διανομή των σχετικών ερωτηματολογίων, προέκυψε ότι η μέθοδος της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) υπερτερεί έναντι των άλλων δύο εναλλακτικών.

Εξετάζοντας τα κριτήρια που κάθε μια έρευνα αξιολογεί εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα. Η μέθοδος της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) θεωρείται η πλέον εύκολη τεχνολογία ως προς την εφαρμογή της, καθώς έχει την καλύτερη εικόνα στα κριτήρια της ευκολίας χρήσης (Gucunski et al., 2014) και της δυσκολίας εφαρμογής (Lee & Kalos, 2015). Για να μη γίνει παρανόηση ως προς το κριτήριο της δυσκολίας χρειάζεται να σημειωθεί ότι η απόδοση τιμών στο τελευταίο κριτήριο έχει πραγματοποιηθεί με αντίστροφη βαθμολόγηση. Επομένως, η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) θεωρείται η πιο εύκολη στην εφαρμογή της, αφού έλαβε την υψηλότερη τιμή στο κριτήριο αυτό. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τους Gucunski et al. (2014) είναι και η πιο γρήγορη τεχνολογία με το μικρότερο κόστος. Ωστόσο, το κοινό που αποκρίθηκε στην έρευνα των Kušar et al. (2018) ανέφερε πως το Γεωραντάρ (GPR) απαιτεί τον ίδιο χρόνο με τη μέθοδο της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT), ενώ το κόστος της είναι παραπλήσιο με εκείνο της Δοκιμής Υπερήχων (UT). Παρατηρείται, λοιπόν, μια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των δύο αυτών ταυτόσημων κριτηρίων για τις δύο έρευνες, πράγμα που πιθανώς οφείλεται στη διαφορετική χρονική περίοδο εφαρμογής της έρευνας και στο διαφορετικό κοινό. Τέλος, η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) θεωρείται η πλέον αποδοτική μέθοδος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, ενώ είναι η πιο αδύναμη στο κριτήριο της επαναληψιμότητας.



Το Γεωραντάρ (GPR) αποτελεί την πιο κοστοβόρα τεχνολογία με βάση τους Kuzar et al. (2018), ενώ οι Gucunski et al. (2014) την ορίζουν τόσο ακριβή όσο και η Δοκιμή των Υπερήχων (UT). Όμως είναι η μέθοδος με τα περισσότερα πρότυπα, γεγονός που την κάνει πιο έμπιστη ως μέθοδο στην εφαρμογή της. Ακόμη, είναι η μοναδική με τη μεγαλύτερη ευκολία επανάληψης, πράγμα που οφείλεται στην ικανότητά της να σαρώνει την εξεταζόμενη επιφάνεια. Όσον αφορά τη μέθοδο των Υπερήχων (UT), αποτελεί την πλέον χρονοβόρα τεχνολογία κατά γενική ομολογία, αλλά και την πιο δύσκολη στη χρήση σύμφωνα με τους Gucunski et al. (2014). Ωστόσο, οι Lee & Kalos (2015) την ταξινομούν στο ίδιο επίπεδο δυσκολίας με εκείνο του Γεωραντάρ (GPR), όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως δεν κυριαρχεί σε κανένα από τα κριτήρια, κάτι που ασφαλώς δικαιολογεί και την τελευταία θέση στη συνολική της κατάταξη.

Με την προσθήκη της μεθόδου της Φωτογραμμετρίας (CRP) στην πολυκριτηριακή ανάλυση όλων των εναλλακτικών και υιοθετώντας την ισοβαρή θεώρηση παρατηρήθηκε μια διαφοροποίηση στην τελική κατάταξη. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας (CRP) θεωρείται η κυρίαρχη μέθοδος με διαφορά έναντι των άλλων τριών. Επιπρόσθετα, η Δοκιμή των Υπερήχων (UT) είναι η λιγότερο προτιμητέα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μερικής κατάταξης. Όσον αφορά στις υπόλοιπες δύο μεθόδους, η πλήρης κατάταξη ταξινομεί το Γεωραντάρ (GPR) στην δεύτερη θέση προτίμησης και την Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT) στην τρίτη, παρόλο που έχουν τον ίδιο δείκτη καθαρής ροής σύμφωνα με το PROMETHEE II. Για να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες για την σχέση μεταξύ των δύο χρειάζεται να εξεταστούν τα αποτελέσματα της μερικής τους κατάταξης. Σύμφωνα με την ανάλυση φαίνεται πως οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν αδυναμία σύγκρισης μεταξύ τους. Επομένως, αποτελεί μια δύσκολη περίπτωση σύγκρισης για το παρόν πρόβλημα.

Όμοια με την ισοβαρή θεώρηση, τα αποτελέσματα της ανισοβαρούς ανάλυσης δείχνουν επίσης ως καλύτερη επιλογή τη μέθοδο της Φωτογραμμετρίας (CRP), ενώ την ακολουθούν η Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), το Γεωραντάρ (GPR) και τελευταία η Δοκιμή Υπερήχων (UT). Παρατηρείται, λοιπόν, μια διαφοροποίηση στην κατάταξη μετά και την ενσωμάτωση των βαρών στην ανάλυση. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται στην τρίτη και τέταρτη θέση, δηλαδή μεταξύ του Γεωραντάρ (GPR) και της Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός πως το Γεωραντάρ (GPR) λαμβάνει καλύτερη βαθμολογία σε ένα ή περισσότερα σημαντικά για το πρόβλημα κριτήρια, με μεγαλύτερη βαρύτητα. Εξετάζοντας και την περίπτωση της μερικής κατάταξης για την ανισοβαρή ανάλυση εξάγονται τα εξής συμπεράσματα. Κατά τη σύγκριση των μεθόδων Γεωραντάρ (GPR) και Υπέρυθρης Θερμογραφίας (IRT) προκύπτει πως υπάρχει αδυναμία σύγκρισης. Πιθανόν, η απόδοση της μίας σε συγκεκριμένα κριτήρια να είναι τόσο καλή όσο η απόδοση της δεύτερης στα υπολειπόμενα κριτήρια. Το γεγονός αυτό τις καθιστά, όπως και στην ισοβαρή ανάλυση, ασύγκριτες μεταξύ τους. Επομένως, στην αξιολόγηση και των τεσσάρων τεχνολογιών φαίνεται πως κάθε μια από αυτές τις μεθόδους έχει καλύτερη εικόνα σε διαφορετικά κριτήρια. Στην περίπτωση που κάτι τέτοιο συνέβαινε για την πρώτη θέση προτίμησης, ο υπεύθυνος αποφάσεων θα έπρεπε να επιλέξει ποια κριτήρια τον ενδιαφέρουν περισσότερο στο πρόβλημα, ώστε να προκύψει η βέλτιστη μέθοδος. Άρα, όπως έχει αναφερθεί και προγενέστερα, απαιτείται και η συμβολή του αποφασίζοντα για να γίνει η προτιμώμενη λύση αποδεκτή

Αναλύοντας τώρα και την εικόνα των τεσσάρων τεχνολογιών στα έξι κριτήρια παρατηρείται πως η Φωτογραμμετρία (CRP) κυριαρχεί στα κριτήρια της αξιοπιστίας, της πολυπλοκότητας των αποτελεσμάτων και του χρόνου. Επομένως, είναι η πλέον γρήγορη στην εφαρμογή της μέθοδο, με

την μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα και με τη λιγότερη δυσκολία στην εξαγωγή τους. Ωστόσο, περιορίζεται ως προς τη χρηστικότητά της, δηλαδή δεν είναι η καταλληλότερη για την ανίχνευση διαφορετικών τύπων φθορών. Το Γεωραντάρ (GPR) αποτελεί την πιο κοστοβόρα μέθοδο παρακολούθησης. Ο εξοπλισμός της αλλά και τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων την κάνουν αρκετά ακριβή ως μέθοδο. Η Δοκιμή Υπερήχων (UT) προκύπτει από την ανάλυση ότι είναι η πλέον χρονοβόρα τεχνολογία, πράγμα το οποίο δικαιολογεί ο τρόπος εφαρμογής της. Πρόκειται για μια σημειακή μέθοδος που εξετάζει κάθε προκαθορισμένο σημείο της επιφάνειας ξεχωριστά, χωρίς να σαρώνει την υποδομή όπως οι υπόλοιπες μέθοδοι. Τέλος, η Υπέρυθρη Θερμογραφία παρατηρείται πως δεν υπερέρχει ούτε υποσκελίζεται σε κανένα από τα εξεταζόμενα κριτήρια. Αντιθέτως, δείχνει μια μέτρια εικόνα στο σύνολο των κριτηρίων, κάτι που την αποκλείει από την πρώτη και την τελευταία θέση προτίμησης. Θέτοντας τώρα και τα βάρη των κριτηρίων υπό εξέταση, παρατηρείται πως η πολυπλοκότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων και η διάρκεια θεωρούνται τα δύο πιο σημαντικά κριτήρια για την ανάλυση, ενώ η χρηστικότητα το πλέον αδιάφορο. Συνδυάζοντας την απόδοση της Φωτογραμμετρίας (CRP) στα κριτήρια αυτά και των βαρών τους, γίνεται αντιληπτή η κυριαρχία της μεθόδου.

Ύστερα από το σύνολο των αναλύσεων το πιο ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι πως η μέθοδος των Υπερήχων (UT) είναι η λιγότερο προτιμητέα για την αξιολόγηση των λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα στο παρόν πολυκριτηριακό πρόβλημα. Επίσης, τόσο στην ισοβαρή όσο και στην ανισοβαρή θεώρηση για την πολυκριτηριακή αξιολόγηση των τεσσάρων μεθόδων, παρατηρήθηκε η υπεροχή της Φωτογραμμετρίας (CRP) έναντι των υπολοίπων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση της μεθόδου αυτής προέκυψε από την γνώμη και την εμπειρία ειδικών, οι οποίοι κλήθηκαν να βαθμολογήσουν αποκλειστικά και μόνο τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Στην περίπτωση αξιολόγησης του συνόλου των μεθόδων από μερίδα ειδικών για παραπάνω από μία μεθόδους, μπορεί να εμφανίζονταν διαφοροποιήσεις στη σειρά προτίμησης. Ως προς τις μεθόδους Γεωραντάρ (GPR) και Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT), εντοπίζεται διαφοροποίηση στη δεύτερη και τρίτη θέση προτίμησης κατά την ισοβαρή και ανισοβαρή ανάλυση. Η στάθμιση των κριτηρίων παίζει σημαντικό ρόλο για την εύρεση της δεύτερης σε σειρά μεθόδου υπεροχής. Βέβαια σε κάθε περίπτωση πρόκειται για μια τυπική ταξινόμηση των μεθόδων αυτών, καθώς η κυριαρχία της Φωτογραμμετρίας (CRP) είναι εμφανής και οι διαφορές των υπολειπόμενων τεχνολογιών μικρές.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση για μεθόδους οι οποίες δεν έχουν εκτιμηθεί καθαρά ως προς την επίδοσή τους στην παρακολούθηση λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα. Συνεπώς, οι αναλύσεις βασίστηκαν σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση υποδομών από σκυρόδεμα (γέφυρες) για τις οποίες μπορεί να γίνει μια προκαταρκτική ασφαλής αντιστοίχιση. Για την εξαγωγή περισσότερων αποτελεσμάτων, θα πρέπει να ελεγχθούν λεπτομερέστερα οι τέσσερις αυτές μέθοδοι ως προς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που θέτει η εφαρμογή τους ειδικά στις λιμενικές υποδομές από σκυρόδεμα.

Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη πως η αξιοποίηση ενός πλήρους ερωτηματολογίου στο πλαίσιο της ποσοτικοποίησης και της στάθμισης των διαφόρων κριτηρίων συμβάλλει σημαντικά στην αποτελεσματική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την πολυκριτηριακή ανάλυση των μεθόδων παρακολούθησης των λιμενικών υποδομών, προτείνεται η διάθεσή του σε μεγαλύτερη



μερίδα κοινού, όπως διαχειριστές τεχνικών έργων, Υπουργεία Μεταφορών, πολιτικούς μηχανικούς, ειδικούς στις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους και ακαδημαϊκούς. Με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζεται η διαφορετικότητα στις απαντήσεις που μπορεί να δώσουν οι διαφορετικές ομάδες και συνηπολογίζεται κατά την εφαρμογή των πολυκριτηριακών αναλύσεων.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως πλήθος πολυκριτηριακών μεθόδων και μεθόδων προσδιορισμού συντελεστών βαρύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός προβλήματος όπως αυτό. Η επιλογή της μεθόδου PROMETHEE, δεν αποτελεί μονόδρομο, παρόλο που έχει προταθεί ως πολλά υποσχόμενη πρακτική για συγκριτική αξιολόγηση. Η εφαρμογή της ανάλυσης με διαφορετική μέθοδο ή ακόμη και με περισσότερες μεθόδους, μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερα συμπεράσματα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Abdelkhalek, S., & Zayed, T. (2019). State-of-the-Art Review of Defect Detection in Concrete Bridge Deck. *Constructing Smart Cities: Proceedings of the CIB World Building Congress*, (pp. 90-100). Hong Kong.
- Abdelkhalek, S., & Zayed, T. (2020). Comprehensive Inspection System for Concrete Bridge Deck Application: Current Situation and Future Needs. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(5), p. 16. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001484.
- Abdelkhalek, S., & Zayed, T. (2021). Performance Assessment Model of Non-Destructive Technologies in Inspecting Concrete Bridge Decks. *Structure and Infrastructure Engineering*, p. 22. doi:10.1080/15732479.2021.1937234.
- Aber, J. S., Marzolff, I., & Ries, J. (2010). Photogrammetry. In J. S. Aber, I. Marzolff, & J. B. Ries (Eds.), *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications* (pp. 23-39). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1.
- Abu Dabous, S., & Feroz, S. (2020). Condition Monitoring of Bridges with Non-Contact Testing Technologies. *Automation in Construction*, 116, p. 20. doi:10.1016/j.autcon.2020.103224.
- ACI 228.2R-13. (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. USA: American Concrete Institute.
- ACI 228.2R-98. (1998). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. USA: American Concrete Institute.
- 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), p. 10. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000802.
- Aggelis, D. G., Kordatos, E. Z., Soulioti, D. V., & Matikas, T. E. (2010). Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(10), pp. 1888-1897. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014.
- Agin, G. (1980). Computer Vision Systems for Industrial Inspection and Assembly. *Computer*, 13(5), pp. 11-20. doi:10.1109/MC.1980.1653613.
- Ahmed, H., La, H., & Gucunski, N. (2020). Review of Non-Destructive Civil Infrastructure Evaluation for Bridges: State-of-the-Art Robotic Platforms, Sensors and Algorithms. *Sensors*, 20(14), p. 38. doi:10.3390/s20143954.
- Akgul, F. (2021). Inspection and Evaluation of a Network of Concrete Bridges Based on Multiple NDT Techniques. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(8), pp. 1076-1095. doi:10.1080/15732479.2020.1790016.
- Al Qurishee, M., Wu, W., Atolagbe, B., El Said, S., & Ghasemi, A. (2019). Non-Destructive Test Application in Civil Infrastructure. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(12), pp. 2092-2014.



- Alani, A. M., & Tosti, F. (2018). GPR Applications in Structural Detailing of a Major Tunnel Using Different Frequency Antenna Systems. *Construction and Building Materials*, 158, pp. 1111-1122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.100.
- Alani, A. M., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2013). Applications of Ground Penetrating Radar (GPR) in Bridge Deck Monitoring and Assessment. *Journal of Applied Geophysics*, 97, pp. 45-54. doi:10.1016/j.jappgeo.2013.04.009.
- Alani, A., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2014). Integrated Health Assessment Strategy Using NDT for Reinforced Concrete Bridges. *NDT & E International*, 61, pp. 80-94. doi:10.1016/j.ndteint.2013.10.0.
- Al-Marri, S., AlQuzweeni, S. S., Hashim, K. S., AlKhaddar, R., Kot, P., AlKizwini, R. S., . . . Al-Khafaji, Z. S. (2020). Ultrasonic-Electrocoagulation Method for Nitrate Removal from Water. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. In *2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering Technologies*. 888, p. 9. Najaf, Iraq: IOP Publishing Ltd. doi:10.1088/1757-899X/888/1/012073.
- Alnaimi, H., Idan, I., Al-Janabi, A., Hashim, K., Gkantou, M., Zubaidi, S., . . . Muradov, M. (2020). Ultrasonic-Electrochemical Treatment for Effluents of Concrete Plants. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. In *2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering Technologies*. 888, p. 10. Najaf, Iraq: IOP Publishing Ltd. doi:10.1088/1757-899X/888/1/012063.
- Anastasopoulos, A., Kourousis, D., Botten, S., & Wang, G. (2009). Acoustic Emission Monitoring for Detecting Structural Defects in Vessels and Offshore Structures. *Ships and Offshore Structures*, 4(4), pp. 363-372. doi:10.1080/17445300903133099.
- Annan, A. P. (2002). GPR-History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 3(4), pp. 253-270. doi:10.1023/A:1020657129590.
- Arumugam, V., Chelliah, S., Santulli, C., Sarasini, F., & Stanley, A. (2011). A Global Method for the Identification of Failure Modes in Fiberglass Using Acoustic Emission. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), pp. 954-966. doi:10.1520/JTE103730.
- ASCE. (2015). *Waterfront Facilities Inspection and Assessment*. (P. Ronald E. Heffron, Ed.) United States: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784413579.
- ASCE. (2017). *2017 Infrastructure Report Card: A Comprehensive Assessment of America's Infrastructure*.
- ASTM C1383-04. (2010). *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. ASTM International. doi:10.1520/C1383-04R10.
- ASTM D4788-03. (2013). *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/D4788-03R13.
- Atasoy, M., Karanlı, F., Biyık, C., & Demir, O. (2006). Determining Land Use Changes with Digital Photogrammetric Techniques. *Environmental Engineering Science*, 23(4), pp. 712-721. doi:10.1089/ees.2006.23.712.



- Azevedo de Almeida, B., & Mostafavi, A. (2016). Resilience of Infrastructure Systems to Sea-Level Rise in Coastal Areas: Impacts, Adaptation Measures, and Implementation Challenges. *Sustainability*, 8(11), p. 28. doi:10.3390/su8111115.
- Baruch, Y. (1999). Response Rate in Academic Studies-A Comparative Analysis. *Human Relations*, 52(4), pp. 421-438. doi:10.1177/001872679905200401.
- Bauer, E., Milhomem, P., & Aidar, L. (2018). Evaluating The Damage Degree of Cracking in Facades Using Infrared Thermography. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(3), pp. 517–528. doi:10.1007/s13349-018-0289-0.
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M. R., Akciz, S., Thiele, S. T., & Bangash, H. A. (2014). Ground-Based and UAV-Based Photogrammetry: A Multi-Scale, High-Resolution Mapping Tool for Structural Geology and Paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, pp. 163-178. doi:10.1016/j.jsg.2014.10.007.
- Boéro, J., Schoefs, F., Yañez-Godoy, H., & Capra, B. (2012). Time-Function Reliability of Harbour Infrastructures from Stochastic Modelling of Corrosion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(10), pp. 1187–1201. doi:10.1080/19648189.2012.688611.
- Bohse, J. (2013). Acoustic Emission. In H. Czichos (Ed.), *Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems* (pp. 137-160). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-25850-3_8.
- Brans, J. (1982). Lingénierie de la décision. Elaboration dinstruments daide à la décision. Méthode PROMETHEE. In R. Nadeau, & M. Landry, *L'aide à la décision: Nature, instruments et perspectives d'avenir* (pp. 183-214). Presses de l'Université Laval.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science*, 31(6), pp. 647-656. doi:10.1287/mnsc.31.6.647.
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to Select and How to Rank Projects: The Promethee Method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), pp. 228-238. doi:10.1016/0377-2217(86)90044-5.
- Brans, J.-P., & De Smet, Y. (2016). PROMETHEE Methods. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. Figueira (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 187-219). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- Carino, N. (2015). Impact Echo: The Fundamentals. In *International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* (p. 18). Berlin, Germany: BAM.
- Carlos, M., Cole, P., Vahaviolos, S., & Halkyard, T. (2000). Acoustic Emission Bridge Inspection/Monitoring Strategies. In *4th Structural Materials Technology-An NDT Conference*, (pp. 179-183). Atlantic City, New Jersey.
- Champiri, M., Sajjadi, S., Mousavizadegan, H. S., & Moodi, F. (2016). Assessing Distress Cause and Estimating Evaluation Index for Marine Concrete Structures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(4), pp. 142-152. doi:10.12691/ajcea-4-4-5.
- Chan, T., Yu, L., Tam, H., Ni, Y., Liu, S., Chung, W., & Cheng, L. (2006). Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Health Monitoring of Tsing Ma Bridge: Background and Experimental Observation. *Engineering Structures*, 28(5), pp. 648-659. doi:10.1016/j.engstruct.2005.09.018.



- Chandler, K. (2014). *Marine and Offshore Corrosion: Marine Engineering Series*. Elsevier.
- Chandrasekaran, S. (2019). Structural Health Monitoring: An Overview. In V. Mohan (Ed.), *Structural Health Monitoring with Application to Offshore Structures* (p. 50). World Scientific. doi:10.1142/9789811201097_0001.
- Chang, P., Flatau, A., & Liu, S. (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), pp. 257-267. doi:10.1177/1475921703036169.
- Chauveau, D. (2018). Review of NDT and Process Monitoring Techniques Usable to Produce High-Quality Parts by Welding or Additive Manufacturing. *Welding in the World*, 62(5), pp. 1097-1118. doi:10.1007/s40194-018-0609-3.
- Chen, S.-E., Liu, W., Boyajian, D., & Hauser, E. (2010). Application of 3D LIDAR Scan of a Bridge under Static Load Testing. *Materials Evaluation*, 68(12), pp. 1359-1367.
- Chiu, W. K., Ong, W. H., Kuen, T., & Courtney, F. (2017). Large Structures Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Engineering*, 188, pp. 415-423. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.503.
- Cho, S., Park, S., Cha, G., & Oh, T. (2018). Development of Image Processing for Crack Detection on Concrete Structures through Terrestrial Laser Scanning Associated with the Octree Structure. *Applied Sciences*, 8(12), p. 19. doi:10.3390/app8122373.
- COST. (2014). European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. Memorandum of Understanding for COST Action TU1406.
- Diamanti, N., Annan, P. A., & Redman, D. J. (2017). Concrete Bridge Deck Deterioration Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 22(2), pp. 121-132. doi:10.2113/JEEG22.2.121.
- Doa'ei, Y., & Jahan, A. (2018). Application of Artificial Intelligence and Meta-heuristic Algorithms in Civil Health Monitoring Systems. *Civil Engineering Journal*, 4(7), pp. 1653-1666. doi:10.28991/cej-03091102.
- Dwivedi, S., Vishwakarma, M., & Soni, P. (2018). Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 3690-3698. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.620.
- El Masri, Y., & Rakha, T. (2020). A Scoping Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques in Building Performance Diagnostic Inspections. *Construction and Building Materials*, 265, p. 12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120542.
- Erhimona, O. G., & Andrew, J. (2019). Recent Advances in Non-Destructive Testing of Concretes and Structures: An Outlook. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 10(3), pp. 20-31. doi:10.5897/JCECT2019.0494.
- Estes, A., & Frangopol, D. (2003). Updating Bridge Reliability Based on Bridge Management Systems Visual Inspection Results. *Journal of Bridge Engineering*, 8(6), pp. 374-382. doi:10.1061/(asce)1084-0702(2003)8:6(374).
- Farhidzadeh, A., Salamone, S., Luna, B., & Whittaker, A. (2013). Acoustic Emission Monitoring of a Reinforced Concrete Shear Wall by b-Value-Based Outlier Analysis. *Structural Health Monitoring*, 12(1), pp. 3-13. doi:10.1177/1475921712461162.



- Frangopol, D. M., & Kim, S. (2014). Prognosis and Life-Cycle Assessment Based on SHM Information. In M. L. Wang, J. P. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (Vol. 56, pp. 145-171). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.1.145.
- Fujino, Y., & Siringoringo, D. M. (2020). Recent Research and Development Programs for Infrastructures Maintenance, Renovation and Management in Japan. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1), pp. 3-25. doi:10.1080/15732479.2019.1650077.
- Garg, H., Agarwal, N., & Choubey, A. (2015). Entropy Based Multi-criteria Decision Making Method under Fuzzy Environment and Unknown Attribute Weights. *Global J Technol Optim*, 6(3), pp. 13-20. doi:10.4172/2229-8711.1000182.
- Gattulli, V., & Chiaramonte, L. (2005). Condition Assessment by Visual Inspection for a Bridge Management System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(2), pp. 95-107. doi:10.1111/j.1467-8667.2005.00379.x.
- Gaythwaite, J. W. (2016). *Design of Marine Facilities: Engineering for Port and Harbor Structures* (3 ed.). ASCE Press. doi:10.1061/9780784414309.
- Gholizadeh, S. (2016). A Review of Non-Destructive Testing Methods of Composite Materials. In *15th Portuguese Conference on Fracture*, 1, pp. 50-57. Paco de Arcos, Portugal. doi:10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- Gholizadeh, S., Leman, Z., & Baharudin, B. (2015). A Review of the Application of Acoustic Emission Technique in Engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, 54(6), pp. 1075-1095. doi:10.12989/sem.2015.54.6.1075.
- Gonçalves, J., & Henriques, R. (2015). UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, pp. 101-111. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.
- Grosse, C., Reinhardt, H., Krüger, M., & Beutel, R. (2005). Application of Impact-Echo Techniques for Crack Detection and Crack Parameter Estimation in Concrete. In *11th International Conference on Fracture 2005, ICF11*, 7, pp. 4884-4889. Turin, Italy.
- Gucunski, N., Board, N., & Program, S. (2013). *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration*. Transportation Research Board. Retrieved from <https://books.google.gr/books?id=yGWL7O705FwC>.
- Gucunski, N., Nazarian, S., Imani, A., & Azari, H. (2014). Performance of NDT Technologies in Detection and Characterization of Reinforced Concrete Deck Deterioration. In M. Abu-Farsakh, X. Yu, & L. Hoyos (Eds.), *Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability* (pp. 2436-2449). United States: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784413272.236.
- Gucunski, N., Romero, F., Kruschwitz, S., Feldmann, R., & Parvardeh, H. (2011). *Comprehensive Bridge Deck Deterioration Mapping of Nine Bridges by Nondestructive Evaluation Technologies*. Rutgers University. Washington, DC: Iowa Department of Transportation. Retrieved from <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/24464>.
- Habeenzu, H., McGetrick, P., Hester, D., Taylor, S., & Wong, L. (2020). Towards Automated UAV Assisted Bridge Inspections Using Photogrammetry and Image Processing Techniques. In K.



- Ruane, & V. Jaksic (Ed.), *Civil Engineering Research in Ireland 2020* (pp. 16-20). Ireland: Civil Engineering Research Association of Ireland. Retrieved from <https://sword.cit.ie/ceiri/2020/1/2>.
- Harris, D. K., Brooks, C. N., & Ahlborn, T. M. (2016). Synthesis of Field Performance of Remote Sensing Strategies for Condition Assessment of In-Service Bridges in Michigan. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), p. 19. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000844.
- Henriques, M., & Roque, D. (2015). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a Support to Visual Inspections of Concrete Dams. In *2nd International Dam World Conference*, (p. 13). Portugal.
- Hesse, A. A., Atadero, R. A., & Ozbek, M. E. (2017). Using Expert Opinion to Quantify Uncertainty in and Cost of Using Nondestructive Evaluation on Bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2017, p. 12. doi:10.1155/2017/7925193.
- Hiasa, S., Karaaslan, E., Shattenkirk, W., Mildner, C., & Necati Catbas, F. (2018). Bridge Inspection and Condition Assessment Using Image-Based Technologies with UAVs. In J. Soules (Ed.), *Structures Congress 2018: Bridges, Transportation Structures, and Nonbuilding Structures* (pp. 217-228). American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784481332.020.
- Hoła, J., Bień, J., Sadowski, Ł., & Schabowicz, K. (2015). Non-Destructive and Semi-Destructive Diagnostics of Concrete Structures in Assessment of their Durability. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences-technical Sciences*, 63, pp. 87-96. doi:10.1515/bpasts-2015-0010.
- Hoult, N. A., & Soga, K. (2014). Sensing Solutions for Assessing and Monitoring Tunnels. In M. L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring* (Vol. 56, pp. 309-346). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.2.309.
- Hugenschmidt, J., & Loser, R. (2008). Detection of Chlorides and Moisture in Concrete Structures with Ground Penetrating Radar. *Materials and Structures*, 41(4), pp. 785-792. doi:10.1617/s11527-007-9282-5.
- Huston, D., Gucunski, N., Maher, A., Cui, J., Burns, D., & Jalinoos, F. (2007). Bridge Deck Condition Assessment with Electromagnetic, Acoustic and Automated Methods. In F.-K. Chang (Ed.), *In 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2007* (pp. 411-418). Stanford, United States: DEStech Publications.
- Ibrahim, M. (2016). Nondestructive Testing and Structural Health Monitoring of Marine Composite Structures. In M. Ibrahim, J. Graham-Jones, & J. Summerscales (Eds.), *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites* (pp. 147-183). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-1-78242-250-1.00007-7.
- Ismail, M. (2017). Selection of Suitable NDT Methods for Building Inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (p. 8). Malaysia: IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899x/271/1/012085.
- Jahanshahi, M., & Masri, S. (2013). A New Methodology for Non-Contact Accurate Crack Width Measurement Through Photogrammetry for Automated Structural Safety Evaluation. *Smart Materials and Structures*, 22, p. 12. doi:10.1088/0964-1726/22/3/035019.



- Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F., & Izadikhah, M. (2006). An Algorithmic Method to Extend TOPSIS for Decision-Making Problems with Interval Data. *Applied Mathematics and Computation*, 175(2), pp. 1375-1384. doi:10.1016/j.amc.2005.08.048.
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-Range Photogrammetry Applications in Bridge Measurement: Literature Review. *Measurement*, 41(8), pp. 823-834. doi:10.1016/j.measurement.2007.12.005.
- Kaliński, K. J., & Buchholz, C. (2015). Mechatronic Design of Strongly Nonlinear Systems on a Basis of Three Wheeled Mobile Platform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52–53, pp. 700-721. doi:10.1016/j.ymsp.2014.06.016.
- Kalooop, M. R., Elbeltagi, E., Hu, J., & Elrefai, A. (2017). Recent Advances of Structures Monitoring and Evaluation Using GPS-Time Series Monitoring Systems: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), p. 17. doi:10.3390/ijgi6120382.
- Khaloo, A., Lattanzi, D., Cunningham, K., Dell'Andrea, R., & Riley, M. (2018). Unmanned Aerial Vehicle Inspection of the Placer River Trail Bridge Through Image-Based 3D Modelling. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(1), pp. 124-136. doi:10.1080/15732479.2017.1330891.
- Khamzin, A. K., Varnavina, A. V., Torgashov, E. V., Anderson, N. L., & Sneed, L. H. (2017). Utilization of Air-Launched Ground Penetrating Radar (GPR) for Pavement Condition Assessment. *Construction and Building Materials*, 141, pp. 130-139. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.105.
- Khanal, S. (2020). Review of Modern Nondestructive Testing Techniques for Civil Infrastructure. Graduate Thesis, Dissertations, and Problem Reports. 7747. Retrieved from <https://researchrepository.wvu.edu/etd/7747>.
- Kishi, N., Asada, A., Abukawa, K., & Fujisawa, K. (2015). Inspection Methods for Underwater Structures of Ports and Harbors. *2015 IEEE Underwater Technology* (p. 5). India: IEEE. doi:10.1109/ut.2015.7108265.
- Komorowski, J., & Forsyth, D. (2000). The Role of Enhanced Visual Inspections in the New Strategy for Corrosion Management. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 72(1), pp. 5-13. doi:10.1108/00022660010308615.
- Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G. S., Hashim, K., & Yeboah, D. (2021). Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*, 11(6), p. 28. doi:10.3390/app11062750.
- Kušar, M., Galvão, N., & Sein, S. (2018). Regular Bridge Inspection Data Improvement Using Non-Destructive Testing. In Caspeepe, Taerwe, & Frangopol (Ed.), *In Conference: Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision* (pp. 1793-1797). Ghent, Belgium: Taylor & Francis Group.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared Thermography (IRT) Applications for Building Diagnostics: A Review. *Applied Energy*, 134, pp. 531-549. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.005.



- Lagüela, S., Solla, M., Puente, I., & Martínez, F. J. (2018). Joint Use of GPR, IRT and TLS Techniques for the Integral Damage Detection in Paving. *Construction and Building Materials*, 174, pp. 749-760. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.159.
- 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, Management & Innovation*, 2(2), pp. 103-111. doi:10.31462/jcemi.2019.02103111.
- Law, K. H., Smarsly, K., & Wang, Y. (2014). Sensor Data Management Technologies for Infrastructure Asset Management. In M. L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring* (Vol. 56, pp. 3-32). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.1.3.
- Lee, A., Wang, G., Ternowchek, S., & Botten, S. F. (2014). Structural Health Monitoring on Ships Using Acoustic Emission Testing. In *Ship Structure Committee Symposium*, (p. 10). USA.
- Lee, S., & Kalos, N. (2015). Bridge Inspection Practices Using Non-Destructive Testing Methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(5), pp. 654-665. doi:10.3846/13923730.2014.890665.
- Li, Z., Chen, J., & Baltsavias, E. (2008). *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.gr/books?id=-fQM3buoejC>.
- Limongelli, M., Previtali, M., Cantini, L., Carosio, S., Matos, J., Isoird, J., . . . Pellegrino, C. (2019). Lifecycle Management, Monitoring and Assessment for Safe Large-Scale Infrastructures: Challenges and Needs. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, pp. 727-734. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-727-2019.
- Lin, S., Meng, D., Choi, H., Shams, S., & Azari, H. (2018). Laboratory Assessment of Nine Methods for Nondestructive Evaluation of Concrete Bridge Decks with Overlays. *Construction and Building Materials*, 188, pp. 966-982. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.127.
- Liu, P., Chen, A., Huang, Y.-N., Han, J.-Y., Lai, J.-S., Kang, S.-C., . . . Tsai, M.-H. (2014). A Review of Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Developments and Applications in Civil Engineering. *Smart Structures and Systems*, 13(6), pp. 1065-1094. doi:10.12989/sss.2014.13.6.1065.
- Liu, Z., Liu, X., Jiang, L., Lu, G., & Liu, H. (2015). Study on the Heat Transfer Characteristics Performed in the Infrared Thermography Detection of Welded Structure. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 9, pp. 251-259. doi:10.2174/1874155X01509010251.
- Lu, Y. (2010). Non-Destructive Evaluation on Concrete Materials and Structures Using Cement-Based Piezoelectric Sensor. Ph.D. Thesis. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong. doi:10.14711/thesis-b1129607.
- Lu, Y., Golrokh, A. J., & Islam, M. A. (2017). Concrete Pavement Service Condition Assessment Using Infrared Thermography. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, p. 8. doi:10.1155/2017/3829340.



- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2007). *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Wiley.
- Marcantonio, V., Monarca, D., Colantoni, A., & Cecchini, M. (2019). Ultrasonic Waves for Materials Evaluation in Fatigue, Thermal and Corrosion Damage: A Review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, pp. 32-42. doi:10.1016/j.ymssp.2018.10.012.
- Maser, K. (2008). Integration of Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography for Bridge Deck Condition Evaluation. *Materials Evaluation*, 6(11), p. 7.
- Maser, K. R., & Roddis, W. M. (1990). Principles of Thermography and Radar for Bridge Deck Assessment. *Journal of Transportation Engineering*, 116(5), pp. 583-601. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(583).
- Matsuyama, K., Yamada, M., & Ohtsu, M. (2010). On-Site Measurement of Delamination and Surface Crack in Concrete Structure by Visualized NDT. *Construction and Building Materials*, 24(12), pp. 2381-2387. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.05.011.
- McCann, D., & Forde, M. (2001). Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures. *NDT & E International*, 34(2), pp. 71-84. doi:10.1016/S0963-8695(00)00032-3.
- McGlone, C. J., Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & Mullen, R. (Eds.). (2004). *Manual of Photogrammetry* (5 ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Mcneill, D. K. (2009). Data Management and Signal Processing for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems. In V. M. Karbhari, & F. Ansari (Eds.), *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems* (pp. 283-304). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781845696825.1.283.
- Mizuno, K. (2018). System of Inspection and Diagnosis for Port Structures Using Unmanned Boat. *PIANC De Paepe-Willems Award Winner 2018*.
- Moan, T. (2008). Reliability of Aged Offshore Structures. In J. Paik, & R. Melchers (Eds.), *Condition Assessment of Aged Structures* (pp. 287-351). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781845695217.4.287.
- Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack Detection Using Image Processing: A Critical Review and Analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), pp. 787-798. doi:10.1016/j.aej.2017.01.020.
- Nair, A., & Cai, C. (2010). Acoustic Emission Monitoring of Bridges: Review and Case Studies. *Engineering Structures*, 32(6), pp. 1704-1714. doi:10.1016/j.engstruct.2010.02.020.
- Navarro, I. J., Penadés Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R., & Yepes, V. (2020). Life Cycle Sustainability Assessment for Multi-Criteria Decision Making in Bridge Design: A Review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26, pp. 690-704. doi:10.3846/jcem.2020.13599.
- Nohara, K., Kawabata, S., Lee, J., Okamoto, S., Suzuki, H., Takiguchi, T., & Park, O. (2018). Development of Drone System Embedded with Multiple Distance Sensors for Inspection Task of Social Infrastructure. In *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. 2*, pp. 542-546. Hong Kong: IAENG Publications.
- O'Byrne, M., Ghosh, B., Schoefs, F., & Pakrashi, V. (2018). *Based Damage Assessment for Underwater Inspections* (1st ed.). CRC Press. doi:10.1201/9781351052580.



- Odu, G. (2019). Weighting Methods for Multi-Criteria Decision Making Technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23, pp. 1449-1457. doi:10.4314/jasem.v23i8.7.
- Oh, T., Kee, S.-H., Arndt, R., Popovics, J. S., & Zhu, J. (2013a). Comparison of NDT Methods for Assessment of a Concrete Bridge Deck. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(3), pp. 305–314. doi:10.1061/(asce)em.1943-7889.0000441.
- Oh, T., Popovics, J. S., & Sim, S.-H. (2013b). Analysis of Vibration for Regions Above Rectangular Delamination Defects in Solids. *Journal of Sound and Vibration*, 332, pp. 1766-1776. doi:10.1016/j.jsv.2012.11.003.
- Ohtsu, M., & Watanabe, T. (2002). Stack Imaging of Spectral Amplitudes Based on Impact-Echo for Flaw Detection. *NDT & E International*, 35(3), pp. 189-196. doi:10.1016/S0963-8695(01)00045-7.
- Olsen, M. J., Kuester, F., Chang, B. J., & Hutchinson, T. C. (2010). Terrestrial Laser Scanning-Based Structural Damage Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), pp. 264-272. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000028.
- Omar, T., & Nehdi, M. (2016). Evaluation of NDT Techniques for Concrete Bridge Decks Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Resilient Infrastructure: Proceedings of 2016 Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, (p. 10). London.
- Omar, T., & Nehdi, M. (2017). Remote Sensing of Concrete Bridge Decks Using Unmanned Aerial Vehicle Infrared Thermography. *Automation in Construction*, 83, pp. 360–371. doi:10.1016/j.autcon.2017.06.02.
- Omar, T., & Nehdi, M. (2019). Thermal Detection of Subsurface Delaminations in Reinforced Concrete Bridge Decks Using Unmanned Aerial Vehicle. *Durability of Concrete Structures Incorporating Conventional and Advanced Materials, Edition: ACI-SP, 331*, p. 14.
- Omar, T., & Nehdi, M. L. (2018). Condition Assessment of Reinforced Concrete Bridges: Current Practice and Research Challenges. *Infrastructures*, 3(36), p. 23. doi:10.3390/infrastructures3030036.
- Omar, T., Nehdi, M. L., & Zayed, T. (2017). Performance of NDT Techniques in Appraising Condition of Reinforced Concrete Bridge Decks. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(6), p. 16. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001098.
- Omar, T., Nehdi, M. L., & Zayed, T. (2018). Infrared Thermography Model for Automated Detection of Delamination in RC Bridge Decks. *Construction and Building Materials*, 168, pp. 313-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.126.
- Oubahman, L., & Duleba, S. (2021). Review of PROMETHEE Method in Transportation. *Production Engineering Archives*, 27(1), pp. 69-74. doi:10.30657/pea.2021.27.9.
- Pajewski, L., Fontul, S., & Solla, M. (2019). Ground-Penetrating Radar for the Evaluation and Monitoring of Transport Infrastructures. In R. Persico, S. Piro, & N. Linford (Eds.), *Innovation in Near-Surface Geophysics* (pp. 341-398). Elsevier Publications. doi:10.1016/B978-0-12-812429-1.00010-6.



- Park, S., Stubbs, N., Bolton, R., Choi, S., & Sikorsky, C. (2001). Field Verification of the Damage Index Method in a Concrete Box-Girder Bridge via Visual Inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16(1), pp. 58-70. doi:10.1111/0885-9507.00213.
- Pastucha, E. (2016). Catenary System Detection, Localization and Classification Using Mobile Scanning Data. *Remote Sensing*, 8(10), p. 22. doi:10.3390/rs8100801.
- Paszotta, Z., Szumilo, M., & Szulwic, J. (2017). Internet Photogrammetry for Inspection of Seaports. *Polish Maritime Research*, 24(s1), pp. 174-181. doi:10.1515/pomr-2017-0036.
- Perenchio, W. (1989). The Condition Survey. *Concrete International*, 11(1), pp. 59–62.
- 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, p. 14. doi:10.1016/j.measurement.2020.108048.
- Pessiki, S. P., & Carino, N. N. (1988). Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method. *ACI Materials Journal*, 85(5), pp. 389-399. doi:10.14359/2312.
- Peters, K. (2009). Fiber Bragg Grating Sensors. In C. Boller, F. Chang, & Y. Fujino (Eds.), *Encyclopedia of Structural Health Monitoring* (p. 15). John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470061626.shm024.
- Petrie, G. (2010). Mobile Mapping Systems: An Introduction to the Technology. *Geoinformatics*, 13(1), pp. 32-43.
- Podvezko, V., & Podvezko, A. (2010). Dependence of Multi-Criteria Evaluation Result on Choice of Preference Functions and their Parameters. *Ukio Technologinis ir Ekonominis Vystymas*, 16(1), pp. 143-158. doi:10.3846/tede.2010.09.
- Pu, S., Rutzinger, M., Vosselman, G., & Oude Elberink, S. (2011). Recognizing Basic Structures from Mobile Laser Scanning Data for Road Inventory Studies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), pp. S28-S39. doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.08.006.
- Puente, I., Solla, M., Gonzalez, H., & Arias, P. (2014). NDT Documentation and Evaluation of the Roman Bridge of Lugo Using GPR, Mobile and Static LiDAR. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(1), p. 5. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000531.
- Read, J. M., & Torrado, M. (2009). Remote Sensing. In R. Kitchin, & N. Thrift (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 335-346). Elsevier. doi:10.1016/B978-008044910-4.00508-3.
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., & Jameel, M. (2016). Nondestructive Test Methods for Concrete Bridges: A Review. *Construction and Building Materials*, 107, pp. 58-86. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011.
- Ren, L., Li, H.-N., Zhou, J., Li, D.-S., & Sun, L. (2006). Health Monitoring System for Offshore Platform with Fiber Bragg Grating Sensors. *Optical Engineering*, 45(8), p. 9. doi:10.1117/1.2335858.
- Riveiro, B., & Solla, M. (2016). *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*. CRC Press.
- Rizzo, P. (2014a). Sensing Solutions for Assessing and Monitoring Railroad Tracks. In M. L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications*



- in Structural Health Monitoring* (Vol. 56, pp. 497-524). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.2.497.
- Rizzo, P. (2014b). Sensing Solutions for Assessing and Monitoring Underwater Systems. In M. L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring* (Vol. 56, pp. 525-549). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.2.525.
- Rizzo, P., & Zhu, X. (2010). *Sensing Technology for Damage Assessment of Sign Supports and Cantilever Poles: Final Report*. University of Pittsburgh, Department of Civil & Environmental Engineering. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation. Retrieved from <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/18266>.
- Rouhan, A., & Schoefs, F. (2003). Probabilistic Modeling of Inspection Results for Offshore Structures. *Structural Safety*, 25(4), pp. 379-399. doi:10.1016/s0167-4730(03)00016-X.
- Şahin, M. (2021). A Comprehensive Analysis of Weighting and Multicriteria Methods in the Context of Sustainable Energy. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), pp. 1591-1616. doi:10.1007/s13762-020-02922-7.
- Sankarasrinivasan, S., Balasubramanian, E., Karthik, K., Chandrasekar, U., & Gupta, R. (2015). Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System. *Procedia Computer Science*, 54, pp. 508-515. doi:10.1016/j.procs.2015.06.058.
- Sansalone, M. (1997). Impact-Echo: The Complete Story. *ACI Structural Journal*, 94(6), pp. 777-786.
- Sansalone, M., & Streett, W. B. (1997). *Impact-Echo: Non-Destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press.
- Schroeder, J., Ahmed, T., Chaudhry, B., & Shepard, S. (2002). Non-Destructive Testing of Structural Composites and Adhesively Bonded Composite Joints: Pulsed Thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(11), pp. 1511-1517. doi:10.1016/S1359-835X(02)00139-2.
- Schubert, F., & Köhler, B. (2008). Ten Lectures on Impact-Echo. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 27(1), pp. 5-21. doi:10.1007/s10921-008-0036-2.
- 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), pp. 245-255. doi:10.1016/S0963-8695(02)00061-0.
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., . . . Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, pp. 48572-48634. doi:10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- Sharma, A., & Sinha, A. (2018). Ultrasonic Testing for Mechanical Engineering Domain: Present and Future Perspective. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 7(2), pp. 243-253. doi:10.22105/riej.2018.100730.1018.
- Sierra, L. A., Yepes, V., & Pellicer, E. (2018). A Review of Multi-Criteria Assessment of the Social Sustainability of Infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187, pp. 496-513. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.022.



- Smith, P. (2016). Types of Marine Concrete Structures. In M. G. Alexander (Ed.), *Marine Concrete Structures* (pp. 17-64). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-08-100081-6.00002-7.
- Solla, M., Pérez-Gracia, V., & Fontul, S. (2021). A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices. *Remote Sensing*, 13(4), p. 54. doi:10.3390/rs13040672.
- Spronk, J., Steuer, R. E., & Zopounidis, C. (2016). Multicriteria Decision Aid/Analysis in Finance. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. Figueira (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 1011-1065). Springer New York. doi:10.1007/978-1-4939-3094-4_24.
- Stacey, A., Birkinshaw, M., & Sharp, J. (2008). Life Extension Issues for Ageing Offshore Installations. *Proceedings of the ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Volume 5: Materials Technology; CFD and VIV*, pp. 199-215. Portugal: ASME. doi:10.1115/OMAE2008-57411.
- Stein, M. (2019). Aero-Triangulation and Photogrammetry in Sensible Infrastructures -How the Industry Benefits from Low-Cost 3D Modelling Conducted by Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Proceedings of the Marine Industry 4.0* (p. 11). The Netherlands: The Royal Institution of Naval Architects.
- Sultan, A. A., & Washer, G. A. (2018). Comparison of Two Nondestructive Evaluation Technologies for the Condition Assessment of Bridge Decks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672 (41), pp. 113-122. doi:10.1177/0361198118790835.
- Summerscales, J. (2013). *Acoustic Emission Source Location in Fibre-Reinforced Composite Materials*. Advanced Composites Manufacturing Centre. doi:10.13140/2.1.1215.3285.
- Taheri, S. (2019). A Review on Five Key Sensors for Monitoring of Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 204, pp. 492-509. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172.
- Tawhed, W. F., & Gassman, S. L. (2002). Damage Assessment of Concrete Bridge Decks using Impact-Echo Method. *ACI Materials Journal*, 99(3), pp. 273-281. doi:10.14359/11973.
- Tenžera, D., Puž, G., & Radić, J. (2012). Visual Inspection in Evaluation of Bridge Condition. *Građevinar*, 64, pp. 717-726. doi:10.14256/JCE.718.2012.
- Ter Berg, C., Leontaris, G., van den Boomen, M., Spaan, M., & Wolfert, A. (2019). Expert Judgement Based Maintenance Decision Support Method for Structures With a Long Service-Life. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(4), pp. 492-503. doi:10.1080/15732479.2018.1558270.
- Tosti, F., & Ferrante, C. (2020). Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures. *Surveys in Geophysics*, 41(3), pp. 485-530. doi:10.1007/s10712-019-09565-5.
- Tosti, F., Gagliardi, V., D'Amico, F., & Alani, A. M. (2020). Transport Infrastructure Monitoring by Data Fusion of GPR and SAR Imagery Information. *Transportation Research Procedia*, 45, pp. 771-778. doi:10.1016/j.trpro.2020.02.097.
- Tsaimou, C., Chalastani, V., & Tsoukala, V. (2021a). Life-Cycle-Oriented Framework for Seaport Infrastructure Maintenance and Climate Change Adaptation. *17th International Conference*



- on *Environmental Science and Technology* (p. 4). Athens, Greece: Laboratory of Harbour Works, National Technical University of Athens.
- Tsaimou, C., Chalastani, V., Sartampakos, P., & Tsoukala, V. (2021b). Integrating Seaport Infrastructure Monitoring Approaches to Improve Smartness and Climate Adaptive Capacity. *17th International Conference on Environmental Science and Technology* (p. 4). Athens, Greece: Laboratory of Harbour Works, National Technical University of Athens.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2020). USNS COMFORT Arrives in New York in Support. Washington Headquarters Services: U.S. Military, press release.
- Vaghefi, K., Oats, R. C., Harris, D. K., Ahlborn, T. M., Brooks, C. N., Endsley, K. A., . . . Dobson, R. (2012). Evaluation of Commercially Available Remote Sensors for Highway Bridge Condition Assessment. *Journal of Bridge Engineering*, *17*(6), pp. 886-895. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000303.
- Varnavina, A. V., Khamzin, A. K., Torgashov, E. V., Sneed, L. H., Goodwin, B. T., & Anderson, N. L. (2015). Data Acquisition and Processing Parameters for Concrete Bridge Deck Condition Assessment Using Ground-Coupled Ground Penetrating Radar: Some Considerations. *Journal of Applied Geophysics*, *114*, pp. 123-133. doi:10.1016/j.jappgeo.2015.01.011.
- Vary, A., & Bowles, K. J. (1979). An Ultrasonic-Acoustic Technique for Nondestructive Evaluation of Fiber Composite Quality. *Polymer Engineering & Science*, *19*(5), pp. 373-376. doi:10.1002/pen.760190509.
- Verma, S., Bhadauria, S., & Akhtar, S. (2013). Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures. *Journal of Construction Engineering*, *2013*, p. 11. doi:10.1155/2013/834572.
- Visual PROMETHEE 1.4 Manual. (2013).
- Vosselman, G., & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles.
- Vössing, K. J., Gaal, M., & Niederleithinger, E. (2020). Imaging Wood Defects Using Air Coupled Ferroelectret Ultrasonic Transducers in Reflection Mode. *Construction and Building Materials*, *241*, p. 9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118032.
- Votsis, R. A., Michailides, C., Tantele, E. A., & Onoufriou, T. (2018). Review of Technologies for Monitoring the Performance of Marine Structures. In *28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, (pp. 1378-1385). Sapporo, Japan. Retrieved from <http://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/13479>.
- Wang, M. L., & Birken, R. (2014). Sensing Solutions for Assessing and Monitoring Roads. In M. L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring* (Vol. 56, pp. 461-496). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781782422433.2.461.
- Wang, Z., Tian, G., Meo, M., & Ciampa, F. (2018). Image Processing Based Quantitative Damage Evaluation in Composites with Long Pulse Thermography. *NDT & E International*, *99*, pp. 93-104. doi:10.1016/j.ndteint.2018.07.004.



- Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N., & Harper, J. (2009). Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges. *Transportation Research Record*, 2108(1), pp. 107-114. doi:10.3141/2108-12.
- Wenzel, H. (2003). E-MOI-European Monitoring Initiative. *In 1st International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 1, pp. 145-152.
- Wiggenhauser, H. (2009). Advanced NDT Methods for Quality Assurance of Concrete. *In 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering* (p. 12). Nantes, France: NDT.net Journal.
- Yang, L., & Deuse, J. (2012). Multiple-Attribute Decision Making for an Energy Efficient Facility Layout Design. *Procedia CIRP*, 3, pp. 149-154. doi:10.1016/j.procir.2012.07.027.
- Yehia, S., Abudayyeh, O., Nabulsi, S., & Abdelqader, I. (2007). Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 12(2), pp. 215-225. doi:10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215).
- Yi, T.-H., Li, H.-N., & Gu, M. (2013). Recent Research and Applications of GPS-Based Monitoring Technology for High-Rise Structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), pp. 649-670. doi:10.1002/stc.1501.
- Yu, J., Meng, X., Yan, B., Xu, B., Fan, Q., & Xie, Y. (2020). Global Navigation Satellite System-Based Positioning Technology for Structural Health Monitoring: A Review. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(1), p. 27. doi:10.1002/stc.2467.
- Zhong, P., Ding, X., Yuan, L., Xu, Y., Kwok, K., & Chen, Y. (2010). Sidereal Filtering Based on Single Differences for Mitigating GPS Multipath Effects on Short Baselines. *Journal of Geodesy*, 84(2), pp. 145-158. doi:10.1007/s00190-009-0352-z.
- Zhu, Z., & Brilakis, I. (2009). Comparison of Optical Sensor-Based Spatial Data Collection Techniques for Civil Infrastructure Modeling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(3), pp. 170-177. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:3(170).



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: «ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ»

Καλωσορίσατε στην έρευνά μου!

Το παρόν ερωτηματολόγιο αφορά στις **μεθόδους** με τις οποίες πραγματοποιείται η επιθεώρηση των λιμενικών κατασκευών. Απώτερος σκοπός της όλης εργασίας, μέρος της οποίας αποτελεί και το ερωτηματολόγιο αυτό, είναι η αξιολόγηση τεσσάρων μεθόδων, ώστε να προκύψει η καλύτερη από αυτές για την παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος:

- **Φωτογραμμετρία (Close Range Photogrammetry)**
- **Υπέρυθρη Θερμογραφία (Infrared Thermography)**
- **Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)**
- **Μέθοδος Υπερήχων (Ultrasonic Testing).**

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης του ερωτηματολογίου υπολογίζεται στα **10 λεπτά**.

Ευχαριστούμε εκ των προτέρων για το χρόνο και την αρωγή σας στην εργασία αυτή!

Λίγα λόγια για τις μεθόδους...

Φωτογραμμετρία (CRP)

Η Φωτογραμμετρία (CRP) αποτελεί την μέθοδο επιθεώρησης κατά την οποία λαμβάνονται εναέριες φωτογραφίες της υποδομής με τη χρήση κάμερας υψηλής ανάλυσης, η οποία συνήθως είναι ενσωματωμένη πάνω σε ένα μη επανδρωμένο όχημα (Unmanned Vehicle Systems) τύπου drone. Οι δυνατότητες που προσφέρει η μέθοδος είναι η κατασκευή ορθοφωτοχάρτη καθώς και τρισδιάστατου μοντέλου της λιμενικής υποδομής σκυροδέματος. Οι φθορές εντοπίζονται οπτικά από τους αναλυτές πάνω στον ορθοφωτοχάρτη ή και το μοντέλο.

Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)

Η Υπέρυθρη θερμογραφία (IRT) είναι μια μέθοδος παρακολούθησης σύμφωνα με την οποία οποιαδήποτε θερμική μεταβολή στην κατασκευή υποδηλώνει και μεταβολή στις ιδιότητες του υλικού. Συνεπώς, σε φθαρμένες περιοχές παρατηρείται διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, η οποία αποτυπώνεται μέσω υπέρυθρης κάμερας. Παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατου μοντέλου της λιμενικής υποδομής, μέσω των καταγεγραμμένων υπέρυθρων εικόνων. Συνήθης πρακτική αποτελεί η χρήση μη επανδρωμένων οχημάτων (UVS) σε συνδυασμό με υπέρυθρες κάμερες στις επιθεωρήσεις.



Γεωραντάρ (GPR)

Το Γεωραντάρ (GPR) εποπτεύει την υποδομή με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας (>1 GHz). Η λογική της βασίζεται σε μια από τις ιδιότητες των υλικών που είναι η διηλεκτρική σταθερά. Οποιαδήποτε διαφοροποίηση της ιδιότητας αυτής υποδηλώνει την παρουσία υλικού διαφορετικού από το σκυρόδεμα (υλικό πλήρωσης π.χ. αέρας, υγρασία) και συνεπώς πιθανής φθοράς. Ο τρόπος καταγραφής των στοιχείων αυτών αφορά στη χρήση κεραιών, οι οποίες με τη βοήθεια οχήματος σαρώνουν την λιμενική υποδομή. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται με την χρήση ειδικού λογισμικού και την παρουσία αναλυτή.

Μέθοδος Υπερήχων (UT)

Η τεχνική των Υπερήχων (UT) αφορά στη διάδοση υπερηχητικών κυμάτων στην υπό εξέταση περιοχή μιας παράκτιας υποδομής. Απαιτεί άμεση επαφή του εξοπλισμού με την κατασκευή για τη συλλογή δεδομένων. Οποιαδήποτε διαφοροποίηση στη δομή της κατασκευής αποτυπώνεται κύματα μικρότερου μήκους ή χρόνου σε σύγκριση με ένα κύμα πρότυπο, που αφορά σε ομογενή περιοχή. Επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, δίνοντας την δυνατότητα για άμεση οπτικοποίηση των δεδομένων σε οθόνη.

1

Ποια/ποιες από τις ακόλουθες μη καταστρεπτικές μεθόδους (NDT) γνωρίζετε, έστω και σε θεωρητικό επίπεδο; *

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

- Φωτογραμμετρία (CRP)
- Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)
- Γεωραντάρ (GPR)
- Μέθοδος Υπερήχων (UT)

Άλλο



2

Κατά τη γνώμη σας, πόσο ΕΥΚΟΛΗ είναι κάθε μέθοδος να ΕΚΤΕΛΕΣΤΕΙ για την επιθεώρηση λιμενικών υποδομών από σκυρόδεμα; Χαρακτηρίστε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Εύκολη	Κάπως Εύκολη	Μέτριας Ευκολίας	Κάπως Δύσκολη	Πολύ Δύσκολη
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3

Πόσο ΕΥΚΟΛΗ πιστεύετε πως είναι η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ των συλλεγθέντων στοιχείων; Χαρακτηρίστε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Εύκολη	Κάπως Εύκολη	Μέτριας Ευκολίας	Κάπως Δύσκολη	Πολύ Δύσκολη
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



4

Πόσο σημαντική είναι κατά τη γνώμη σας η ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ του χειριστή κατά την ΣΥΛΛΟΓΗ δεδομένων στο πεδίο; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Απολύτως Σημαντική	Πολύ Σημαντική	Αρκετά Σημαντική	Λίγο Σημαντική	Καθόλου Σημαντική
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5

Κατά τη γνώμη σας, πόσο σημαντική είναι η ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ του αναλυτή κατά την ΑΝΑΛΥΣΗ/ΕΡΜΗΝΕΙΑ των δεδομένων; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Απολύτως Σημαντική	Πολύ Σημαντική	Αρκετά Σημαντική	Λίγο Σημαντική	Καθόλου Σημαντική
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



6

Πόσο θεωρείται ότι επηρεάζεται κάθε μέθοδος από τις ΣΥΝΘΗΚΕΣ του ΠΕΔΙΟΥ (καιρικές συνθήκες, κυκλοφοριακές συνθήκες, δυσπρόσιτη κατασκευή); Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πάρα Πολύ	Πολύ	Αρκετά	Λίγο	Καθόλου
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7

Πόσο ΕΥΚΟΛΟ θεωρείτε πως είναι να ΕΠΑΝΑΛΗΦΘΕΙ η επιθεώρηση με κάθε μέθοδο; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Εύκολο	Κάπως Εύκολο	Μέτριας Ευκολίας	Κάπως Δύσκολο	Πολύ Δύσκολο
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



8

Ποια/ποιες ΦΘΟΡΕΣ πιστεύετε ότι εντοπίζονται μέσω της ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ (CRP) σε μια λιμενική υποδομή από σκυρόδεμα;

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

- Αποκόλληση
- Ρωγμές
- Διάβρωση Οπλισμού
- Αποφλοιώση Σκυροδέματος
- Απολέπιση Σκυροδέματος
- Άλλο

9

Ποια/ποιες ΦΘΟΡΕΣ ανιχνεύονται μέσω της ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ (IRT);

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

- Αποκόλληση
- Ρωγμές
- Διάβρωση Οπλισμού
- Αποφλοιώση Σκυροδέματος
- Απολέπιση Σκυροδέματος
- Άλλο



10

Ποια/ποιες ΦΘΟΡΕΣ εντοπίζει το ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR);

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

Αποκόλληση

Ρωγμές

Διάβρωση Οπλισμού

Αποφλοιώση Σκυροδέματος

Απολέπιση Σκυροδέματος

Άλλο

11

Ποια/ποιες ΦΘΟΡΕΣ ανιχνεύει η ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (UT);

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

Αποκόλληση

Ρωγμές

Διάβρωση Οπλισμού

Αποφλοιώση Σκυροδέματος

Απολέπιση Σκυροδέματος

Άλλο



12

Κατά τη γνώμη σας είναι σημαντικότερος ο εντοπισμός επιφανειακών ή εσωτερικών φθορών για την αξιολόγηση μιας λιμενικής υποδομής στη φάση λειτουργίας της;

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις.

- Εσωτερικές Φθορές
- Εξωτερικές Φθορές

13

Με πόση ΑΚΡΙΒΕΙΑ πιστεύετε πως μπορεί κάθε μέθοδος να ανιχνεύσει τη ΘΕΣΗ της εσωτερικής ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ σε μια λιμενική υποδομή σκυροδέματος; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Απόλυτη Ακρίβεια	Μεγάλη Ακρίβεια	Αρκετή Ακρίβεια	Μικρή Ακρίβεια	Καθόλου Ακρίβεια
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



14

Με πόση ΑΚΡΙΒΕΙΑ πιστεύετε πως μπορεί να εντοπίσει το ΒΑΘΟΣ και το ΑΝΟΙΓΜΑ των ΡΩΓΜΩΝ; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Απόλυτη Ακρίβεια	Μεγάλη Ακρίβεια	Αρκετή Ακρίβεια	Μικρή Ακρίβεια	Καθόλου Ακρίβεια
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

15

Με πόση ΑΚΡΙΒΕΙΑ θεωρείτε πως μπορεί κάθε μέθοδος να εντοπίσει την ΔΙΑΒΡΩΣΗ του ΟΠΛΙΣΜΟΥ; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Απόλυτη Ακρίβεια	Μεγάλη Ακρίβεια	Αρκετή Ακρίβεια	Μικρή Ακρίβεια	Καθόλου Ακρίβεια
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



16

Ποιο εκτιμάτε ότι είναι το ΚΟΣΤΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ της κάθε μεθόδου; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Μεγάλο	Μεγάλο	Μέτριο	Μικρό	Πολύ Μικρό
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

17

Ποιο πιστεύετε πως είναι το ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ που απαιτείται για τη ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ από το πεδίο κατά την επιθεώρηση; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

(Λάβετε υπόψη παραμέτρους όπως, ημερομίσθιο χειριστή, κόστος διακοπής λειτουργίας λιμενικής υποδομής, κόστος ενέργειας, κόστος μεταφοράς εξοπλισμού, κ.ά.)

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Μεγάλο	Μεγάλο	Μέτριο	Μικρό	Πολύ Μικρό
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



18

Ποιο πιστεύετε πως είναι το ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ που απαιτείται για την ΑΝΑΛΥΣΗ των ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.
(Λάβετε υπόψη παραμέτρους όπως, ημερομίσθιο αναλυτή, κόστος λογισμικού για την επεξεργασία δεδομένων, κ.ά.)

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Μεγάλο	Μεγάλο	Μέτριο	Μικρό	Πολύ Μικρό
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19

Πόσος πιστεύετε είναι ο ΧΡΟΝΟΣ που απαιτείται για την ΕΦΑΡΜΟΓΗ της μεθόδου και τη ΣΥΛΛΟΓΗ δεδομένων από το πεδίο; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Μεγάλος	Μεγάλος	Μέτριος	Λίγος	Πολύ Λίγος
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

20

Πόσος πιστεύετε είναι ο ΧΡΟΝΟΣ που απαιτείται για την ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ/ ΕΡΜΗΝΕΙΑ των αποτελεσμάτων; Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες. (Λάβετε υπόψη τον προσωπικό χρόνο που αφιερώνεται και τον υπολογιστικό χρόνο μέσω της χρήσης Η/Υ, όπου απαιτείται)

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πολύ Μεγάλος	Μεγάλος	Μέτριος	Λίγος	Πολύ Λίγος
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

21

Ποιος είναι κατά τη γνώμη σας ο ΒΑΘΜΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ της κάθε μεθόδου; Κατά πόσο μπορεί να επιθεωρήσει μια λιμενική υποδομή, έχοντας προκαθορισμένα κάποια στάδια της διαδικασίας (π.χ. γνωστές συντεταγμένες των σημείων παρακολούθησης από προηγούμενη επιθεώρηση με την ίδια μέθοδο); Αναφερθείτε σε κάθε μέθοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Παρακαλώ επιλέξτε ΜΙΑ από τις προτεινόμενες απαντήσεις για ΚΑΘΕ ΜΕΘΟΔΟ.

	Πάρα Πολύ Αυτομ/μένη	Πολύ Αυτομ/μένη	Αρκετά Αυτομ/μένη	Λίγο Αυτομ/μένη	Καθόλου Αυτομ/μένη
Φωτογραμμετρία (CRP)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Υπέρυθρη Θερμογραφία (IRT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Γεωραντάρ (GPR)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Μέθοδος Υπερήχων (UT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: «ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ»



Καλωσορίσατε στην έρευνά μου!

Το παρόν ερωτηματολόγιο αφορά στην επιθεώρηση των λιμενικών κατασκευών μέσω της μεθόδου της **Φωτογραμμετρίας (CRP)**.

Σκοπός της όλης έρευνας η αξιολόγηση της μεθόδου της **Φωτογραμμετρίας (CRP)** για την παρακολούθηση των λιμενικών υποδομών σκυροδέματος υπό το πρίσμα σημαντικών κριτηρίων.

Στην ακόλουθη ενότητα παρατίθεται ένα σύνολο ερωτήσεων, το οποίο επιθυμούμε να απαντήσετε με βάση τις γνώσεις και την εμπειρία σας.

Ευχαριστούμε εκ των προτέρων για το χρόνο και την αρωγή σας στην εργασία αυτή!

Ας ξεκινήσουμε...

Επισημαίνεται ότι τα ακόλουθα ερωτήματα αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου της Φωτογραμμετρίας (CRP) σε λιμενικά έργα σκυροδέματος.

1

Βαθμολογείστε τη μέθοδο της Φωτογραμμετρίας (CRP) ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Η αξιοπιστία εξετάζεται υπό το πρίσμα της τεχνολογικής αρτιότητας του εξοπλισμού στο πεδίο, των προγραμμάτων επεξεργασίας και της ευαισθησίας της μεθόδου σε διάφορους εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. καιρικές συνθήκες, παρουσία επιβατικού ή άλλου κοινού).

*Παρακαλώ χρησιμοποιείστε την κλίμακα 1 έως 5 στη βαθμολόγησή σας.
1=πολύ μικρή αξιοπιστία & 5=πάρα πολύ μεγάλη αξιοπιστία.*

1 2 3 4 5

2

Βαθμολογείστε την Φωτογραμμετρία (CRP) ως προς τη διάρκεια της μεθόδου. Η διάρκεια αφορά στον χρόνο εκτέλεσης της μεθόδου από τον χειριστή και απόκτησης των δεδομένων στο πεδίο.

*Παρακαλώ χρησιμοποιείστε **αντίστροφα** την κλίμακα 1 έως 5 στην βαθμολόγησή σας.
1=πάρα πολύ μεγάλος χρόνος & 5=πάρα πολύ μικρός χρόνος.*

1 2 3 4 5



3

Βαθμολογείστε την Φωτογραμμετρία (CRP) ως προς την πολυπλοκότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Η πολυπλοκότητα σχετίζεται με την ανάγκη μακροχρόνιων και απαιτητικών αναλύσεων των συλλεγθέντων δεδομένων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων (π.χ. απαίτηση για εξειδικευμένους αναλυτές και υπολογιστικά συστήματα).

Παρακαλώ χρησιμοποιείστε **αντίστροφα** την κλίμακα 1 έως 5 στην βαθμολόγησή σας.
1=πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων & 5=δεν απαιτείται καμία ανάλυση για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

1 2 3 4 5

4

Αξιολογείστε τη μέθοδο ως προς το κόστος. Στο κόστος εμπεριέχεται το κόστος απόκτησης του εξοπλισμού, εκτέλεσης της δοκιμής και ανάλυσης των δεδομένων.

Παρακαλώ χρησιμοποιείστε **αντίστροφα** την κλίμακα 1 έως 5 στην βαθμολόγησή σας.
1=πολύ μεγάλο κόστος & 5=μικρό κόστος.

1 2 3 4 5

5

Βαθμολογείστε την μέθοδο ως προς την χρηστικότητα. Η χρηστικότητα εξετάζεται υπό το πρίσμα του αριθμού και της ποικιλίας των φθορών που εντοπίζει η μέθοδος (π.χ. ανίχνευση περισσότερων φθορών σημαίνει μεγαλύτερη χρηστικότητα).

Παρακαλώ χρησιμοποιείστε την κλίμακα 1 έως 5 στη βαθμολόγησή σας.
1=πολύ μικρή χρηστικότητα & 5=μεγάλη χρηστικότητα.

1 2 3 4 5

6

Αξιολογείστε την Φωτογραμμετρία (CRP) ως προς την προτυποποίηση (standardization). Η προτυποποίηση αφορά στην ύπαρξη προτύπου για την εφαρμογή της μεθόδου, εθνικού, ευρωπαϊκού ή και διεθνούς επιπέδου.

Παρακαλώ χρησιμοποιείστε την κλίμακα 1 έως 5 στη βαθμολόγησή σας.
1=απουσία προτύπου & 5=ύπαρξη διεθνούς προτύπου.

1 2 3 4 5

