



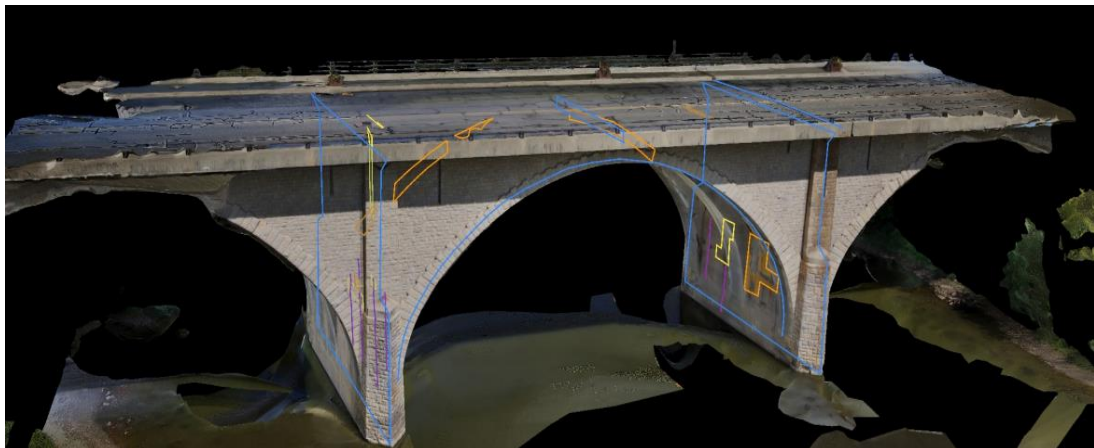
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ & ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΟΔΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ**



ΗΡΑΚΛΗΣ ΔΑΡΑΜΟΥΣΚΑΣ

A.M.: 13017

Επιβλέπων

**Αθανάσιος Ηλιοδρομίτης
Ακαδημαϊκός Υπότροφος ΠΑΔΑ**

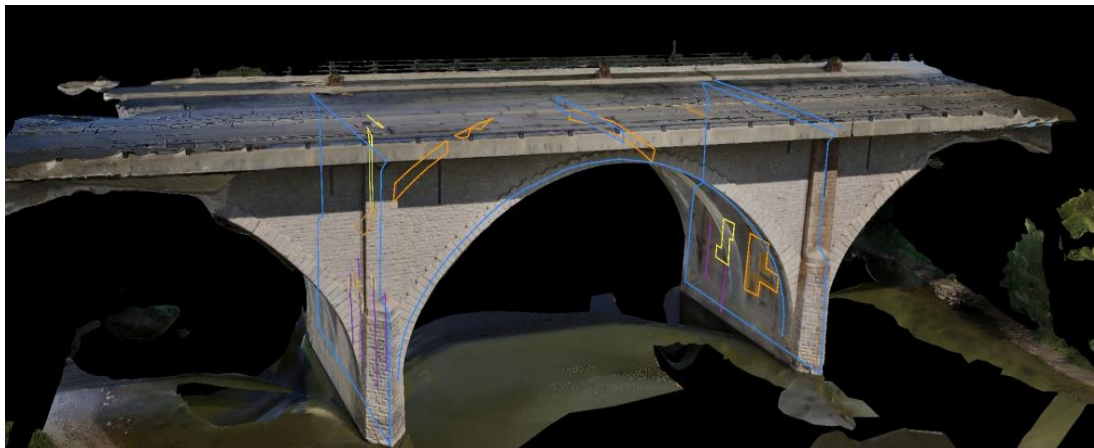
Αιγάλεω, Φεβρουάριος 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING & GEOINFORMATICS ENGINEERING

Diploma thesis

**PRODUCTION OF A DIGITAL TWIN ROAD BRIDGE
USING THREE-DIMENSIONAL TECHNIQUES**



IRAKLIS DARAMOUSKAS
Registration Number: 13017

Supervisor
Athanasios Iliodromitis
Academic Scholar UNIWA

Egaleo, February 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ & ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΟΔΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

ΗΡΑΚΛΗΣ ΔΑΡΑΜΟΥΣΚΑΣ

A.M.: 13017

Η διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την κάτωθι τριμελή εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ / ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΗΛΙΟΔΡΟΜΙΤΗΣ	Επιβλέπων Ακαδημαϊκός Υπότροφος ΠΑΔΑ	
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΓΟΥΝΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΔΑ	
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΝΤΩΝΙΟΥ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΔΑ	

Copyright ©, Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΗΡΑΚΛΗΣ ΔΑΡΑΜΟΥΣΚΑΣ με αριθμό μητρώου 13017 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, **δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Ο Δηλών

ΗΡΑΚΛΗΣ ΔΑΡΑΜΟΥΣΚΑΣ



(ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΣΕ JPEG)

Ευχαριστίες

Δε θα είχε νόημα η περαιτέρω ανάγνωση του παρόντος τεύχους, εάν πρώτα δεν εξέφραζα τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ηλιοδρομίτη Αθανάσιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την επιστημονική του καθοδήγηση και τη συνεχή του υποστήριξη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύντροφό μου Μίνα Κατούφα και τους συνεργάτες και φίλους μου Αντώνη Παγωνάκη και Θεμιστοκλή Σούλο, οι οποίοι συνέβαλλαν σημαντικά ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις πεδίου.

Ευχαριστώ ακόμη τον κ. Μιχαήλ Μπάρτζη, τεχνικό Διευθυντή της Ολυμπίας Οδού για τις πληροφορίες και τα σχέδια που μου παρείχε για τη γέφυρα Α017 του Οδικού Άξονα Αθηνών Κορίνθου, καθώς και για τη βοήθεια του για τη διάθεση αυτής για τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	v
Κατάλογος σχημάτων	vii
Κατάλογος εικόνων.....	vii
Κατάλογος πινάκων	x
Ακρωνύμια.....	xi
Περίληψη.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	3
Περί γεφυρών	3
1.1 Ιστορική εξέλιξη γεφυρών	3
1.2 Τύποι γεφυρών	5
1.3 Ανθεκτικότητα γεφυρών	8
1.4 Συστήματα διαχείρισης γεφυρών	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	12
Επιθεώρηση γεφυρών.....	12
2.1 Αναγκαιότητα επιθεώρησης.....	12
2.2 Ρωγμές και Παθογένειες Σκυροδέματος	14
2.2.1 Τύποι ρωγμών σκυροδέματος.....	15
2.2.2 Είδη παθογενειών σκυροδέματος	17
2.3 Διαδικασίες εύρεσης ρωγμών και παθογενειών στις γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	19
2.3.1 Οπτικός έλεγχος.....	20
2.3.2 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι.....	23
2.3.3 Τρισδιάστατες επίγειες σαρώσεις με σαρωτή laser	26
2.3.4 Συνδυασμός φωτογραμμετρικής μεθόδου και σαρωτή λέιζερ.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	33
Τρισδιάστατοι σαρωτές & ψηφιακά δίδυμα.....	33
3.1 Τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ	33
3.1.1 Τρόπος λειτουργίας σαρωτών.....	34
3.2 Ψηφιακά δίδυμα	37
3.3 Τα ψηφιακά δίδυμα στον κλάδο των κατασκευών.....	41
3.4 Ψηφιακά δίδυμα (ΨΔ) στον τομέα της γεφυροποιίας	42
3.5 Τεχνολογίες που συνδυάζονται με τα ΨΔ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	48
Εφαρμογή Μετρητικών Τεχνικών.....	48
4.1 Τεχνικά στοιχεία της γέφυρας.....	48

4.2	Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.....	51
4.2.1	Τρισδιάστατος σαρωτής.....	51
4.2.2	ΣμηEA DJI Phantom 4 RTK.....	53
4.2.3	ΣμηEA DJI Mavic Air 3	53
4.2.4	Φωτοσταθερά τύπου checkerboard.....	54
4.3	Διαδικασία επίγειων μετρήσεων	55
4.4	Διαδικασία εναέριων μετρήσεων	57
4.5	Μετρήσεις με ρωγμόμετρο.....	59
4.6	Επεξεργασία Μετρήσεων	59
4.6.1	Πρωτογενή δεδομένα.....	60
4.6.2	Συνένωση νεφών.....	62
4.6.3	Καθαρισμός Νέφους και επεξεργασία τελικού νέφους σημείων από σαρωτή	69
4.7	Τελικό τρισδιάστατο νέφος σημείων από σαρωτή.....	70
4.8	Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου μέσω φωτογραμμετρίας.....	74
4.8.1	Εισαγωγή εικόνων – Δημιουργία αραιού νέφους σημείων.....	75
4.8.2	Εισαγωγή φωτοσταθερών – Μετασχηματισμοί αραιού νέφους σημείων.....	78
4.8.3	Ένωση των δύο αραιών νεφών σημείων.....	81
4.8.4	Εισαγωγή πυκνού νέφους σημείων σαρωτή στο Agisoft.....	82
4.8.5	Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου – πλέγματος (Mesh) και εισαγωγή φωτοϋφής (Texture) 83	
4.8.6	Δημιουργία ορθομοσαϊκού.....	84
4.9	Εντοπισμός και ψηφιοποίηση ρωγμών και παθογενειών σκυροδέματος – Σχέδια AS-BUILT	85
4.10	Σύγκριση τελικών σχεδίων επιθεώρησης με τη χρήση ψηφιακού διδύμου και οπτικής μεθόδου	93
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	96
	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	96
5.1	Συμπεράσματα.....	96
5.2	Προτάσεις.....	96
	Βιβλιογραφία.....	98
	Διαδικτυακές πηγές	100

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Απώλεια επιτελεστικότητας συναρτήσει με το χρόνο.....	9
Σχήμα 3.1: Εφαρμογές ΨΔ στις κατασκευές	42

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Γέφυρα του Αρκαδικού	4
Εικόνα 1.2: Τοξωτή γέφυρα Πύλης.....	4
Εικόνα 1.3: Γέφυρα Ρίου Αντιρρίου.....	5
Εικόνα 1.4: Μεταλλική Γέφυρα Ματσουκίου στον Αχελώο.....	5
Εικόνα 1.5: Γέφυρα της Εθνικής Οδού από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	6
Εικόνα 1.6: Ξύλινη γέφυρα στα Ιωάννινα	6
Εικόνα 1.7: Πέτρινο γεφύρι της Αρτοτίβας.....	7
Εικόνα 1.8: Σύμμικτη γέφυρα από δομικό χάλυβα και σκυρόδεμα.....	7
Εικόνα 2.1: Αποφλοιώση σκυροδέματος.....	17
Εικόνα 2.2: Αποκόλληση σκυροδέματος.....	18
Εικόνα 2.3: Εξίδρωση σκυροδέματος.....	18
Εικόνα 2.4: Διαρροή υγρασίας σε σκυρόδεμα.....	19
Εικόνα 2.5: Εκτεθειμένος οπλισμός σκυροδέματος	19
Εικόνα 2.6: Επιθεώρηση γέφυρας με την μέθοδο του οπτικού ελέγχου.....	20
Εικόνα 2.7: Επιθεώρηση σήραγγας με την μέθοδο του οπτικού ελέγχου	21
Εικόνα 2.8: Μικροσκόπιο με ενσωματωμένο ρωγμόμετρο	21
Εικόνα 2.9: Ρωγμόμετρο σε μορφή κάρτας με γνωστά πάχη	22
Εικόνα 2.10: Όργανο για καταγραφή μετακινήσεων και στροφών κοντά σε ρωγμές.....	22
Εικόνα 2.11: Ορθομωσαϊκό της Καπναποθήκης στο Agisoft	25
Εικόνα 2.12: Ορθομωσαϊκό του Ναού στο Agisoft.....	25
Εικόνα 2.13: Επίγειος σαρωτής λέιζερ	26
Εικόνα 2.14: Σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά).....	27
Εικόνα 2.15: Τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου στο λογισμικό Pointools	29
Εικόνα 2.16: Νέφος σημείων στο λογισμικό FaroScene	29
Εικόνα 2.17: Γεωαναφερμένο τελικό ορθοφωτομωσαϊκό.....	32
Εικόνα 3.1: Επίγειος (α) και κινητός (β) σαρωτής λέιζερ	34
Εικόνα 3.2: Προσέγγιση ΨΔ.....	40
Εικόνα 3.3: Η τεχνολογία των ΨΔ.....	44
Εικόνα 3.4: Ψηφιακό δίδυμο γέφυρας.....	46

Εικόνα 3.5: Ψηφιακά δίδυμα και Τεχνητή νοημοσύνη.....	47
Εικόνα 4.1: Λήψη γέφυρας από το Google Earth.....	48
Εικόνα 4.2: Διαμήκης Τομή Γέφυρας.....	49
Εικόνα 4.3: Εγκάρσια Τομή Γέφυρας.....	49
Εικόνα 4.4: Διάταξη Οπλισμού στο μέσο του Ανοίγματος της Γέφυρας.....	50
Εικόνα 4.5: Διάταξη της Προέντασης στο Μέσο του Ανοίγματος.....	50
Εικόνα 4.6: Ο σαρωτής Faro Focus Premium.	51
Εικόνα 4.7: Το ΣμηEA DJI Phantom 4 RTK.....	53
Εικόνα 4.8: Το ΣμηEA DJI Mavic Air 3	54
Εικόνα 4.9: Φωτοσταθερά τοποθετημένα επί της γέφυρας	55
Εικόνα 4.10: Τοποθέτηση φωτοσταθερών.....	56
Εικόνα 4.11: Διαδικασία σάρωσης.....	57
Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία της πτήσης περιμετρικά της γέφυρας	58
Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία της πτήσης στα ακρόβαθρα	59
Εικόνα 4.14: Scans σε μορφή .fls	60
Εικόνα 4.15: Εισαγωγή των σαρώσεων στο λογισμικό Faro Scene	61
Εικόνα 4.16: Διαδικασία επεξεργασίας σαρώσεων (Process)	62
Εικόνα 4.17: Στιγμιότυπο επιλογής τρόπου συνένωσης νεφών σε περιβάλλον Faro Scene	63
Εικόνα 4.18: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE.....	64
Εικόνα 4.19: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE.....	64
Εικόνα 4.20: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE.....	65
Εικόνα 4.21: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE.....	65
Εικόνα 4.22: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE.....	66
Εικόνα 4.23: Συντεταγμένες φωτοσταθερού σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή.....	66
Εικόνα 4.24: Registration Report συνένωσης νεφών στο λογισμικό Faro Scene.....	67
Εικόνα 4.25: Δημιουργία τελικού πυκνού νέφους σημείων	68
Εικόνα 4.26: Τελικό πυκνό νέφος σημείων	69
Εικόνα 4.27: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	70
Εικόνα 4.28: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	71
Εικόνα 4.29: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	71
Εικόνα 4.30: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	71
Εικόνα 4.31: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	72

Εικόνα 4.32: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	72
Εικόνα 4.33: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	72
Εικόνα 4.34: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	73
Εικόνα 4.35: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	73
Εικόνα 4.36: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap.....	73
Εικόνα 4.37: Διαδικασία εισαγωγής εικόνων στο Agisoft Metashape.....	76
Εικόνα 4.38: Σχετικός προσανατολισμός εικόνων σε περιβάλλον Agisoft Metashape (Align).....	76
Εικόνα 4.39: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Phantom 4 RTK	77
Εικόνα 4.40: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Phantom 4 RTK (Bottom View γέφυρας).....	77
Εικόνα 4.41: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Mavic Air 3	78
Εικόνα 4.42: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Mavic Air 3 (Bottom View γέφυρας)	78
Εικόνα 4.43: Τοποθετημένα φωτοσταθερά επί του αραιού νέφους σημείων	79
Εικόνα 4.44: Φωτοσταθερά με τις αντίστοιχες ονομασίες τους.....	79
Εικόνα 4.45: Τοποθέτηση φωτοσταθερών σε περιβάλλον Agisoft Metashape.....	80
Εικόνα 4.46: Σφάλματα φωτοσταθερών έπειτα από τον μετασχηματισμό σε περιβάλλον Agisoft Metashape	81
Εικόνα 4.47: Διαδικασία συνένωσης αραιών νεφών σημείων από τα δύο Σμηα με την εντολή Merge Chunks	81
Εικόνα 4.48: Τελικό αραιό νέφος έπειτα από την συνένωση και τον μετασχηματισμό.....	82
Εικόνα 4.49: Διαδικασία εισαγωγής πυκνού νέφους σημείων σαρωτή σε περιβάλλον Agisoft Metashape	82
Εικόνα 4.50: Πυκνό νέφος σημείων σαρωτή σε περιβάλλον Agisoft Metashape	83
Εικόνα 4.51: Διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατου τριγωνισμένου μοντέλου.....	83
Εικόνα 4.52: Τρισδιάστατο τριγωνισμένο μοντέλο γέφυρας σε περιβάλλον Agisoft Metashape	84
Εικόνα 4.53: Διαδικασία δημιουργίας ορθομωσαϊκού	84
Εικόνα 4.54: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες νότιας όψης γέφυρας	85
Εικόνα 4.55: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες βόρειας όψης γέφυρας.....	85
Εικόνα 4.56: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες γέφυρας.....	86
Εικόνα 4.57: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες γέφυρας.....	86
Εικόνα 4.58: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες κάτω μέρους γέφυρας (Bottom view).....	87
Εικόνα 4.59: Ψηφιοποιημένες ρωγμές κα παθογένειες επί ορθομωσαϊκού γέφυρας	87

Εικόνα 4.60: Ψηφιοποιημένες ρωγμές κα παθογένειες επί ορθομωσαϊκού γέφυρας	87
Εικόνα 4.61: Διαδικασία ψηφιοποίησης και διαστασιολόγησης ρωγμής επί ορθομωσαϊκού γέφυρας σε περιβάλλον GlobalMapper.....	88
Εικόνα 4.62: Άνοψη γέφυρας (Bottom view) από προηγούμενη επιθεώρηση	93
Εικόνα 4.63: Όψεις AB_A1 και AB_A2 από προηγούμενη επιθεώρηση	94
Εικόνα 4.64: Βόρεια όψη γέφυρας από προηγούμενη επιθεώρηση.....	94
Εικόνα 4.65:Νότια όψη γέφυρας από προηγούμενη επιθεώρηση	95

Κατάλογος σχεδίων

Σχέδιο 1: Όψεις AB_A1 και AB_A2, Τομές A-A' και B-B'	90
Σχέδιο 2: Βόρεια και Νότια όψη γέφυρας	91
Σχέδιο 3 Άνοψη γέφυρας (Bottom view).....	92

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση γεφυρών, ανάλογα με την κατάστασή τις.....	14
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή FaroFocusPremium.....	52

Ακρωνύμια

GPS	Global Positioning System
RTK	Real Time Kinematic
ΣΔΓ	Συστήματα Διαχείρισης Γεφυρών
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
SFM	Structured from Motion
ΣΜΗΕΑ	Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών
LIDAR	Light Detection and Ranging
CAD	Computer Aided Design
ΨΔ	Ψηφιακό Δίδυμο
AI	Artificial Intelligence
IoT	Internet of Things
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
RMS	Root Mean Square
HDR	High Dynamic Range

Περίληψη

Η τεχνική επιθεώρηση μεγάλων κατασκευών του οδικού άξονα είναι μια απαραίτητη και συνάμα απαιτητική, δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Μέσω της ραγδαίας τεχνολογικής εξέλιξης, οι σύγχρονες τοπογραφικές μέθοδοι αποτύπωσης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του χρόνου, την αδιάκοπη λειτουργία των οδικών αξόνων και την εξαιρετικά λεπτομερή αποτύπωση (τριχοειδής ρωγμές τις τάξεως $\geq 0,1\text{mm}$) των ζημιών και παθογενειών του σκυροδέματος. Η συστηματική παρακολούθηση τέτοιων κατασκευών καθίσταται απαραίτητη διότι εκατομμύρια πολίτων διασχίζουν τους συγκεκριμένους οδικούς άξονες σε ετήσια βάση, επομένως θεωρείται δεδομένο πως θα πρέπει να κρίνονται ως ασφαλή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην παραγωγή ψηφιακού δίδυμου της Γέφυρας Α017 με την χρήση επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης σε συνδυασμό με εναέρια αποτύπωση με τη χρήση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος (UAV). Μέσω των παραπάνω διαδικασιών και έπειτα από την ανάλογη επεξεργασία των δεδομένων το παραγόμενο ψηφιακό δίδυμο (ΨΔ) της γέφυρας θα βοηθήσει σε μια εφ' όλης της ύλης τεχνική επιθεώρηση (technical inspection) της γέφυρας με σκοπό την εύρεση μικρορωγμών και λοιπών παθογενειών της κατασκευής.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ως αντικείμενο μελέτης η γέφυρα Α017 καθώς αποτελεί τμήμα του οδικού άξονα της εθνικής οδού Αθηνών-Κορίνθου, έναν από τους κυριότερους οδικούς άξονες της Ελλάδας, με την αναγκαιότητα της τεχνικής της επιθεώρησης να κρίνεται αρκετά σημαντική.

Η παρούσα διπλωματική διατριβή αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη και τα είδη των γεφυρών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναπτύσσεται η επιθεώρηση των γεφυρών, καθώς και τα είδη παθογενειών του σκυροδέματος.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα είδη των τρισδιάστατων σαρωτών λέιζερ και τα ψηφιακά δίδυμα.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρονται οι μετρήσεις και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία των τελικών σχεδίων.

Στο **πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, αλλά και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: Σαρωτής Λείζερ, Ψηφιακό Δίδυμο, Επιθεώρηση Γέφυρας, Ως-Κατασκευασθεί Σχέδια

Abstract

The technical inspection of large road structures is a necessary yet demanding, difficult and time-consuming process. Through rapid technological development, modern topographic surveying methods can lead to a significant reduction in time, uninterrupted operation of roadways and extremely detailed (capillary cracks of $\geq 0.1\text{mm}$) recording of concrete damage and pathologies. Systematic monitoring of such structures becomes necessary because millions of citizens cross these roads on an annual basis, so it is taken for granted that they should be considered safe.

This thesis focuses on the generation of a digital twin of the Bridge A017 using ground-based 3D scanning combined with aerial imaging using an unmanned aerial vehicle (UAV). Through the above procedures and after the appropriate data processing the generated digital twin (DT) of the bridge will help us in a full technical inspection of the bridge in order to find microcracks and other pathologies of the structure.

In this particular case, the bridge A017 was chosen as the object of study as it is part of the road axis of the Athens-Corinthos highway, one of the main roads in Greece, and the necessity of the technical inspection is considered quite important.

This thesis consists of five chapters.

The **first chapter** presents the historical development and the types of bridges.

The **second chapter** develops the inspection of bridges, as well as the types of concrete defects.

The **third chapter** presents the types of 3D laser scanners and digital twins.

The **fourth chapter** describes the measurements and the procedures followed to create the final drawings.

In the **fifth and final chapter** presents the conclusions drawn, as well as suggestions for future work.

Keywords: Laser Scanner, Digital Twin, Bridge Inspection, As-built Drawings

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Περί γεφυρών

1.1 Ιστορική εξέλιξη γεφυρών

Μέσω της γεφυροποιίας ο άνθρωπος από τα αρχαία χρόνια κατάφερε κατασκευαστικά να ενώσει δύο σημεία ξεπερνώντας τα όποια εμπόδια παρεμβάλλονταν μεταξύ τους. (Βλάχου, Κονταλή, 2023)

Οι γέφυρες έχουν στόχο τη συνέχεια της επικοινωνίας και της, είτε ανάμεσα σε δύο οδούς, είτε ενός σιδηροδρόμου ή αγωγού, είτε ακόμα μία ροής πεζών. Έχουν σχεδιαστεί για να παρακάμπτουν φυσικά ή και τεχνητά εμπόδια, όπως θάλασσες, ποτάμια, λίμνες, κοιλάδες ή εδαφικές ταπεινώσεις, συγκοινωνιακούς άξονες, ώστε να εξασφαλίζεται η διέλευση οχημάτων, πεζών ή τρένων. Πέρα από αυτό, μέσα από τα υλικά που χρησιμοποιούνταν και πόσο καλή κατασκευή ήταν τελικά οι γέφυρες, χαρακτηρίζεται η οικονομική ευμάρεια και τεχνογνωσία μιας κοινωνίας μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. (Βλάχου, Κονταλή, 2023)

Οι πρώτες γέφυρες που κατασκευάστηκαν, ήταν είτε με την τοποθέτηση μεγάλων λίθων εκατέρωθεν ενός ποταμού, είτε κορμών δέντρων για τη γεφύρωση μικρών ρευμάτων ή ρεμάτων. Θεωρείται πως από το 4000 π. Χ., ο άνθρωπος μπόρεσε να μιμηθεί τα φυσικά τόξα και να δημιουργήσει τις τοξωτές γέφυρες.

Τον 13^ο αιώνα π. Χ. χρονολογείται η γέφυρα του Αρκαδικού, η οποία είναι μία από τις αρχαιότερες γέφυρες, που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Ισχυρότερες γέφυρες χρησιμοποιήθηκαν στην Ινδία τον 4^ο αιώνα π. Χ. για στρατιωτικούς και εμπορικούς λόγους, ενώ στην Κίνα περίπου τον 2^ο αιώνα μ. Χ. χτίζονται μεγάλες ξύλινες γέφυρες με καμάρες. Ο πολιτισμός των Ίνκας τον 16^ο αιώνα, χρησιμοποίησε έναν απλό τύπο γέφυρας από σχοινί και τον 18^ο αιώνα στην Αγγλία εμφανίστηκαν πολλές καινοτομίες με βάση το ξύλο στη γεφυροποιία.

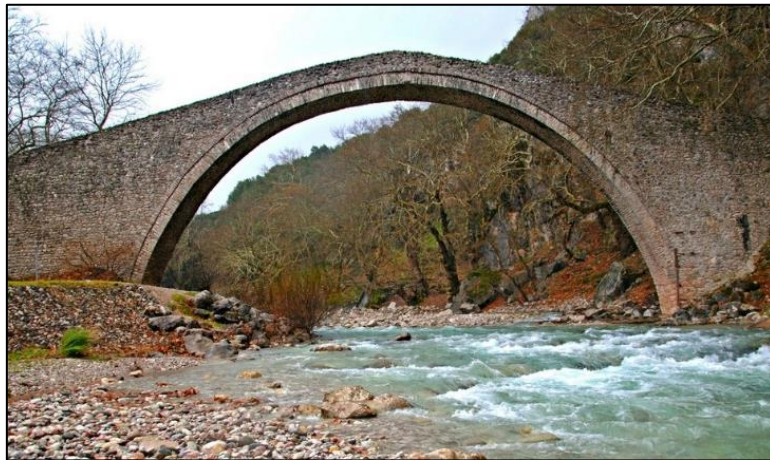
Τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, εμφανίστηκε για πρώτη φορά ο σίδηρος στη γεφυροποιία, ο οποίος επέτρεψε την δημιουργία μεγάλων και υψηλής αντοχής γεφυρών. Περί τα τέλη του 19^{ου} και αρχές 20^{ου} αιώνα, εμφανίστηκε για πρώτη φορά το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο ανέπτυξε σημαντικά την κατασκευή των γεφυρών.

Παρ' όλ' αυτά, στη βάση τους οι τύποι των γεφυρών παραμένουν μέχρι και σήμερα οι ίδιοι, προσθέτοντας ωστόσο εξαιρετικές δυνατότητες που επιτρέπουν να φτάσουν το άνοιγμά τους, μεγαλύτερο από ένα χιλιόμετρο (Πανεπιστήμιο Αιγαίου, παρουσίαση).



Εικόνα 1.1: Γέφυρα του Αρκαδικού

Η γέφυρα του Αρκαδικού είναι μια από τις παλαιότερες τοξωτές γέφυρες του Μυκηναϊκού πολιτισμού, η οποία χρονολογείται από τον 13ο αιώνα π.Χ. και σώζεται μέχρι και σήμερα. Βρίσκεται κοντά στο χωριό Αρκαδικό Αργολίδας και θεωρείται η αρχαιότερη διατηρημένη γέφυρα της Ευρώπης και η αρχαιότερη μονότοξη γέφυρα που παραμένει μέχρι σήμερα σε χρήση στην Ελλάδα (Τσόγκας, 2016).



Εικόνα 1.2: Τοξωτή γέφυρα Πύλης



Εικόνα 1.3: Γέφυρα Ρίου Αντιρρίου

1.2 Τύποι γεφυρών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι και σχέδια γεφυρών, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες λειτουργίες και περιβάλλοντα. Κατατάσσονται σε διάφορα είδη με βάση τα υλικά κατασκευής, το άνοιγμα, το είδος του φορέα αλλά και τη χρήση τους. Ακολουθούν ορισμένα βασικά είδη γεφυρών (Τσίκας, 2019):

Με βάση τα υλικά κατασκευής τους:

- ✓ **Μεταλλικές γέφυρες:** Οι μεταλλικές γέφυρες καταλαμβάνουν εξέχουσα θέση στη σύγχρονη μηχανική λόγω της αντοχής, της ανθεκτικότητας και της ευελιξίας της. Ο χάλυβας είναι ένα υλικό που προσφέρει εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, καθιστώντας το ιδανικό για διάφορους τύπους γεφυρών.



Εικόνα 1.4: Μεταλλική Γέφυρα Μασσουκίου στον Αχελώο

- ✓ **Οπλισμένου Σκυροδέματος:** Οι γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν βασικά στοιχεία των σύγχρονων υποδομών, αξιοποιώντας τις ευέλικτες ιδιότητες του οπλισμένου

σκυροδέματος για την παροχή ανθεκτικών, οικονομικά αποδοτικών και στιβαρών λύσεων για την υπέρβαση διαφόρων εμποδίων, όπως ποτάμια, κοιλάδες και αστικοί χώροι. Το οπλισμένο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με χαλύβδινο οπλισμό προσφέρει ενίσχυση της εφελκυστικής αντοχής. Χρησιμοποιείται ευρέως σε γέφυρες με δοκούς, τόξα και πλάκες.



Εικόνα 1.5: Γέφυρα της Εθνικής Οδού από οπλισμένο σκυρόδεμα

- ✓ **Ξύλινες:** Οι ξύλινες γέφυρες, με την ιστορική τους σημασία και τη συνεχιζόμενη χρήση τους σε ορισμένα πλαίσια, αντιπροσωπεύουν ένα συναρπαστικό μείγμα παράδοσης και καινοτομίας στη μηχανική των γεφυρών. Παρέχουν βιώσιμες και αισθητικά ευχάριστες επιλογές για ειδικές εφαρμογές, ιδίως όταν ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος και η οπτική αρμονία είναι σημαντικά ζητήματα.



Εικόνα 1.6: Ξύλινη γέφυρα στα Ιωάννινα

- ✓ **Πέτρινες:** Οι πέτρινες γέφυρες συγκαταλέγονται στους παλαιότερους και πιο ανθεκτικούς τύπους γεφυρών και θεωρούνται πολύτιμες για την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την αισθητική τους. Οι κατασκευές αυτές, φτιαγμένες από φυσική πέτρα, χρησιμοποιούνται εδώ και χιλιετίες και κάποιες από αυτές χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Οι πέτρινες γέφυρες

παραμένουν μια απόδειξη της ανθρώπινης εφευρετικότητας και δεξιοτεχνίας. Η ανθεκτικότητά τους, σε συνδυασμό με την αισθητική και ιστορική τους σημασία, τις καθιστά αγαπημένα αξιοθέατα σε πολλά μέρη του κόσμου.



Εικόνα 1.7: Πέτρινο γεφύρι της Αρτοτίβας

- ✓ **Σύμμικτες:** Οι σύνθετες γέφυρες χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό διαφορετικών υλικών, συνήθως χάλυβα και σκυροδέματος, για να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα κάθε υλικού και να δημιουργήσουν κατασκευές που είναι ισχυρές, ανθεκτικές και οικονομικές. Αυτές οι γέφυρες σχεδιάζονται για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων με τη χρήση του χάλυβα για την εφελκυστική του αντοχή και του σκυροδέματος για τη θλιπτική του αντοχή.



Εικόνα 1.8: Σύμμικτη γέφυρα από δομικό χάλυβα και σκυρόδεμα

Με βάση το άνοιγμά τους:

- ✓ Μικρού Ανοίγματος (έως 40 μέτρα)
- ✓ Μεσαίου Ανοίγματος (από 40 έως 150 μέτρα)
- ✓ Μεγάλου Ανοίγματος (άνω των 150 μέτρων)

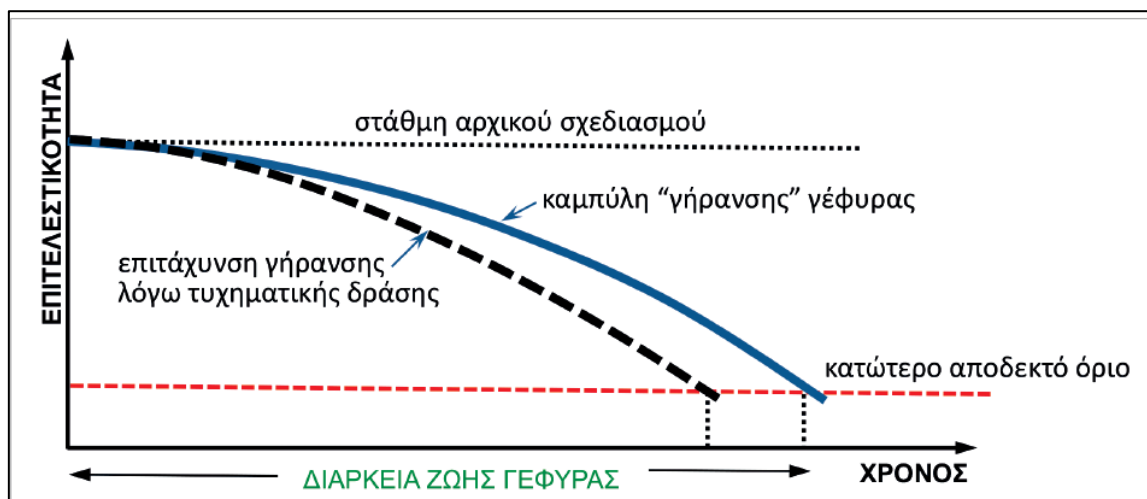
Με βάση το είδος του φορέα:

- ✓ Τοξωτές Γέφυρες
- ✓ Γέφυρες τύπου Δοκού
- ✓ Δικτυωτές Γέφυρες
- ✓ Κρεμαστές Γέφυρες
- ✓ Πλαισιωτές Γέφυρες
- ✓ Καλωδιωτές Γέφυρες

(Γρίβας, 2012)

1.3 Ανθεκτικότητα γεφυρών

Οι βασικές προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληρούν οι γέφυρες ως έργα είναι η λειτουργικότητα και η στατική επάρκεια σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής και την καλή αισθητική. Ωστόσο η μεγαλύτερη απαίτηση που έχει η κατασκευή της γέφυρας είναι η ανθεκτικότητα. Ζήτημα είναι δηλαδή, να επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη ασφάλεια, λειτουργικότητα, αισθητική (χωρίς έντονες φθορές) και η ικανότητα της γέφυρας να αντιστέκεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες (επιτελεστικότητα). Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η επιτελεστικότητα να μην πέφτει κάτω από ένα όριο, το οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την πάροδο του χρόνου (Εργοληπτικόν Βήμα Νο_134, ΠΕΣΕΔΕ).



Σχήμα 1.1: Απώλεια επιτελεστικότητας συναρτήσει με το χρόνο

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα και κατ' επέκταση την επιτελεστικότητα των γεφυρών είναι οι εξής:

- ✓ Σύνθεση σκυροδέματος
- ✓ Συντήρηση κατασκευής
- ✓ Περιβαλλοντικές συνθήκες
- ✓ Χρόνος
- ✓ Κυκλοφοριακή φόρτιση

Η διάρκεια ζωής της κατασκευής σχετίζεται άμεσα με την επιτελεστικότητα, καθώς αντιπροσωπεύει τη χρονική διάρκεια όπου οι απαιτήσεις της ικανοποιούνται. Η λύση για τον περιορισμό της μείωσης της επιτελεστικότητας, είναι η επιθεώρηση και η σωστή συντήρηση των γεφυρών ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της ποιότητας ανεξαρτήτως συνθηκών. Ήδη από τα πρώτα στάδια της μελέτης, αναφέρεται η ανάγκη επαρκούς συντήρησης της γέφυρας ως προϋπόθεση της διασφάλισης της ανθεκτικότητας της.

1.4 Συστήματα διαχείρισης γεφυρών

Τα Συστήματα Διαχείρισης Γεφυρών (ΣΔΓ) είναι προγράμματα που εμπεριέχουν έναν μεγάλο όγκο πληροφοριών τα οποία αφορούν τη διαχείριση των γεφυρών και είναι συνδεδεμένα με τις εξωτερικές εργασίες (όπως οι επιθεωρήσεις γεφυρών). Οι πληροφορίες αυτές αφορούν ενέργειες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της γέφυρας, από τη μελέτη κατασκευής τους μέχρι την επισκευή και τη συντήρηση, καθώς και πληροφορίες για τους πόρους που χρειάζονται για τις διαδικασίες αυτές (Καρλαύτης κ.α., 2005).

«Το Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών (ΣΔΓ) είναι μία περιεκτική μέθοδος για τη λήψη αποφάσεων σχετικών με ενέργειες διαχείρισης γεφυρών κατά ένα συστηματικό τρόπο» (Federal Highway Administration, 1987).

Στην ουσία, το κάθε σύστημα προσδιορίζει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό από ελέγχους που πρέπει να εφαρμόζεται για κάθε γέφυρα εστιάζοντας κυρίως στη φάση της συντήρησης. Ένα ΣΔΓ έχει ως στόχο να παρέχει συμβουλές για τις κατευθυντήριες γραμμές στη διαχείριση ενός δικτύου γεφυρών δεδομένων όλων των συγκεκριμένων περιορισμών, κυρίως της περιορισμένης διαθεσιμότητας οικονομικών πόρων αλλά και της δυσκολίας στην ακριβή πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης των γεφυρών (Καρλαύτης κ.α., 2005).

Η δομή του ΣΔΓ αποτελείται περιληπτικά από τα εξής στοιχεία:

- ✓ Βάση δεδομένων
- ✓ Αξιολόγηση κατάστασης
- ✓ Δομική αξιολόγηση
- ✓ Σύγκριση εναλλακτικών συντήρησης
- ✓ Βελτιστοποιημένο πρόγραμμα συντήρησης
- ✓ Πρόγραμμα συντήρησης κατά προτεραιότητα

Στην Ελλάδα δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί τέτοιο σύστημα, ωστόσο σε αρκετές χώρες χρησιμοποιούνται ως εργαλείο για τον συνδυασμό της επιστήμης και της εμπειρίας, βοηθώντας τελικά τον μηχανικό να πάρει αποφάσεις σχετικά με το έργο. Ενδεικτικά, οι χώρες που έχουν αναπτύξει τέτοια συστήματα είναι οι ακόλουθες (Γελασάκης, 2002):

Δανία (Danish Bridge Management System, DANBRO): κάθε γέφυρα χαρακτηρίζεται από ένα μητρώο μέσα σε ένα υπολογιστικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες για τη γεωμετρία, τη γεωγραφία και την ιστορία για κάθε γέφυρα. Τελικά, ενσωματώνονται όλα τα μητρώα για κάθε γέφυρα της χώρας σε ένα χάρτη, παρέχοντας πληροφορίες για τις γέφυρες ανά περιοχή.

ΗΠΑ (PONTIS): μία βάση δεδομένων που βασίζεται στον οπτικό έλεγχο, στην οποία περιέχονται πληροφορίες για τη γέφυρα και προβλέψεις για τη μελλοντική κατάστασή της, οι οποίες βοηθούν τους μηχανικούς στη συντήρησή της.

Ιταλία (σύστημα SAMOA): μία βάση δεδομένων για την κατάσταση της γέφυρας και τις πιθανές επεμβάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν, αλλά και μελέτες για τη δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου των δεδομένων αυτών.

Γερμανία: ένα σύστημα μέσω του οποίου πραγματοποιούνται και εκτελούνται έλεγχοι σε τέσσερα επίπεδα: α) συστηματική επιτήρηση ανά τρίμηνο, β) απλές οπτικές επιθεωρήσεις, γ) απλός έλεγχος ανά τριετία για διάγνωση βλαβών και δ) κύριος έλεγχος πριν την παραλαβή έργου.

Φινλανδία: συστηματικοί έλεγχοι έπειτα από οπτικούς ελέγχους και καταγραφή τους σε πίνακες, ώστε να βαθμολογηθούν τα τμήματα της γέφυρας με τη βοήθεια κάποιων μαθηματικών μοντέλων.

Γαλλία: σύστημα χωρισμένο σε τέσσερα στάδια: α) συνεχής επιθεώρηση χωρίς κάποιον μηχανικό, β) περιοδική επιθεώρηση και επισήμανση προβλημάτων, γ) ειδική λεπτομερής επιθεώρηση μετά το πέρας της κατασκευής και δ) ενισχυμένη επιθεώρηση, όπου πραγματοποιούνται ενόργανοι έλεγχοι για τον εντοπισμό βλαβών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επιθεώρηση γεφυρών

2.1 Αναγκαιότητα επιθεώρησης

Με την πάροδο των ετών, οι γέφυρες παρουσιάζουν φθορές και βλάβες οι οποίες είναι κρίσιμες για τη μετέπειτα αποτελεσματικότητάς τους. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό και να διαπιστωθεί ποιες γέφυρες χρειάζονται επισκευή ή ακόμα συντήρηση, εφαρμόζονται επιτόπιες (πρώτο στάδιο) έρευνες (στα δομικά στοιχεία αλλά και γενικά στην κατασκευή) για τον εντοπισμό ορισμένων παθογενειών που εμφανίζονται.

Η φθορά είναι ορατή συνήθως πρώτα στο πιο ασθενές σημείο της γέφυρας, κάτω από κατασκευαστικούς ή αρμούς διαστολής, μέσω ρωγμών ή και παθογενειών στην εμφάνιση του οπλισμού του σκυροδέματος. Οι στόχοι των επιθεωρήσεων των γεφυρών μπορούν να συνοψιστούν στους εξής (Καρλαύτης κ.α., 2005):

- ✓ Τη λήψη αποφάσεων για την αναγκαιότητα ή όχι πιο λεπτομερούς επιθεώρησης
- ✓ Την εκτίμηση των αναγκών και της στρατηγικής συντήρησης
- ✓ Την εκτίμηση της ασφάλειας των χρηστών και τη λήψη αποφάσεων για την αναγκαιότητα δομικής αξιολόγησης
- ✓ Τον περιορισμό του κινδύνου απρόσμενης αστοχίας
- ✓ Τη συμμόρφωση σε κανονισμούς
- ✓ Την αξιολόγηση της κατάστασης του δομικού στοιχείου

Η επιθεώρηση, η καταγραφή και η συντήρηση όλων των υφισταμένων γεφυρών στην Ελλάδα, εφαρμόζεται σε όλα τα είδη γεφυρών (πεζογέφυρες, υδατογέφυρες και κάθε άλλης χρήσης) είτε είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε από χάλυβα, είτε είναι σύμμικτες κατασκευές είτε ακόμα και λιθόδμητες. Σκοπός της επιθεώρησης, είναι η παρακολούθηση της εξέλιξης της γέφυρας από την στιγμή που οριστικοποιείται η παραλαβή του έργου μέχρι και την ολοκλήρωση της κατασκευής της.

Στην Ελλάδα, για την αξιολόγηση και επιθεώρηση των γεφυρών χρησιμοποιείται το Εθνικό Εγχειρίδιο Επιθεώρησης και Αξιολόγησης Γεφυρών του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών, το οποίο λειτουργεί ως οδηγός για τον επιθεωρητή (ΦΕΚ 6430 Β/10-11-2023).

Αποτελεί εργαλείο μέσω του οποίου ελέγχονται και παρουσιάζονται σχηματικά ή με φωτογραφίες οι βλάβες που είναι πιθανόν να εντοπιστούν. Τα δύο βασικά βήματα για την επιθεώρηση των γεφυρών με βάση το Εγχειρίδιο, είναι τα ακόλουθα:

1. Κύρια Περιοδική Επιθεώρηση

Πρόκειται για ένα στάδιο σχετικά μικρό σε διάρκεια και περιλαμβάνει επιτόπια οπτική εξέταση στα ορατά μέρη της γέφυρας, τα οποία είναι προσιτά και απόσταση επαφής. Πραγματοποιείται από δύο με τρία άτομα με ελαφρύ εξοπλισμό και σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται σε απόσταση μικρότερη του μέτρου.

Αφού προηγηθεί η μελέτη όλων των στοιχείων της γέφυρας αλλά και των κατασκευαστικών σχεδίων της, πραγματοποιείται καταγραφή των φθορών, βλαβών ή άλλων παθογενειών με τη βοήθεια των σκαριφημάτων του Εγχειριδίου. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με την εξής σειρά:

- ✓ **Άνω τμήμα γέφυρας:** έλεγχος στο οδόστρωμα, στα πεζοδρόμια, κιγκλιδώματα, αρμούς και στηθαία.
- ✓ **Πλευρικές απολήξεις τεχνικού:** έλεγχος για αποκλίσεις ή/και παραμορφώσεις από την ευθυγραμμία των απολήξεων των πεζοδρομίων, κιγκλιδωμάτων και των στηθαίων και ανωμαλίες στη γεωμετρία των μεσοβάθρων και ακροβάθρων της γέφυρας.
- ✓ **Κάτω τμήμα γέφυρας:** μέτρηση φθορών και ρωγμών που μπορεί να εμφανίζονται στο σκυρόδεμα και επιθεώρηση επιχωμάτων της οδού κάτω από τη γέφυρα.

2. Αξιολόγηση

Πρόκειται για το επόμενο στάδιο της Κύριας Περιοδικής Επιθεώρησης και περιλαμβάνει την επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων. Σκοπός του σταδίου αυτού, είναι η απόδοση βαθμού στη γέφυρα, ο οποίος θα προσδιορίζει την κρισιμότητα της και θα αποτελεί κριτήριο για την εύρεση του κατάλληλου χειρισμού της. Για κάθε τμήμα της γέφυρας αποδίδεται ένας βαθμός για καθένα από τα ακόλουθα προβλήματα (Εθνικό Εγχειρίδιο Επιθεώρησης και Αξιολόγησης Γεφυρών):

- ✓ Προβλήματα παραμορφώσεων δομικών μελών
- ✓ Προβλήματα ρηγματώσεων
- ✓ Προβλήματα φθορών υλικών κατασκευής

Από τις βαθμολογίες των επιμέρους τμημάτων της γέφυρας, προκύπτει ο συνολικός βαθμός της γέφυρας. Ακολουθεί η κατηγοριοποίηση των γεφυρών ανάλογα με την κατάστασή της (Εθνικό Εγχειρίδιο Επιθεώρησης και Αξιολόγησης Γεφυρών, 2020):

1. Γέφυρες σε καλή κατάσταση (σύνηθες πρόγραμμα συντήρησης)	
Κατηγορία 1	
Κατηγορία 1S	
2. Γέφυρες που είναι σε καλή κατάσταση τα δομικά στοιχεία, αλλά τα πρόσθετα εμφανίζουν φθορές (εξειδικευμένη συντήρηση):	
Κατηγορία 2	
Κατηγορία 2S	
3. Γέφυρες που παρουσιάζουν σοβαρές αλλοιώσεις στα δομικά της στοιχεία (εργασίες αποκατάστασης τις σκοπούμενης επιτελεστικότητας):	
Κατηγορία 3	
Κατηγορία 3S	
4. Γέφυρες που παρουσιάζουν κρίσιμες αλλοιώσεις στα δομικά της στοιχεία, αμφισβητώντας την φέρουσα ικανότητα της (λήψη μέτρων και εργασίες άμεσης αποκατάστασης):	
Κατηγορία 3 ^E	
Κατηγορία 3ES	
5. Γέφυρες στις οποίες δεν έγινε το προηγούμενο στάδιο της Επιθεώρησης ή έχει περάσει επταετία από την τελευταία Επιθεώρηση (διεξαγωγή Κύριας Περιοδικής Επιθεώρησης)	
6. Κατηγορία ΜΕ (Μη ελεγχθέντα τεχνικά έργα)	

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση γεφυρών, ανάλογα με την κατάστασή τις

Αφού δοθεί ο βαθμός παθολογίας της γέφυρας, ακολουθεί ο οδηγός ενεργειών που χρειάζεται να γίνουν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε να διατηρηθεί/αποκατασταθεί η επιτελεστικότητα του τεχνικού έργου.

2.2 Ρωγμές και Παθογένειες Σκυροδέματος

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα έχουν καλές αντοχές σε δυσμενείς συνθήκες, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα έργα παρουσιάζουν φθορές και παθογένειες οι οποίες εξαρτώνται από διάφορους τομείς, όπως η ηλικία της κατασκευής και οι συγκυρίες ή συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το εκάστοτε έργο. Παρά το γεγονός ότι το σκυρόδεμα είναι ευρέως γνωστό στον κλάδο της κατασκευαστικής και χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο υλικό, η δημιουργία ρωγμών είναι αναπόφευκτη και παρουσιάζει διάφορους βαθμούς επικινδυνότητας.

2.2.1 Τύποι ρωγμών σκυροδέματος

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ρωγμών(www.ultratechcement.com):

1. Μη δομικές ρωγμές: Πρόκειται για τις ρωγμές που δεν αποτελούν απειλή για την ακεραιότητα της δομής από σκυρόδεμα. Συνήθως είναι τριχοειδείς ρωγμές και προκαλούνται κυρίως από τη φυσική διαδικασία ξήρανσης του σκυροδέματος, τις μεταβολές της θερμοκρασίας ή μικρές καταπονήσεις. Ωστόσο, αυτού του είδους οι ρωγμές απαιτούν επισκευή όχι πρωτίστως λόγω της απόδοσής τους, αλλά λόγω της συνολικής απόδοσης της δομής σκυροδέματος.

2. Δομικές ρωγμές: Οι δομικές ρωγμές είναι πιο σοβαρές και απαιτούν άμεση αντιμετώπιση. Αυτές οι ρωγμές μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα της κατασκευής από σκυρόδεμα και μπορεί να οδηγήσουν στην κατάρρευση της κατασκευής, εάν δεν αντιμετωπιστούν αμέσως. Υπάρχουν επτά κύριοι τύποι δομικών ρωγμών στο σκυρόδεμα:

- **Ρωγμές πλαστικής συρρίκνωσης**

Αυτού του είδους οι ρωγμές προκαλούνται από την ταχεία ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος πριν προλάβει να σκληρύνει σωστά. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω ζεστού και ξηρού καιρού ή έλλειψης υγρασίας στο μείγμα σκυροδέματος. Αυτές οι ρωγμές συμβαίνουν όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος στεγνώνει πολύ γρήγορα, αφήνοντας πίσω της ένα συνονθύλευμα από ρηχές, τυχαίες ρωγμές. Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά από ρηχές, τυχαίες ρωγμές που μπορεί να επηρεάσουν την εμφάνιση και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

- **Ραγίσματα**

Οι ρωγμές που δημιουργούν ρηγματώσεις είναι σαν ένας ιστός από λεπτές, ρηχές ρωγμές στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Προκαλούνται από την ταχεία εξάτμιση της υγρασίας από την επιφάνεια του σκυροδέματος κατά τα πρώτα στάδια της σκλήρυνσης. Αυτό μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες, η χαμηλή υγρασία και η έκθεση στον άνεμο ή στο άμεσο ηλιακό φως. Η ρηγμάτωση του σκυροδέματος θεωρείται συχνά αισθητικό ζήτημα και συνήθως δεν επηρεάζει τη δομική ακεραιότητα του σκυροδέματος.

- **Κρούστα**

Οι ρωγμές κρούστας, από την άλλη πλευρά, είναι βαθύτερες και ευρύτερες από τις ρωγμές ρηγμάτωσης και εμφανίζονται κατά τα μεταγενέστερα στάδια της σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Δημιουργούνται όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος στεγνώνει πολύ γρήγορα, σχηματίζοντας μια σκληρή κρούστα που παγιδεύει την υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Αυτή η υγρασία προσπαθεί στη συνέχεια να διαφύγει, προκαλώντας ρωγμές στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Οι ρωγμές με κρούστα μπορεί να προκληθούν από την υπερβολική κατεργασία του σκυροδέματος, τη μη σωστή σκλήρυνσή του ή τη χρήση υπερβολικής ποσότητας νερού στο μίγμα.

▪ **Ρωγμές καθίζησης**

Οι ρωγμές καθίζησης εμφανίζονται όταν το έδαφος κάτω από το σκυρόδεμα μετακινείται ή μετατοπίζεται, προκαλώντας την καθίζηση και τη δημιουργία ρωγμών στο σκυρόδεμα. Η ανεπαρκής προετοιμασία του εδάφους και η διάβρωση του εδάφους είναι κοινές αιτίες των ρωγμών καθίζησης. Αυτού του είδους οι ρωγμές μπορούν να δημιουργήσουν ανομοιομορφίες, καθώς και να οδηγήσουν στους τύπους ρωγμών. Η σωστή προετοιμασία του εδάφους, η αποστράγγιση και οι τεχνικές εγκατάστασης μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή της δημιουργίας ρωγμών καθίζησης.

▪ **Ρωγμές διαστολής**

Οι ρωγμές διαστολής εμφανίζονται όταν το σκυρόδεμα διαστέλλεται και συστέλλεται λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία και στα επίπεδα υγρασίας. Αυτού του είδους οι ρωγμές εμφανίζονται συχνά ως ευθεία γραμμή, που διατρέχει την επιφάνεια του σκυροδέματος. Οι ρωγμές διαστολής μπορούν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων καιρικών συνθηκών και της ακατάλληλης τοποθέτησης αρμών. Οι ρωγμές προκαλούνται λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία και γενικά αναφέρονται και ως θερμικές ρωγμές. Αν και συνήθως δεν αποτελούν δομικό πρόβλημα, οι ρωγμές διαστολής μπορεί να επιτρέψουν τη διείσδυση νερού στο σκυρόδεμα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει με τη σειρά του σε διάφορους τύπους ρωγμών και ζημιών. Οι σωστές τεχνικές εγκατάστασης και η χρήση αρμών διαστολής μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή της δημιουργίας ρωγμών διαστολής.

▪ **Ρωγμές ανύψωσης:**

Οι ρωγμές ανύψωσης εμφανίζονται όταν το έδαφος κάτω από το σκυρόδεμα διογκώνεται ή μετατοπίζεται, προκαλώντας ανύψωση του σκυροδέματος προς τα πάνω. Αυτός ο τύπος ρωγμών προκαλείται συχνά από ακραίες μεταβολές της θερμοκρασίας, μεταβολές της υγρασίας ή κύκλους ψύξης-απόψυξης. Οι ρωγμές ανύψωσης μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στο σκυρόδεμα, καθώς και στις γύρω κατασκευές, στους τοίχους ή στα θεμέλια. Η σωστή αποστράγγιση, η συμπίκνωση του εδάφους και οι τεχνικές εγκατάστασης μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή της δημιουργίας ρωγμών ανύψωσης. Εάν υπάρχουν ήδη ρωγμές ανύψωσης, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί η υποκείμενη αιτία για την αποφυγή περαιτέρω ζημιών.

▪ **Ρωγμές υπερφόρτωσης**

Οι ρωγμές υπερφόρτωσης εμφανίζονται όταν το βάρος που τοποθετείται στο σκυρόδεμα υπερβαίνει την ικανότητά του να το στηρίξει. Αυτό μπορεί να προκληθεί από βαριά μηχανήματα ή οχήματα ή ακόμη και από υπερβολική κυκλοφορία πεζών. Οι ρωγμές υπερφόρτωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες, καθώς μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του σκυροδέματος και των γύρω κατασκευών. Η σωστή κατανομή του βάρους, ο οπλισμός και η συντήρηση μπορούν να

βοηθήσουν στην αποτροπή της δημιουργίας ρωγμών υπερφόρτωσης. Εάν υπάρχουν ρωγμές υπερφόρτωσης, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί το ζήτημα άμεσα για να αποφευχθεί περαιτέρω ζημιά και να χρησιμοποιηθεί πιο ανθεκτικό σκυρόδεμα για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια.

2.2.2 Είδη παθογενειών σκυροδέματος

Υπάρχουν αρκετά είδη παθογενειών, οι οποίες προσβάλλουν τη δομική ακεραιότητα του σκυροδέματος. Οι παθογένειες οι οποίες εντοπίστηκαν και επισημάνθηκαν στην υπό μελέτη γέφυρα, είναι οι εξής:

- **Αποφλοιώση (scaling):** Η τοπική αποκόλληση της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε ψύξη και απόψυξη. Γενικά, ξεκινά ως τοπικές μικρές κηλίδες, οι οποίες αργότερα μπορεί να συγχωνευθούν και να επεκταθούν εκθέτοντας πιο μεγάλες περιοχές (www.nevadareadymix.com).



Εικόνα 2.1: Αποφλοιώση σκυροδέματος
Πηγή: www.nevadareadymix.com

- **Αποκόλληση (spalling):** Η διάσπαση και η αποκόλληση επιφανειακών τμημάτων του σκυροδέματος χωρίς την απουσία άμεσων εξωτερικών επιδράσεων, όπως τυχαία κρουστικά φορτία ή πυρκαγιές. Η αποκόλληση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων διάβρωση των ράβδων οπλισμού, η διαδικασία της οποίας έχει ως αποτέλεσμα οι χαλύβδινες ράβδοι να διαστέλλονται και να αναγκάζουν το σκυρόδεμα να διαχωρίζεται (www.mapei.com)
- **Προσβολή του σκυροδέματος από θειικά άλατα.**
 - i. Αντίδραση αλκαλίων-πυριτίου.
 - ii. Κύκλοι ψύξης-απόψυξης.



Εικόνα 2.2: Αποκόλληση σκυροδέματος
Πηγή: Ολυμπία Οδός

- **Εξίδρωση (efflorescence):** Η κρυσταλλική εναπόθεση αλάτων που μπορεί να σχηματιστεί όταν υπάρχει νερό μέσα ή πάνω στο σκυρόδεμα. Έχει λευκή ή γκριζωπή απόχρωση και αποτελείται από εναποθέσεις αλάτων που παραμένουν στην επιφάνεια μετά την εξάτμιση του νερού. Μπορεί να εμφανιστεί και ως κονιορτοποιημένη ουσία σε δάπεδα και τοίχους και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την αντιμετώπισή της (www.nitterhousemasonry.com).



Εικόνα 2.3: Εξίδρωση σκυροδέματος
Πηγή: www.buellinspections.com

- **Διαρροή υγρασίας (humidity eepage):** Η διαρροή νερού στις πλάκες σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως η κακή εναπόθεση, η ανεπαρκής στεγανοποίηση και η φυσική φθορά με την πάροδο του χρόνου. Η κακή εναπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε κενά ή ρωγμές στο σκυρόδεμα, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να επιτρέψουν τη διαρροή νερού. Η ανεπαρκής στεγανοποίηση μπορεί να αποτελέσει έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα, ιδίως εάν το σκυρόδεμα είναι εκτεθειμένο στα στοιχεία της φύσης ή βρίσκεται σε περιοχή με υψηλά επίπεδα υγρασίας (fcsconcreterepairs.com.au).



Εικόνα 2.4: Διαρροή υγρασίας σε σκυρόδεμα

Πηγή: www.fcsconcreterepairs.com.au

- **Εκτεθειμένος οπλισμός σκυροδέματος (conventionalexposedrebars):** Ο εμφανής χάλυβας οπλισμού που μπορεί να προκύψει από φθορά εντός του σκυροδέματος ή από σφάλματα κατά την κατασκευή. Όταν η φθορά του σκυροδέματος αποκαλύπτει οπλισμό, το πρόβλημα είναι συνήθως αποτέλεσμα διάβρωσης του χάλυβα, ζημιών από ψύξη-απόψυξη ή και των δύο (www.concreteconstruction.net).



Εικόνα 2.5: Εκτεθειμένος οπλισμός σκυροδέματος

Πηγή: www.beidoou.com

2.3 Διαδικασίες εύρεσης ρωγμών και παθογενειών στις γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα

Οι ρωγμές που δημιουργούνται στο σκυρόδεμα μπορούν άλλοτε να επηρεάζουν την εμφάνιση του τεχνικού μη δημιουργώντας πρόβλημα στη γέφυρα, είτε μπορεί να υποδηλώνουν σοβαρά προβλήματα ανθεκτικότητας. Η σπουδαιότητα των ρωγμών εξαρτάται από τον τύπο της

κατασκευής, τις τρέχουσες και αναμενόμενες δράσεις και το περιβάλλον έκθεσης, καθώς και από τη φύση της ρηγματώσης (αιτίες, έκταση και φάση εξέλιξης), ενώ οι εμφανείς ρωγμές μπορεί να αντιπροσωπεύουν τη συνολική έκταση της βλάβης, αλλά μπορεί και να υποδηλώνουν προβλήματα μεγαλύτερου μεγέθους που δεν είναι άμεσα ορατά (Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2019). Για αυτό τον λόγο κρίνεται σημαντική η εύρεση των ρωγμών ή άλλων φθορών που μπορεί να παρουσιαστούν, αλλά ακόμα περισσότερο ο τρόπος με τον οποίο θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, καθώς επηρεάζεται άμεσα από το μέγεθος του ζητήματος. Ακολουθούν οι τρόποι γεωμετρικής τεκμηρίωσης και εύρεσης φθορών.

2.3.1 Οπτικός έλεγχος

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος τεχνικής επιθεώρησης γεφυρών και άλλων μεγάλων έργων υποδομής μέχρι σήμερα στην Ελλάδα, είναι ο επιτόπιος έλεγχος. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της επιθεώρησης ως την καταπόνηση των δομικών στοιχείων και του φέροντος οργανισμού των κατασκευών, η έως τώρα συμβατική μεθοδολογία ήταν η ανθρώπινη παρατήρηση δια όψεως από μηχανικούς. Σε αυτή τη διαδικασία, ο διαπιστευμένος μηχανικός ο οποίος είναι τοποθετημένος σε γερανό εξετάζει οπτικά την κατασκευή ανά λωρίδα, καταγράφοντας χειροκίνητα και σκαριφηματικά το είδος της βλάβης – φθοράς και την έκταση που καταλαμβάνει αυτό (Μπάρτζης, Σούλος, 2024).



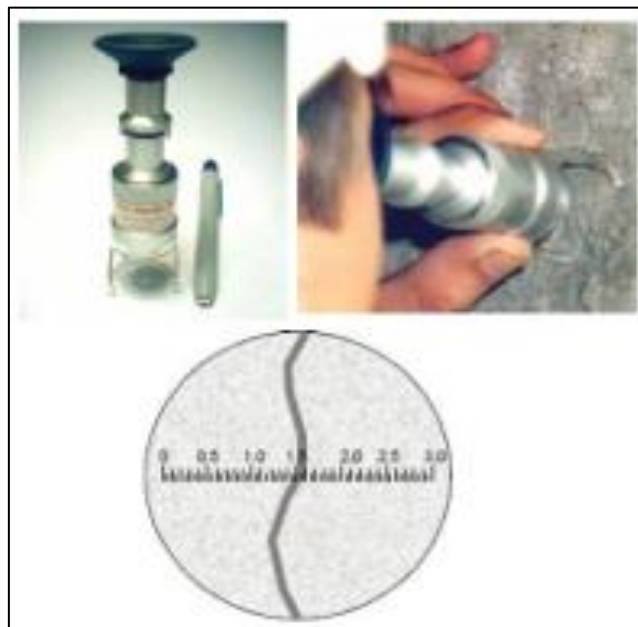
Εικόνα 2.6: Επιθεώρηση γέφυρας με την μέθοδο του οπτικού ελέγχου

Πηγή: www.indiamart.com



Εικόνα 2.7: Επιθεώρηση σήραγγας με την μέθοδο του οπτικού ελέγχου

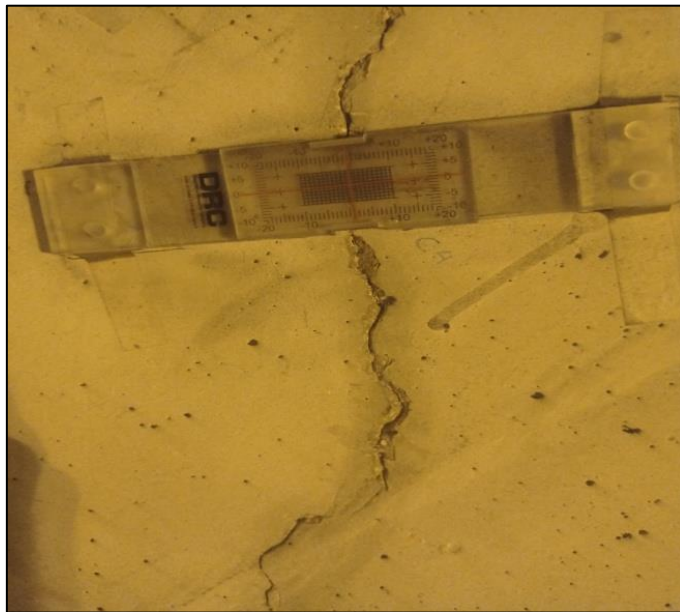
Οι ρωγμές και οι παθογένειες εντοπίζονται αρχικά οπτικά. Έπειτα, εφόσον εντοπιστούν οι ρωγμές, μετρώνται με ειδικά ρωγμόμετρα, με ένα συγκριτικό παχύμετρο, ενώ μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί κάποιο σφυρί στην περιοχή της ρηγματώσης για τυχόν εσωτερικά προβλήματα.



Εικόνα 2.8: Μικροσκόπιο με ενσωματωμένο ρωγμόμετρο



Εικόνα 2.9: Ρωγμόμετρο σε μορφή κάρτας με γνωστά πάχη



Εικόνα 2.10: Όργανο για καταγραφή μετακινήσεων και στροφών κοντά σε ρωγμές

Ο οπτικός έλεγχος περιλαμβάνει καταγραφή ρωγμών επί σχεδίου ή/και επί κατάλληλων σκαριφημάτων. Η σχεδίαση του κανάβου στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων είναι ένας πρακτικός τρόπος για την αποτύπωση των ρωγμών στα σχέδια του έργου. Η καταγραφή θα πρέπει να περιλαμβάνει τη θέση της ρωγμής σε σχέση με τα όμορα δομικά ή μη στοιχεία (π.χ. υποστυλώματα, πλάκες, ανοίγματα), το μήκος της, ενδεικτικά πάχη (εύρη) κατά μήκος της ρωγμής και (όπου αυτό είναι εφικτό) ενδεικτικά βάθη. (Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2019). Συνήθως τα σχέδια με τις ρωγμές συνοδεύονται από κατάλληλες φωτογραφίες.

Έπειτα αναγράφεται με κιμωλία η μετρημένη διάσταση της ρωγμής, ενώ όσον αφορά τις παθογένειες μετριέται και αναγράφεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει. Εν συνεχεία, όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται στο σκαρίφημα του μελετητή. Τελικά, μέσω του συγκεκριμένου σκαριφήματος προκύπτουν δισδιάστατα ηλεκτρονικά σχέδια με τις ρωγμές και τις παθογένειες.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, πως παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη και συνηθισμένη μέθοδος στις μέρες μας, παραμένει μια κοστοβόρα, χρονοβόρα και συνάμα επικίνδυνη διαδικασία, αφού απαιτείται η μερική διακοπή κυκλοφορίας των οχημάτων, βάζοντας σε κίνδυνο τη σωματική ακεραιότητα του εργαζομένου.

2.3.2 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η φωτογραμμετρία είναι η διαδικασία λήψης φωτογραφιών από διάφορες γωνίες και αποστάσεις και η χρήση της για την ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων ή τοπίων. Οι εικόνες συνδυάζονται με ειδικό λογισμικό για να δημιουργήσουν ένα λεπτομερές μοντέλο βάσει των κοινών σημείων μεταξύ των λήψεων.

Παγκοσμίως, η επιστήμη της Φωτογραμμετρίας έχει αποτελέσει σημαντικό εργαλείο και κύρια μέθοδο, σε συνδυασμό με τις αεροφωτογραφήσεις, για την παραγωγή χαρτογραφικών υποβάθρων. Ειδικά ο τομέας της αναλυτικής και ψηφιακής φωτογραμμετρίας, δημιουργεί τα θεμέλια για τοπογραφικά υψηλής ακρίβειας, καθώς και για καταγραφή της θέσης, του σχήματος και των διαστάσεων του αντικειμένου. Η διαφορά της από τις συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μέτρηση, αφού σε αντίθεση με την Τοπογραφία, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ένα μέσο και όχι απευθείας στον φυσικό κόσμο.

Φωτογραμμετρία ονομάζεται *«η τέχνη, η επιστήμη και η τεχνολογία για την απόκτηση αξιόπιστης πληροφορίας σχετικά με φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον μέσα από διαδικασίες καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων αλλά και προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας»* (Πατιάς, 1991).

Τα πλεονεκτήματα της Φωτογραμμετρίας είναι περιληπτικά τα εξής:

- ✓ **Ταχύτητα:** Εξαιρετικά ταχύτερη η παραγωγή χαρτών μέσω τις Φωτογραμμετρίας εν αντιθέσει με τις μεθόδους με επίγειες μετρήσεις.
- ✓ **Οικονομία:** Κυρίως σε περιπτώσεις μαζικής χαρτογράφησης, το κόστος είναι αρκετά πιο χαμηλό, ειδικά από τη στιγμή που το κόστος είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ταχύτητα.

- ✓ **Προσπελασιμότητα εδάφους:** Σε δύσβατες περιοχές (όπως για παράδειγμα πυκνή βλάστηση και επικίνδυνες περιοχές), η Φωτογραμμετρία βοηθάει στην αποτύπωση τους από τη στιγμή που είναι απροσπέλαστες από τον άνθρωπο.
- ✓ **Συνεχής απεικόνιση:** Απεικονίζεται πληθώρα σημείων στο σύνολό της, η οποία είναι διαθέσιμη ανά πάσα ώρα και στιγμή.
- ✓ **Ελαχιστοποίηση εργασιών υπαίθρου:** Πολύ γρήγορη και μικρή σε όγκο η εργασία στο πεδίο.
- ✓ **Εξαιρετική ακρίβεια:** Τα δεδομένα που παρέχονται είναι σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό ακριβή σε σχέση με τις μεθόδους.

Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που θέλουν προσοχή, καθώς εντοπίζονται και ορισμένα μειονεκτήματα στη μέθοδο αυτή. Οι περιορισμοί της μεθόδου προέρχονται από την ποιότητα της εικόνας, τη γεωμετρία των συσχετιζόμενων φωτογραφιών και τη διασπορά, την ακρίβεια προσδιορισμού των φωτοσταθερών καθώς και την απαίτηση για άμεση πρόσβαση του αντικειμένου μελέτης (Κολοβού, 2018).

Η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας για την επιθεώρηση γεφυρών, θεωρείται μία από τις ταχύτερες μεθόδους γεωμετρικής τεκμηρίωσης καθώς μέσω αυτής, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει την επιθεώρηση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Μπορεί να εφαρμοστεί στο πεδίο είτε αποκλειστικά με τη χρήση φωτογραφικής μηχανής, είτε με τη χρήση φωτογραφικής μηχανής σε συνδυασμό με πτήση ΣΜΗΕΑ (drone) για σημεία τα οποία είναι δυσπρόσιτα και επικίνδυνα. Η φωτογραμμετρική μέθοδος πραγματοποιείται δίχως τη διακοπή κυκλοφορίας των οχημάτων και κυρίως με σχεδόν μηδενικό κίνδυνο της σωματικής ακεραιότητας του μελετητή. Παρ' όλ' αυτά, απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και για τις μετρήσεις στην ύπαιθρο και την επεξεργασία τους στο γραφείο, ενώ είναι και αρκετά κοστοβόρος ο εξοπλισμός.

Ένα παράδειγμα αποτύπωσης κτιρίου με τη βοήθεια της φωτογραμμετρικής μεθόδου έδωσαν οι Παμπόρης και Χαραλάμπους, στη διαδικασία αποτύπωσης της Καπναποθήκης στην Καβάλα. Έπειτα από μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο και την επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό Agisoft Metashape, ανέπτυξαν το ορθομοσαϊκό του κτιρίου, το οποίο είχε ακρίβεια **3,23 εκατοστά**. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε από το Agisoft (Παμπόρης, Χαραλάμπους, 2022):



Εικόνα 2.11: Ορθομωσαϊκό της Καπναποθήκης στο Agisoft

Ένα ακόμα παράδειγμα χρήσης φωτογραμμετρίας, είναι αυτό του Μιχαηλίδη, όπου αποτυπώθηκε η Ιερά Μονή Κοιμήσεως της Θεοτόκου στην Θεσπρωτία. Ξανά, στο λογισμικό Agisoft Metashape αναπτύχθηκε ορθομωσαϊκό του ναού, το οποίο είχε ακρίβεια περίπου **1,13 εκατοστά**. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε από το Agisoft (Μιχαηλίδης, 2024):



Εικόνα 2.12: Ορθομωσαϊκό του Ναού στο Agisoft

Γίνεται αντιληπτό, πως παρόλο που το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό και στα δύο μοντέλα, παρουσιάζονται κάποιες αλλοιώσεις και το σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αδύνατη επιθεώρηση του συγκεκριμένων κτιρίων με την εν λόγω μέθοδο, αφού δεν το επιτρέπουν τα σφάλματα.

2.3.3 Τρισδιάστατες επίγειες σαρώσεις με σαρωτή laser

Η σάρωση με λέιζερ χρησιμοποιεί ακτίνες λέιζερ για να μετρήσει αποστάσεις από το αντικείμενο ή το τοπίο. Αυτή η μέθοδος δημιουργεί ένα πυκνό νέφος σημείων, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν εξαιρετικά ακριβείς τρισδιάστατες αναπαραστάσεις. Οι σαρωτές λέιζερ είναι πιο κατάλληλοι για μεγάλες περιοχές και μπορούν να καταγράψουν λεπτομέρειες που ενδέχεται να χάνονται μέσω φωτογραμμετρίας.

Η μέθοδος της σάρωσης είναι από τις πιο σύγχρονες μεθόδους και με αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Μέσω του σαρωτή αποκτάται ένα πυκνό νέφος σημείων, το οποίο αναπαριστά τρισδιάστατα το αντικείμενο το οποίο επιτρέπει στο μελετητή την επεξεργασία του. Κάθε σημείο του νέφους έχει x , y , z συντεταγμένες στο χώρο και περιέχει χρωματική πληροφορία, η οποία συνδέεται με τα εικονοστοιχεία (pixel) της φωτογραφικής μηχανής του σαρωτή.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση του σαρωτή σε σημεία γύρω από τη γέφυρα, αφού πρώτα προηγηθεί η τοποθέτηση φωτοσταθερών πάνω και γύρω από αυτή.



Εικόνα 2.13: Επίγειος σαρωτής λέιζερ



Εικόνα 2.14: Σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά)

Με τη συγκεκριμένη διαδικασία, τα βήματα τα οποία ακολουθούνται, είναι τα εξής:

1. Σχεδιασμός των σαρώσεων

Πριν από την αποτύπωση, γίνεται προσεκτικός σχεδιασμός για να καθοριστούν οι θέσεις του σαρωτή. Ανάλογα με την περιοχή ή το αντικείμενο, μπορεί να χρειαστεί η τοποθέτηση του σαρωτή σε διαφορετικές θέσεις για να καλυφθούν όλα τα σημεία και να αποφευχθούν τα κενά στην αποτύπωση (shadow zones).

2. Συλλογή Δεδομένων

Ο σαρωτής τοποθετείται στη θέση του και ξεκινά τη σάρωση. Ο αριθμός των σημείων που συλλέγονται εξαρτάται από την πυκνότητα της σάρωσης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, οι δέσμες λέιζερ χτυπούν στην επιφάνεια, επιστρέφουν στον σαρωτή και κάθε ανιχνευμένο σημείο καταγράφεται στο τρισδιάστατο νέφος σημείων.

3. Επεξεργασία των Δεδομένων

Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή δεδομένων, το νέφος σημείων συνδυάζεται και ευθυγραμμίζεται ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων. Οι σαρώσεις από διάφορες θέσεις σαρωτή ενώνονται και ευθυγραμμίζονται μέσω αλγορίθμων αναγνώρισης κοινών σημείων (registration). Επιπλέον, μπορούν να γίνουν διορθώσεις για να αφαιρεθεί ο θόρυβος ή ανεπιθύμητα δεδομένα που δεν αντιπροσωπεύουν πραγματικά σημεία της επιφάνειας.

4. Δημιουργία του Τρισδιάστατου Μοντέλου

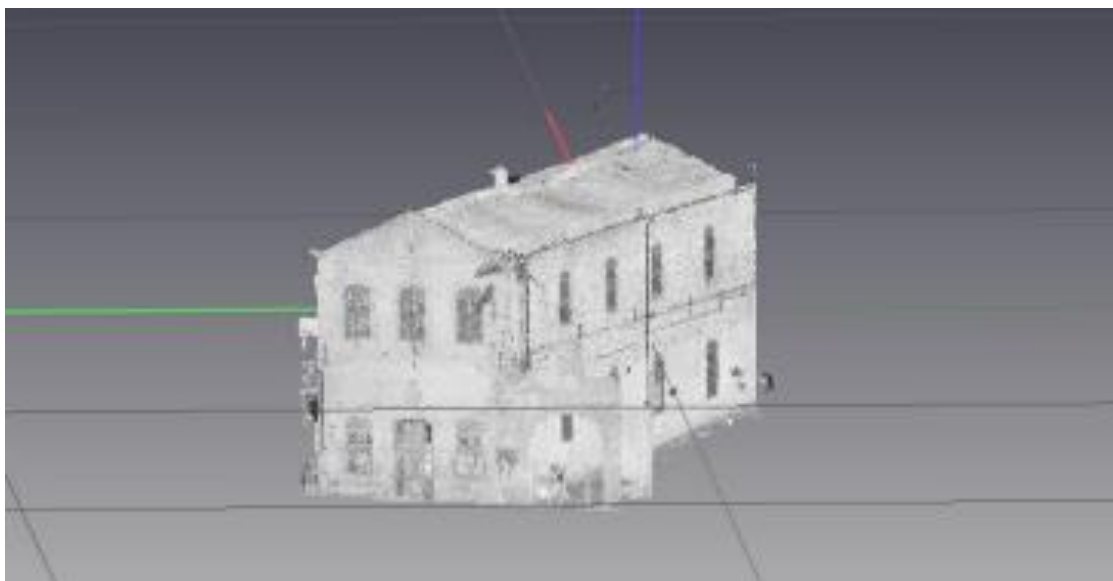
Το νέφος σημείων μπορεί να μετατραπεί σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Για πιο ακριβή αποτελέσματα, μπορεί να εφαρμοστεί μεθοδολογία «επιφάνειας» (surface reconstruction), η οποία

συνδέει τα σημεία σε επιφάνειες και δημιουργεί ένα συνεχές μοντέλο. Το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, όπως η ανάλυση, η μελέτη ή η παρουσίαση.

Τα πλεονεκτήματα από την αποτύπωση από έναν σαρωτή είναι τα παρακάτω:

- **Ακρίβεια:** Ο σαρωτής παρέχει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, επιτρέποντας τη μέτρηση με ακρίβεια χιλιοστού, κάτι που το καθιστά ιδανικό για επιστημονικές εφαρμογές ή για την αποτύπωση δομικών στοιχείων.
- **Ταχύτητα:** Ο σαρωτής μπορεί να καλύψει μεγάλες περιοχές πολύ γρήγορα, ειδικά στην περίπτωση του εναέριου σαρωτή, όπου μια ολόκληρη περιοχή μπορεί να σαρωθεί σε λίγες ώρες.
- **Πυκνό νέφος σημείων:** Ο σαρωτής παράγει ένα πολύ πυκνό νέφος σημείων, που σημαίνει ότι κάθε μικρή λεπτομέρεια μιας επιφάνειας καταγράφεται. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές που απαιτούν λεπτομερείς αναλύσεις.
- **Λειτουργία σε σκοτεινές ή δυσμενείς συνθήκες:** Σε αντίθεση με τη φωτογραμμετρία, που εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού, η σάρωση λέιζερ μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε σκοτεινά ή συννεφιασμένα περιβάλλοντα, καθώς δεν βασίζεται στο ορατό φως.
- **Καταγραφή δυσπρόσιτων περιοχών:** Ειδικά με την εναέρια σάρωση ή τη σάρωση από οχήματα, ο σαρωτής επιτρέπει την αποτύπωση περιοχών που είναι δύσκολα προσβάσιμες με τις μεθόδους.

Ακολουθώντας το ίδιο παράδειγμα με την προηγούμενη παράγραφο, οι Παμπόρης και Χαραλάμπους ανέπτυξαν τρισδιάστατο μοντέλο για το ίδιο κτίριο (Καπιναποθήκη στην Καβάλα) με την μέθοδο αποτύπωσης με σαρωτή λέιζερ. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε βγήκε αρκετά καλύτερο, και οι ακρίβειες παραγωγής του ήταν κατά μέσο όρο περίπου στα **5 χιλιοστά**. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτή τη μέθοδο ακόμα καλύτερη από την Φωτογραμμετρία, καθώς οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται βοηθούν στην επιθεώρηση κτιρίων και κατά συνέπεια και έργων. Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε από το Pointools (Παμπόρης, Χαραλάμπους, 2022):



Εικόνα 2.15: Τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου στο λογισμικό Pointools

Βλέποντας και το δεύτερο παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου, από το Μιχαηλίδη αναπτύχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο με σαρωτή, το οποίο και σε αυτήν την περίπτωση ήταν καλύτερο από τη στιγμή που το μέσο σφάλμα ήταν στα **0,8 εκατοστά**. Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε από το Faro Scene (Μιχαηλίδης, 2024):



Εικόνα 2.16: Νέφος σημείων στο λογισμικό FaroScene

Ενώ αυτή η μέθοδος φαίνεται καλύτερη από τη φωτογραμμετρική, επηρεάζεται εύκολα από εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες. Δηλαδή, υπήρχε αρκετός θόρυβος στις μετρήσεις λόγω των περαστικών ανθρώπων, αυτοκινήτων και άλλων αντικειμένων που υπήρχαν εντός και εκτός των κτηρίων. Επίσης το κόστος του σαρωτή laser είναι πολύ υψηλό, γεγονός που αποτελεί αποτρεπτικό

παράγοντα για την αποτύπωση με laser σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται αποτύπωση με μεγάλη λεπτομέρεια (Παμπόρης, Χαραλάμπους, 2022).

2.3.4 Συνδυασμός φωτογραμμετρικής μεθόδου και σαρωτή λέιζερ

Ο συνδυασμός μεθόδων φωτογραμμετρίας και σαρωτών λέιζερ αποτελεί μια ολοκληρωμένη τεχνική για τη δημιουργία ακριβών τρισδιάστατων μοντέλων και χαρτογραφήσεων. Αυτή η συνδυαστική μέθοδος εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών, προσφέροντας ακριβέστερα και πλουσιότερα δεδομένα από ότι αν χρησιμοποιούνταν μόνο μία από αυτές τις τεχνολογίες, ενώ παρέχει ισχυρά εργαλεία για την κατανόηση και την απεικόνιση του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος με ακρίβεια και λεπτομέρεια. Αποτελεί μία αρκετά εξειδικευμένη μέθοδο, καθώς το προσωπικό απαιτείται να έχει γνώσεις τόσο φωτογραμμετρικές, αλλά και διαχείρισης του σαρωτή και των δεδομένων του.

Στην ουσία, η φωτογραμμετρική μέθοδος χρησιμοποιείται για να ληφθεί η υφή από τις φωτογραφίες, ενώ ο σαρωτής για να προστεθεί η γεωμετρική πληροφορία. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ορθοφωτογραφίες με συνδυασμό των μεθόδων σε ειδικό πρόγραμμα για την εύρεση τελικά των όποιων φθορών.

Ο συνδυασμός φωτογραμμετρίας και σάρωσης με λέιζερ πραγματοποιείται με προσεκτική ενοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από κάθε τεχνολογία, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ακριβές και πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο. Ο τρόπος που γίνεται ο συνδυασμός περιλαμβάνει διάφορα βήματα και εξαρτάται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε κάθε εφαρμογή, αλλά γενικά ακολουθεί την εξής διαδικασία:

2.3.4.1 Συλλογή δεδομένων

Αρχικά, πραγματοποιείται η συλλογή των δεδομένων ξεχωριστά και από τις δύο τεχνολογίες:

Φωτογραμμετρική διαδικασία: Λαμβάνονται οι φωτογραφίες από διαφορετικές γωνίες και αποστάσεις. Οι λήψεις αυτές πρέπει να καλύπτουν τις επιφάνειες του αντικείμενου ή του τοπίου που πρόκειται να χαρτογραφηθεί. Χρησιμοποιούνται ψηφιακές κάμερες ή/και drones, εάν πρόκειται για μεγαλύτερες περιοχές.

Σάρωση με λέιζερ: Ο σαρωτής λέιζερ αποστέλλει ακτίνες λέιζερ που επιστρέφουν με βάση την απόσταση από το αντικείμενο ή το περιβάλλον. Αυτό δημιουργεί ένα «νέφος σημείων», το οποίο αποτελείται από χιλιάδες ή και εκατομμύρια σημεία που αντιπροσωπεύουν την τρισδιάστατη γεωμετρία του χώρου.

2.3.4.2 Προεπεξεργασία των Δεδομένων

Μετά τη συλλογή των δεδομένων, ακολουθεί η επεξεργασία αυτών, ξεχωριστά για κάθε μία από τις διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκε.

Φωτογραμμετρία: Οι εικόνες περνούν από λογισμικό που εκτελεί ανακατασκευή της τρισδιάστατης γεωμετρίας. Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ανάλυσης εικόνας (Structure from Motion – SfM) για την αναγνώριση κοινών σημείων μεταξύ των φωτογραφιών, από τα οποία υπολογίζονται οι σχετικές θέσεις των καμερών και η μορφολογία του αντικειμένου.

Σάρωση με λέιζερ: Τα δεδομένα του σαρωτή επεξεργάζονται και αφαιρείται τυχόν θόρυβος (θολές ή ανεπιθύμητες μετρήσεις) και ενώνονται οι επιμέρους σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις του σαρωτή, ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο νέφος σημείων.

2.3.4.3 Ενοποίηση των δεδομένων

Το σημαντικότερο στάδιο, είναι η ένωση των δεδομένων από τη φωτογραμμετρία και τη σάρωση λέιζερ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που ευθυγραμμίζει τα δεδομένα από τα δύο συστήματα. Η ευθυγράμμιση βασίζεται σε κοινά σημεία ή χαρακτηριστικά που υπάρχουν και στα δύο σύνολα δεδομένων (π.χ. χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου ή της επιφάνειας).

Ευθυγράμμιση: Τα δύο σύνολα δεδομένων (το τρισδιάστατο μοντέλο από τη φωτογραμμετρία και το νέφος σημείων από το λέιζερ) πρέπει να ευθυγραμμιστούν στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να απαιτεί τη χρήση φωτοσταθερών (gcp), τα οποία είναι ορατά και στις φωτογραφίες και στον σαρωτή, ώστε να διευκολυνθεί η ευθυγράμμιση.

Σύντηξη δεδομένων: Αφού επιτευχθεί η σωστή ευθυγράμμιση, τα δεδομένα συνδυάζονται. Η γεωμετρία του μοντέλου από τη σάρωση λέιζερ αντικαθιστά τη γεωμετρία του μοντέλου από τη φωτογραμμετρία σε περιοχές όπου τα δεδομένα από το λέιζερ είναι πιο ακριβή. Ωστόσο, οι λεπτομέρειες και η υφή από τη φωτογραμμετρία προστίθενται στο τελικό μοντέλο για να δώσουν μια ρεαλιστική και οπτικά ακριβή απεικόνιση.

2.3.4.4 Τελική Επεξεργασία και Δημιουργία Τρισδιάστατου Μοντέλου

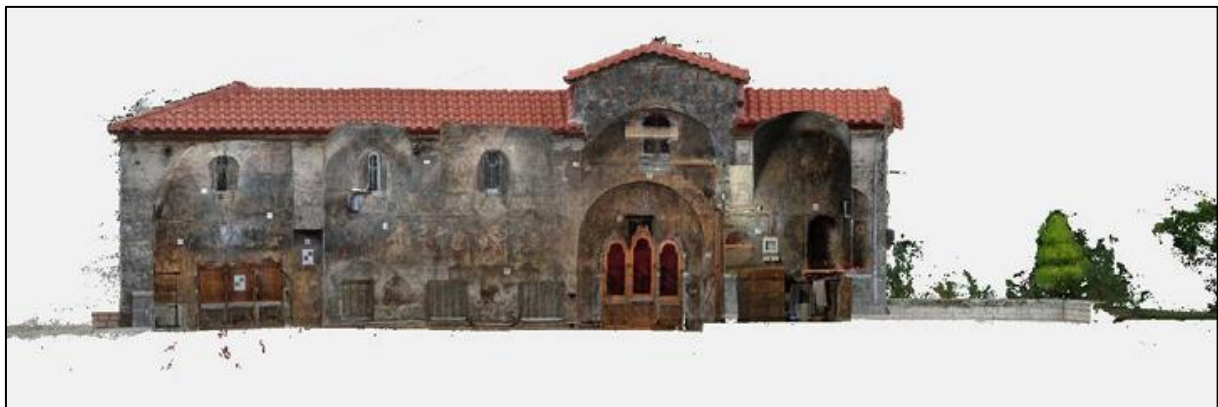
Μετά τη σύντηξη των δεδομένων, το μοντέλο μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω για να βελτιωθεί η οπτική του ποιότητα, να εξαχθούν συγκεκριμένες μετρήσεις ή να εφαρμοστούν χρωματισμοί και υφές. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο που συνδυάζει την ακρίβεια του σαρωτή λέιζερ και την οπτική λεπτομέρεια της φωτογραμμετρίας.

Πλεονεκτήματα από τον Συνδυασμό των δύο μεθόδων:

- **Ακρίβεια και λεπτομέρεια:** Ο σαρωτής λέιζερ παρέχει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, ειδικά για περίπλοκες ή μεγάλης κλίμακας επιφάνειες, ενώ η φωτογραμμετρία προσθέτει υψηλή ανάλυση και λεπτομέρεια στην υφή του αντικειμένου.
- **Ευελιξία:** Η φωτογραμμετρία είναι πιο εύκολη στη χρήση σε περιοχές που δεν μπορούν να προσεγγιστούν εύκολα από το λέιζερ, ενώ το λέιζερ είναι πιο κατάλληλο για ακριβείς μετρήσεις σε μεγάλες ή δυσπρόσιτες περιοχές.
- **Χρήση σε διαφορετικά περιβάλλοντα:** Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών επιτρέπει τη χαρτογράφηση τόσο σε κλειστούς όσο και σε ανοιχτούς χώρους, καθώς το λέιζερ μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμα και σε περιβάλλοντα με χαμηλό φωτισμό ή όπου οι φωτογραφίες δεν είναι επαρκείς.

Το βασικότερο συμπέρασμα είναι ότι οι δυο τεχνολογίες με Laser Scanner και με τα μη επανδρωμένα συστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε αποτυπώσεις σύνθετων έργων και μνημείων και να αποδώσουν το βέλτιστο αποτέλεσμα τόσο γεωμετρικά όσο και αισθητικά με την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι επιστημονικές αρχές και έλεγχοι των Φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων και πάντα τοποθετούνται, μετρούνται και υπολογίζονται με στατιστική αξιολόγηση επαρκή φωτοσταθερά τόσο για την ολοκλήρωση των Φωτογραμμετρικών και LaserScanning εργασιών αλλά και για τον ποιοτικό έλεγχο των εργασιών (Μιχαηλίδης, 2024).

Ο Μιχαηλίδης, θέλοντας να επισημάνει την σημαντικότητα του συνδυασμού των δύο μεθόδων, ανέπτυξε το μοντέλο του Ιερού Ναού με αυτόν τον τρόπο. Ακολουθεί εικόνα με το Γεωαναφερμένο ορθομωσαϊκό του Ναού με τη χρήση Φωτογραμμετρίας και σαρωτή λέιζερ (Μιχαηλίδης, 2024):



Εικόνα 2.17: Γεωαναφερμένο τελικό ορθομωσαϊκό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τρισδιάστατοι σαρωτές & ψηφιακά δίδυμα

3.1 Τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ αποτελούν συσκευές αποτύπωσης του φυσικού σχήματος των αντικειμένων, δημιουργώντας τρισδιάστατες αναπαραστάσεις μεγάλης ακρίβειας, σε ψηφιακή μορφή, με την τεχνολογία λέιζερ. Καταγράφουν εκατομμύρια διακριτά σημεία δεδομένων για τη μέτρηση ενός αντικειμένου ή του χώρου, χρησιμοποιώντας τεχνολογία υπέρυθρης ακτινοβολίας λέιζερ που παράγει λεπτομερείς τρισδιάστατες εικόνες μέσα σε λίγα λεπτά. Οι εικόνες περιλαμβάνουν εκατομμύρια τρισδιάστατα σημεία δεδομένων, γνωστά ως νέφη σημείων (Faro.com).

Με τη χρήση των σαρωτών, επιτυγχάνεται η υψηλής ακρίβεια αποτύπωση πολύπλοκων επιφανειών σε διάφορες εφαρμογές και περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα πλεονεκτούν σε ταχύτητα σε σχέση με κοινές μεθόδους μέτρησης (χειροκίνητες) αφού η απόκτηση των δεδομένων γίνεται σε εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό.

Χωρίζονται σε τρία είδη:

- ✓ **Σαρωτές χρόνου πτήσης:** Μετρούν το χρόνο που απαιτείται για την ανάκλαση του λέιζερ. Κατάλληλοι για περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας.
- ✓ **Σαρωτές μετατόπισης φάσης:** Μετρούν τη διαφορά φάσης μεταξύ της εκπεμπόμενης και της ανακλώμενης δέσμης λέιζερ. Πιο ακριβείς και κατάλληλοι για λεπτομερείς σαρώσεις.
- ✓ **Σαρωτές τριγωνισμού:** Χρησιμοποιούν μια γραμμή λέιζερ και μια κάμερα σε γνωστή γωνία για τον υπολογισμό της απόστασης με βάση τον τριγωνισμό. Κατάλληλοι για μικρότερα αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια.

Η βασική λειτουργία κάθε σαρωτή, μπορεί να συνοψιστεί στα τέσσερα ακόλουθα βήματα:

1. **Εκπομπή λέιζερ:** Εκπέμπεται δέσμη λέιζερ στο αντικείμενο.
2. **Λήψη αντανάκλασης:** Η δέσμη λέιζερ αντανάκλαται από την επιφάνεια του αντικειμένου και επιστρέφει στον σαρωτή.
3. **Μέτρηση απόστασης:** Υπολογίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το λέιζερ για να επιστρέψει (χρόνος πτήσης) ή η μετατόπιση φάσης, ώστε να μετρηθεί η απόσταση.

4. **Συλλογή δεδομένων:** Συλλέγονται σημεία δεδομένων, τα λεγόμενα νέφη σημείων, τα οποία αναπαριστούν την επιφάνεια του αντικειμένου.

Αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την ψηφιοποίηση του φυσικού κόσμου, ωστόσο διακρίνονται ορισμένοι περιορισμοί στο γενικό σύνολο της χρήσης τους:

1. Αυξημένο κόστος, εάν οι εργασίες απαιτούν υψηλών προδιαγραφών τρισδιάστατους σαρωτές.
2. Απαιτείται εξειδικευμένο λογισμικό καθώς και δεξιότητες για να γίνει η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων.
3. Σε πολύ ανακλαστικές ή διαφανείς επιφάνειες, η ακριβής σάρωση δυσκολεύει τον χρήστη.



Εικόνα 3.1: Επίγειος (α) και κινητός (β) σαρωτής λέιζερ

3.1.1 Τρόπος λειτουργίας σαρωτών

Ο σαρωτής λέιζερ εκπέμπει μια δέσμη υπέρυθρου φωτός λέιζερ πάνω σε ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο που ουσιαστικά βάφει το περιβάλλον με φως. Η κεφαλή του σαρωτή περιστρέφεται, σαρώνοντας το λέιζερ στο αντικείμενο ή την περιοχή. Τα αντικείμενα στην πορεία του λέιζερ αντανακλούν την ακτίνα πίσω στον σαρωτή, παρέχοντας τη γεωμετρία που ερμηνεύεται σε τρισδιάστατα δεδομένα. Εκτός από τη μέτρηση της απόστασης, οι σαρωτές λέιζερ καταγράφουν τις μετρήσεις στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, παρέχοντας ένα πλήρες πεδίο δεδομένων μέτρησης (Faro.com). Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας του σαρωμένου αντικειμένου, δημιουργώντας μια λεπτομερή ψηφιακή αναπαράσταση. Όταν το νέφος των σημείων είναι πιο πυκνό, δηλαδή περισσότερα σημεία ανά περιοχή, τότε επιτυγχάνεται υψηλότερη ανάλυση η οποία οδηγεί σε λεπτομερέστερη αναπαράσταση του αντικειμένου. Η περιοχή

που μπορεί να καταγράψει ο σαρωτής από μία θέση, περιβάλλεται συνήθως εντός 360 μοιρών, ωστόσο ορισμένοι έχουν στενότερη εστίαση. Η απόσταση στην οποία ο σαρωτής μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια τα δεδομένα, μπορεί να κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως αρκετές εκατοντάδες μέτρα, ανάλογα με τον τύπο του σαρωτή.

Υπάρχουν σαρωτές που χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες στη σάρωσή τους. Μεταξύ αυτών, είναι οι σαρωτές δομημένου φωτός. Χρησιμοποιούν ένα προβαλλόμενο φωτεινό μοτίβο και μια κάμερα για να καταγράψουν την επιφάνεια του αντικειμένου. Είναι συνήθως ταχύτεροι και μπορούν να χειριστούν μεγαλύτερη ποικιλία επιφανειών σε σύγκριση με τους σαρωτές τριγωνισμού με λέιζερ.

Τα συστήματα LiDAR (ανίχνευση φωτός και μέτρηση απόστασης), ανήκουν και αυτά σε τέτοιου είδους σαρωτές, χαρτογραφώντας μεγάλα περιβάλλοντα, δάση, πόλεις, ακόμη και υποθαλάσσια εδάφη. Τέλος, οι υβριδικοί σαρωτές, συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες σάρωσης (λέιζερ και δομημένο φως) για να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση.

Ειδικές περιπτώσεις χρήσης σαρωτών λέιζερ:

- ✓ Εγκληματολογική επιστήμη (Forensic science)
- ✓ Βιομηχανία αυτοκινήτων
- ✓ Δημιουργία μοντέλων CAD από υπάρχοντα εξαρτήματα για την κατανόηση του σχεδιασμού ή την αναπαραγωγή εξαρτημάτων.
- ✓ Αεροδιαστημική
- ✓ Συντήρηση και επισκευή αεροσκαφών με τον εντοπισμό φθορών και ζημιών για ακριβείς επισκευές.
- ✓ Χειρουργικός σχεδιασμός. Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων της ανατομίας του ασθενούς για το σχεδιασμό πολύπλοκων χειρουργικών επεμβάσεων.
- ✓ Ειδικά εφέ και κινούμενα σχέδια. Σάρωση ηθοποιών και σκηνικών για τη δημιουργία ψηφιακών σκηνών για ταινίες και βιντεοπαιχνίδια.
- ✓ Δημιουργία καθλωτικών περιβαλλόντων με σάρωση τοποθεσιών του πραγματικού κόσμου.
- ✓ Κατασκευές
- ✓ Ταχεία καταγραφή της τοπογραφίας και των υφιστάμενων δομών για τον προγραμματισμό και το σχεδιασμό.

- ✓ Ψηφιοποίηση εύθραυστων αντικειμένων για συντήρηση και μελέτη χωρίς φυσικό χειρισμό.
- ✓ Καταγραφή ιστορικών χώρων με λεπτομέρεια για συντήρηση και έρευνα.

Για παράδειγμα στην εγκληματολογική Επιστήμη, οι σαρωτές μπορούν να αποτελέσουν πολύ σημαντικά εργαλεία. Οι λόγοι αξιοποίησης της σε αυτόν τον τομέα είναι οι εξής (Faro.com):

1. **Ευχρηστία:** Πολλοί κατασκευαστές προσανατολίζονται σε μια πιο απλή διεπαφή χρήστη, καθιστώντας τη λειτουργία του σαρωτή περισσότερο σαν ψηφιακή φωτογραφική μηχανή παρά σαν ένα πολύπλοκο όργανο μέτρησης.
2. **Φορητότητα:** Οι σαρωτές λέιζερ είναι πλέον μικρότεροι από ποτέ, διευκολύνοντας τη μεταφορά τους σε σκηνές εγκλήματος/ατυχήματος και τη χρήση τους σχεδόν από οποιονδήποτε.
3. **Ασφάλεια:** Τα δεδομένα μπορούν να συλλέγονται από απόσταση, με ορισμένους σαρωτές να μετρούν πάνω από 300 μέτρα μακριά. Αυτό επιτρέπει στο χειριστή να σαρώσει τη σκηνή από ασφαλές σημείο. Επιπλέον, οι σαρωτές λέιζερ μπορούν να συλλέγουν έως και 1.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, με μέσους χρόνους σάρωσης λίγων λεπτών. Λιγότερος χρόνος στη σκηνή σημαίνει λιγότερος χρόνος σε δυνητικά επικίνδυνες συνθήκες. Οι σαρωτές με λέιζερ Κλάσης I δημιουργούν ένα πραγματικά ασφαλές περιβάλλον για τα μάτια κατά τη διάρκεια τις σάρωσης.
4. **Ταχύτητα και Αποδοτικότητα:** Ολοκληρωμένες έγχρωμες σαρώσεις μπορούν να ολοκληρωθούν μέσα σε λίγα λεπτά, δημιουργώντας μια εικονική σκηνή με υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια που μπορεί να αναθεωρηθεί ξανά και ξανά χωρίς φυσική παρουσία στον χώρο. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους καταγραφής μιας σκηνής, η σάρωση με λέιζερ είναι πολύ ταχύτερη και επιτρέπει σε πολλούς ερευνητές να εξετάζουν την εικονική σκηνή ταυτόχρονα.
5. **Ποικιλία αποτελεσμάτων:** Αφού σαρωθεί η σκηνή, μπορούν να εξαχθούν ή να παραχθούν διάφοροι τύποι τελικών προϊόντων από τα δεδομένα. Για παράδειγμα, από ένα παραδοσιακό 2D σχέδιο έως μια λεπτομερή 3D απεικόνιση.
6. **Κοινωνική πίεση:** Καθώς όλο και περισσότερες υπηρεσίες χρησιμοποιούν σαρωτές λέιζερ για την καταγραφή σκηνών, το αποτέλεσμα είναι πιο ευρέως αποδεκτό, ενώ αυξάνονται και οι προσδοκίες ότι μελλοντικές σκηνές θα καταγράφονται σε 3D.
7. **Οικονομική Αποδοτικότητα:** Οι σαρωτές λέιζερ γίνονται ολοένα και πιο συγκρίσιμοι σε τιμή με τα παραδοσιακά τοπογραφικά όργανα που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή τροχαίων ατυχημάτων.

8. **Εξειδικευμένα Εργαλεία Μέτρησης:** Το λογισμικό για εγκληματολογική ανάλυση από 3D δεδομένα περιλαμβάνει πλέον ειδικά εργαλεία για τη μέτρηση αιματολογικών κηλίδων, τροχιάς βλημάτων, ύψους μαρτύρων/υπόπτων κ.λπ.
9. **Εύκολη διαμοίραση:** Υπάρχουν περισσότερα εργαλεία λογισμικού για την προβολή και την καταγραφή των δεδομένων σάρωσης χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης λογισμικού ή αγοράς πρόσθετων αδειών χρήσης.
10. **Αρχειοθέτηση τις σκηνής:** Μόλις σαρωθεί η σκηνή, ουσιαστικά «παγώνει» στον χρόνο, διατηρώντας την για μελλοντικές εικονικές επισκέψεις από οποιονδήποτε μπορεί να θέλει να τη διερευνήσει. Αυτό επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων που ίσως δεν θεωρήθηκαν σημαντικές κατά τη στιγμή της καταγραφής.

Ακόμα, στον τομέα της βιομηχανίας των αυτοκινήτων, οι σαρωτές επιτρέπουν εύκολες, άμεσες και εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις της γεωμετρίας και του σχήματος αντικειμένων, καθώς και την οπτικοποίηση τους. Εξειδικευμένο λογισμικό ελέγχου ποιότητας συγκρίνει αυτόματα τη σάρωση του προϊόντος με το ψηφιακό 3D μοντέλο, ανιχνεύοντας τυχόν αποκλίσεις και δημιουργώντας αναφορά μετρήσεων. Στη διαδικασία πλήρως αυτοματοποιημένης σάρωσης 3D, λαμβάνεται αυτόματη απόφαση για την αποδοχή ή την απόρριψη του αντικειμένου ως ελαττωματικού. Αυτό επιτρέπει τη διόρθωση τυχόν προβλημάτων σε πρώιμο στάδιο, μειώνοντας τη σπατάλη. Στην καλύτερη περίπτωση, είναι δυνατός ο εντοπισμός τρόπων βελτίωσης της απόδοσης του εξαρτήματος. Η τεχνολογία επιτρέπει τη χαρτογράφηση της παραγωγής, τη βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών και την αύξηση της αποδοτικότητας ολόκληρης της παραγωγικής γραμμής. Επιπλέον, οι σαρωτές 3D επιτρέπουν τη δημιουργία μοντέλων CAD από ήδη υπάρχοντα αντικείμενα μέσω της διαδικασίας ανάστροφης μηχανικής (reverse engineering). Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, για παράδειγμα, στην αποκατάσταση παλαιών εξαρτημάτων αυτοκινήτων ή στη βελτίωση υπάρχοντων εξαρτημάτων (knaufautomotive.com).

3.2 Ψηφιακά δίδυμα

Ψηφιακό Δίδυμο (ΨΔ) είναι μία εικονική αναπαράσταση του φυσικού αντικειμένου, περιβάλλοντος ή συστήματος, το οποίο το απεικονίζει με μεγάλη ακρίβεια. Προϋπόθεση είναι η ύπαρξη του φυσικού αντικειμένου, του αντιγράφου του αλλά και η μεταξύ τους σύνδεση.

Η ιδέα των ΨΔ εμφανίστηκε αρχικά το 2002 από τον καθηγητή Grieves, ο οποίος όρισε την έννοια του «Έννοιολογικού Ιδεώδους για Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντος» (Conceptual Ideal for PLM).

Λίγο αργότερα το 2005, ο Grieses προέκτεινε τη σημασία της και την ονόμασε «Μοντέλο Κατοπτρικών Χώρων», μετονομάζοντάς τη το 2006 ως «Μοντέλο Κατοπτρικών Πληροφοριών», καταλήγοντας το 2011 στην τελική της ονομασία ως «Ψηφιακό Δίδυμο».

Στη βιβλιογραφία συναντά κανείς πληθώρα ορισμών σχετικά με την έννοια του «ψηφιακού διδύμου, και ενδεικτικά καταγράφονται οι ακόλουθοι:

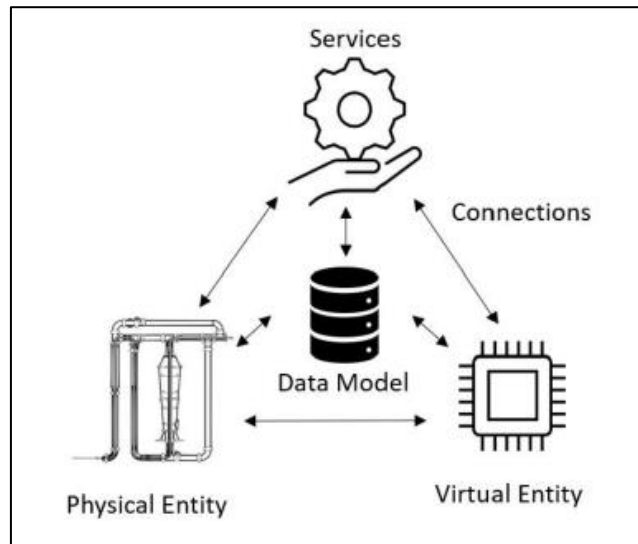
- *«Ένα ΨΔ είναι μία ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολλαπλής κλίμακας, πιθανολογική προσομοίωση ενός όμοια κατασκευασμένου οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, αισθητήρες, ιστορικά στοιχεία από το στόλο κ.λπ. για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου ιπτάμενου διδύμου του», Glaessgen&Stargel., 2012.*
- *«Ένα παράδειγμα διαχείρισης ζωής και πιστοποίησης, όπου το μοντέλο και οι προσομοιώσεις αποτελούνται από τις καταστάσεις του οχήματος που κατασκευάστηκε, τα φορτία και τα περιβάλλοντα που βιώθηκαν, καθώς και το ιστορικό για το συγκεκριμένο όχημα, ώστε να είναι δυνατή η υψηλής πιστότητας μοντελοποίηση μεμονωμένων αεροδιαστημικών οχημάτων καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της», Hochhalteretal., 2014.*
- *«Δομικό μοντέλο υψηλής πιστότητας που ενσωματώνει βλάβες λόγω κόπωσης και αποτελεί ένα αρκετά πλήρες ψηφιακό αντίγραφο του πραγματικού δομικού συστήματος ενδιαφέροντος», Bazilevsetal.,*
- *«Μια ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολυκλιμακωτή, πιθανολογική προσομοίωση του προϊόντος που κατασκευάστηκε, η οποία χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, δεδομένα ιστορικού, κ.λπ. για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου φυσικού του διδύμου», Ríosetal., 2015.*
- *«Ένα σύνολο εικονικών πληροφοριακών δομών που περιγράφει πλήρως ένα δυνητικό ή πραγματικό φυσικό προϊόν παραγωγής από το μικροατομικό επίπεδο έως το μακρογεωμετρικό επίπεδο», Grieses&Vickers, 2016.*
- *«Ένα ΨΔ είναι το ψηφιακό μοντέλο μιας φυσικής συσκευής ή συστήματος που αντιπροσωπεύει όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και τις συνδέσεις με τα εξαρτήματα που δουλεύουν», Chen, 2017.*
- *«Μια φυσική οντότητα, ένα εικονικό αντίστοιχο, μια σύνδεση μεταξύ του φυσικού και του εικονικού αντίστοιχου, δεδομένα και υπηρεσίες είναι τα συστατικά στοιχεία ενός πλήρους ΨΔ», Tao, Cheng, etal., 2018.*

- «Μια εικονική αναπαράσταση του φυσικού προϊόντος ή μιας διαδικασίας, που χρησιμοποιείται για την κατανόηση και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών απόδοσης του φυσικού ομολόγου», Siemens, 2019.
- «Ένα εικονικό μοντέλο μιας διαδικασίας, ενός προϊόντος, ενός περιουσιακού στοιχείου παραγωγής ή μιας υπηρεσίας. Συνδεδεμένο με αισθητήρες και IoT μηχανές και συσκευές, σε συνδυασμό με τη μηχανική μάθηση και την προηγμένη ανάλυση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβάλλεται η κατάσταση της συσκευής σε πραγματικό χρόνο. Όταν συνδυάζεται με πληροφορίες σχεδιασμού τόσο 2D όσο και 3D, ένα ΨΔ μπορεί να απεικονίσει το φυσικό κόσμο και να παρέχει μια μέθοδο προσομοίωσης ηλεκτρονικών, μηχανικών και συνδυασμένων αποτελεσμάτων του συστήματος», Microsoft, 2020.
- «Τα ψηφιακά δίδυμα είναι δυναμικά ψηφιακά πληροφοριακά μοντέλα που αντιπροσωπεύουν αντικείμενα του πραγματικού κόσμου», Autodesk, 2022.

Οι δυνατότητες που προσφέρονται από την μοντελοποίηση ενός αντικειμένου, καθιστούν την αναπαράστασή του εξαιρετικά σημαντική. Μία ακριβής περιγραφή του φυσικού αντικειμένου και της συμπεριφοράς αυτού, είναι ικανή να αντικαταστήσει το φυσικό αντικείμενο σε φάσεις δοκιμών και σχεδιασμού. Η ικανότητα αυτή θα παρέχει έναν τρόπο κατανόησης της συμπεριφοράς του αντικειμένου υπό κανονική χρήση και σε καταστάσεις υψηλής πίεσης, εντοπίζοντας κρίσιμα σημεία στο σχεδιασμό, στα υλικά και για την προβλεπόμενη χρήση. Όσο πιο αποτελεσματική και ακριβής είναι η μοντελοποίηση, τόσο περισσότερο το ΨΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση της συμπεριφοράς του φυσικού αντικειμένου σε συγκεκριμένες καταστάσεις (Crespital., 2023). Μπορεί να πει κανείς λοιπόν, πως το ΨΔ λειτουργεί παράλληλα με το φυσικό αντικείμενο, υποβοηθώντας στην παρακολούθηση και την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του, ώστε τελικά να ληφθούν αποφάσεις βασισμένες σε πραγματικά δεδομένα και γεγονότα.

Σύμφωνα με τους Ταο κ.α., τα ΨΔ αποτελούνται από πέντε μέρη:

- 1) Το φυσικό μέρος στον πραγματικό κόσμο
- 2) Το εικονικό μέρος στον ψηφιακό κόσμο
- 3) Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα δύο μέρη
- 4) Τις αμφίδρομες συνδέσεις μεταξύ όλων των μερών του ΨΔ
- 5) Τις υπηρεσίες που προκύπτουν (αξιολογήσεις, βελτιστοποιήσεις, προβλέψεις κ.α.)



Εικόνα 3.2: Προσέγγιση ΨΔ
 Πηγή: Tao et al., 2019

Σε πολλούς κλάδους και εφαρμογές που χρησιμοποιούνται τα ΨΔ (βιομηχανία, συστήματα υγείας, εκπαίδευση, αρχιτεκτονική κ.α.), προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα εκ των οποίων τα βασικότερα είναι:

- Μεγάλος όγκος πληροφορίας, επιτρέποντας την οργάνωση και τη λήψη στοχευμένων αποφάσεων.
- Η συντήρηση του πραγματικού αντικειμένου και η πρόβλεψη της μελλοντικής του συμπεριφοράς στο περιβάλλον, υποστηρίζει την αντιμετώπιση των προβλημάτων, τη μείωση του κόστους και τη σωστή συντήρηση.
- Βελτιστοποιείται το αντικείμενο και γίνεται πιο αποδοτικό, αλλά και οι λειτουργίες πιο οικονομικές.
- Εξασφαλίζεται η σταθερά υψηλή ποιότητα του αντικειμένου, καθώς παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο.

Οι βασικοί μέθοδοι δημιουργίας των Ψηφιακών Διδύμων είναι τέσσερις:

1. **Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων:** Αριθμητική τεχνική κατασκευής ΨΔ που αντιπροσωπεύει το εικονικό κομμάτι του αντικειμένου και λαμβάνονται παράμετροι από το φυσικό. Το μοντέλο που παράγεται συνδυάζεται μετέπειτα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο φυσικό αντικείμενο.
2. **Με βάση τα δεδομένα:** Το ΨΔ θα προκύψει με βάση τα δεδομένα και θα έχει μεγάλη ακρίβεια στην αναπαράσταση του πραγματικού μέρους. Αυτή η μέθοδος συνδυάζεται με την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση.

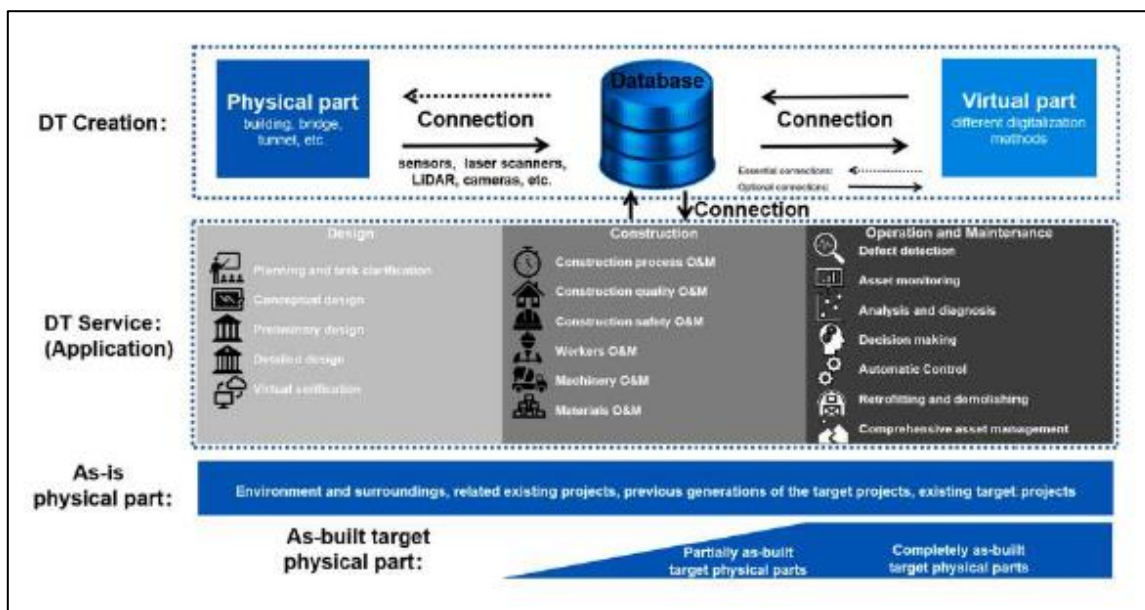
3. **Μέθοδος σάρωσης με λέιζερ:** Η μέθοδος αυτή παρέχει μεγάλη ακρίβεια, ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Πραγματοποιείται σάρωση για τη συλλογή δεδομένων με διαφορετικά είδη σαρωτών, ανάλογα με το περιβάλλον. Παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για εργασίες επιθεώρησης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές αφού επιτρέπει την ανίχνευση και ταξινόμηση των ζημιών στις προσόψεις, τον εντοπισμό των κατασκευασμένων αποκλίσεων από το σχεδιασμό και την υλοποίηση της ανίχνευσης συγκρούσεων μεταξύ κατασκευών (Λεπίδας, 2024).
4. **Μέθοδος με μη επανδρωμένο εναέριο όχημα:** Μία μέθοδος που πραγματοποιείται με κάμερες που καταγράφουν και παράγουν υψηλής ανάλυσης εικόνες. Αρκετά δημοφιλής επιλογή για δημιουργία μοντέλων ΨΔ, καθώς παρέχονται πολλά δεδομένα υψηλής ακρίβειας σε μικρό χρονικό διάστημα.

3.3 Τα ψηφιακά δίδυμα στον κλάδο των κατασκευών

Ο βασικότερος λόγος αξιοποίησης των ΨΔ στον κατασκευαστικό κλάδο είναι για τη μοντελοποίηση των κτιριακών πληροφοριών. Αποτελεί βασικό εργαλείο διαχείρισης της παραγωγής μία κατασκευής, τόσο σε παροχή πληροφοριών όσο και σε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της. Για τον τομέα των κατασκευών, ο ορισμός που ταιριάζει καλύτερα στο ΨΔ είναι ο εξής:

«Το Κατασκευαστικό Ψηφιακό Δίδυμο είναι ένα εικονικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει ένα φυσικό κτίριο ή υποδομή ή τεχνικό έργο. Αυτό το μοντέλο αντιστακλά τη δομή, τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πραγματικού, επιτρέποντας την ανάλυση του αντικείμενου στο εικονικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Το Ψηφιακό Δίδυμο λειτουργεί παράλληλα με το πραγματικό αντικείμενο, επιτρέποντας την παρακολούθηση, την ανάλυση και την πρόβλεψη της απόδοσής και της κατάστασής του στη διάρκεια της ζωής του, καθώς και τη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα», Λεπίδας, 2024.

Τα ΨΔ συμμετέχουν σε όλα τα στάδια ζωής του έργου, είτε αυτό πρόκειται για το σχεδιασμό του, είτε για την κατασκευή και αργότερα τη συντήρησή του. Ωστόσο είναι προτιμότερο να δημιουργηθεί το μοντέλο κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του έργου, καθώς έτσι επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοσή του. Το πεδίο εφαρμογής τους, χωρίζεται βάσει του κύκλου ζωής του έργου (σχεδιασμός-κατασκευή-συντήρηση) και βάσει των υπηρεσιών του (“ως είναι”-“as-is” και “ως κατασκευάστηκαν”-“as-built”).



Σχήμα 3.1: Εφαρμογές ΨΔ στις κατασκευές

Τα “as-is” στοιχεία (περιβάλλοντας χώρος, υπάρχουσες υποδομές), έχουν τη δυνατότητα να δημιουργηθούν οποιαδήποτε στιγμή μέσα στο κύκλο ζωής του έργου. Τα “as-built” στοιχεία είναι δυνατόν να υπάρχουν είτε στο στάδιο του σχεδιασμού, όπου τα έργα δεν υπάρχουν, είτε στο στάδιο της κατασκευής, όπου τα έργα κατασκευάζονται και ολοκληρώνονται μερικώς. Στο στάδιο λειτουργίας και συντήρησης τα έργα είναι πλήρως ολοκληρωμένα (Λεπίδας, 2024).

3.4 Ψηφιακά δίδυμα (ΨΔ) στον τομέα της γεφυροποιίας

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα του βιώσιμου και ασφαλούς μέλλοντος της διαχείρισης του κύκλου ζωής των υποδομών. Μέσω της τόσο ακριβούς εικονικής αναπαράστασης του φυσικού αντικειμένου, επιτυγχάνεται η εξ αποστάσεως επιθεώρηση, ο έλεγχος ζημιών και η υποβοήθηση των δραστηριοτήτων συντήρησης του. Τα ΨΔ είναι καθοριστικής σημασίας για την προώθηση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας, από τη στιγμή που οι δυνατότητες επιθεώρησης ενισχύονται τεχνολογικά και απαιτούνται λιγότεροι πόροι στο χώρο. Οι τρέχουσες πρακτικές επιθεώρησης δεν επιτρέπουν την βιωσιμότητα της διαδικασίας, σε αντίθεση με τη μέθοδο των ψηφιακών διδύμων που την υποστηρίζουν, αφού προάγουν την αειφορία, δηλαδή τους καλύτερα σχεδιασμένους πόρους, την εξοικονόμηση χρόνου, την πρόβλεψη επισκευών νωρίτερα στη διάρκεια ζωής της υποδομής και την ασφαλή παράταση του κύκλου ζωής της.

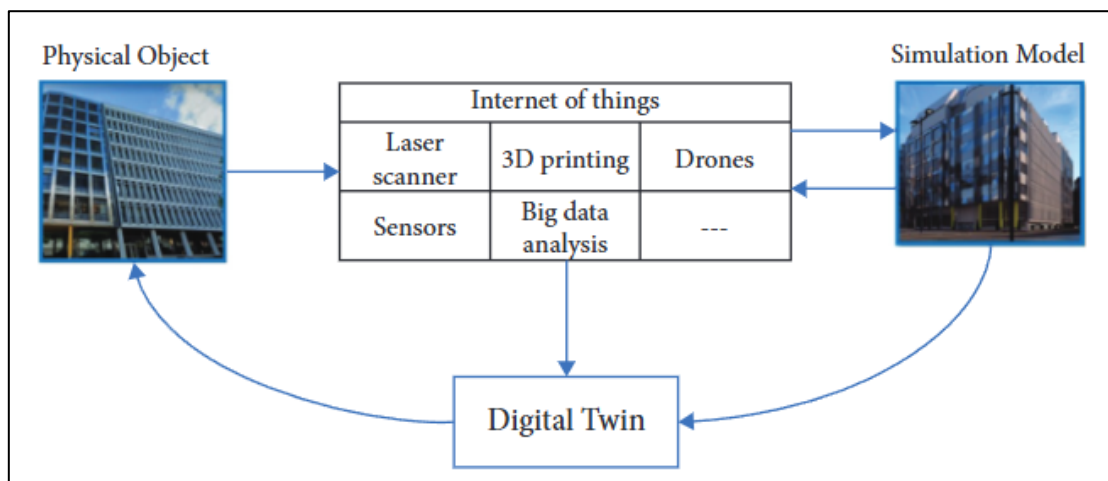
Η συντήρηση κρίσιμων στοιχείων της οδικής υποδομής, όπως αυτό των γεφυρών, είναι ζωτικής σημασίας αφού από αυτή κρίνεται η δημόσια ασφάλεια. Οι χειροκίνητες επιθεωρήσεις γεφυρών

αποτελούν τον παραδοσιακό και συνήθη τρόπο επιθεώρησής τους, ωστόσο παρουσιάζονται σε αυτόν αρκετές προκλήσεις:

- ✓ Απαίτηση δαπανηρού εξοπλισμού επιθεώρησης και ογκώδους εξοπλισμού αναρρίχησης
- ✓ Χρονοβόρες διαδικασίες
- ✓ Ανακρίβειες, κυρίως όταν η προσέγγιση σε ορισμένες θέσεις είναι δύσκολη με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν λεπτομερείς εικόνες
- ✓ Κίνδυνος για την ασφάλεια τόσο των αυτοκινητιστών, των πεζών όσο και των εργαζομένων
- ✓ Ταλαιπωρία για τους χρήστες του δρόμου, αφού για να γίνουν οι μετρήσεις χρειάζεται κατ' ελάχιστον ο αποκλεισμός της λωρίδας κυκλοφορίας

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στη δυσκολία λήψης των απαραίτητων μετρήσεων, η οποία με τη σειρά της οδηγεί συχνά σε ανακρίβειες και στην απώλεια κρίσιμων δεδομένων.

Σημαντικός τρόπος αντιμετώπισης των προκλήσεων που προαναφέρθηκαν είναι η δημιουργία ψηφιακών διδύμων. Σε μια τυπική εφαρμογή, το ψηφιακό δίδυμο θα περιλαμβάνει δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) ψηφιακά μοντέλα που αντιστοιχούν στη φυσική δομή της γέφυρας. Για το σχεδιασμό της γέφυρας, τα μοντέλα θα περιλαμβάνουν 2D και 3D σχέδια, ενώ για την ανάλυση της δομής χρησιμοποιούνται μηχανικά μοντέλα. Για τις οπτικές επιθεωρήσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν UAVs για τη συλλογή εικόνων, βίντεο και μετρήσεων. Η εισαγωγή αυτών των δεδομένων στα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπει την αξιολόγηση της κατάστασης της φυσικής γέφυρας και τον εντοπισμό οπτικών ελαττωμάτων όπως ρωγμές, διάβρωση, φθορά κ.ά. Επιπλέον, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιούν ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα για να προβλέπουν την κατάστασή της υπό συγκεκριμένες συνθήκες μετά από ορισμένο χρόνο (info.qii.ai). Παράλληλα, μειώνεται το κόστος επιθεώρησης της γέφυρας, βελτιώνεται το επίπεδο και η ποιότητα της επιθεώρησης, μειώνεται ο κίνδυνος και ταυτόχρονα αποκτώνται αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα από τις δομές με πιο ασφαλή, οικονομικό και έγκαιρο τρόπο.



Εικόνα 3.3: Η τεχνολογία των ΨΔ

Τα ΨΔ παρέχουν την απαραίτητη βάση για τη μελέτη σε διάφορους τομείς, όπως η πρόγνωση ελαττωμάτων και η αποτελεσματικότητα της παραγωγής. Η ζήτηση για επιθεώρηση, αξιολόγηση και διαχείριση έχει αυξηθεί δραστικά τα τελευταία χρόνια, ιδίως για τις γέφυρες, οι οποίες είναι από τα πιο ευάλωτα και κρίσιμα στοιχεία του οδικού δικτύου και πρέπει να επιθεωρούνται και να συντηρούνται σχολαστικά (Haidar Hosamo, Mohsen Hosamo, 2022).

Τα ΨΔ γεφυρών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς που συμβάλλουν στη βελτίωση της λειτουργικότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των αντίστοιχων φυσικών αντικειμένων.

Οι πιο σημαντικές εφαρμογές περιλαμβάνουν (biblus.accasoftware.com):

- ✓ Παρακολούθηση απόδοσης και υγείας της δομής μέσω αισθητήρων που ανιχνεύουν πιθανά προβλήματα και ανωμαλίες σε πραγματικό χρόνο (όπως ρωγμές και παραμορφώσεις), επιτρέποντας έγκαιρη παρέμβαση για την αποτροπή σοβαρότερων ζημιών.
- ✓ Προληπτική συντήρηση με ανάλυση ιστορικών δεδομένων και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βοηθώντας στην πρόβλεψη των αναγκών συντήρησης και τον προγραμματισμό παρεμβάσεων εκ των προτέρων (όπως επισκευές ή αντικαταστάσεις), μειώνοντας τον απρογραμματίστο χρόνο διακοπής και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της υποδομής.
- ✓ Αξιολόγηση κινδύνου μέσω της συλλογής, ανάλυσης και προσομοίωσης δεδομένων που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες, τη συμπεριφορά της δομής και τις ροές κυκλοφορίας, επιτρέποντας τον εντοπισμό πιθανών κινδύνων και την εφαρμογή προληπτικών μέτρων για τη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας της γέφυρας.
- ✓ Εκπαίδευση και κατάρτιση μέσω προσομοιώσεων εικονικής ή επαυξημένης πραγματικότητας, που επιτρέπουν στους χειριστές να εξομοιώνουν διάφορα σενάρια και να

ασκούνται σε δραστηριότητες επιθεώρησης, συντήρησης και αντιμετώπισης εκτάκτων περιστατικών χωρίς να διακινδυνεύουν την υγεία και την ασφάλειά τους.

- ✓ Υποστήριξη αποφάσεων, καθώς η συλλογή ακριβών και επικαιροποιημένων δεδομένων επιτρέπει στους επαγγελματίες του κλάδου να αναλύουν την αποτελεσματικότητα διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης, να αξιολογούν τις συνέπειές τους ως προς το κόστος και να λαμβάνουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις.
- ✓ Βελτιστοποίηση απόδοσης: η ικανότητα των ψηφιακών διδύμων να προσομοιώνουν υποθετικά σενάρια βοηθά τους μηχανικούς να αξιολογούν τον αντίκτυπό τους στη φυσική υποδομή, να βελτιστοποιούν τις σχεδιαστικές επιλογές και να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν πιθανά ευάλωτα σημεία εκ των προτέρων.

Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, η χρήση της τεχνολογίας ΨΔ στον τομέα των υποδομών, και ιδιαίτερα στη διαχείριση γεφυρών, εγκυμονεί κάποιες δυσκολίες οι οποίες είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν.

Αυτές οι δυσκολίες σχετίζονται κυρίως με (biblus.accasoftware.com):

- ✓ Την πολυπλοκότητα ενσωμάτωσης και συγχρονισμού δεδομένων από διάφορες πηγές και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των συλλεγόμενων πληροφοριών
- ✓ Τις δυσκολίες που αφορούν την εγκατάσταση και τη συντήρηση αισθητήρων σε φυσικές υποδομές
- ✓ Την αδιάκοπη προσοχή που απαιτείται για τον έλεγχο όλων των παραγόντων που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση, την παροχή ισχύος και τη συνδεσιμότητα των συσκευών παρακολούθησης
- ✓ Την εφαρμογή μέτρων κυβερνοασφάλειας, πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και ελέγχων πρόσβασης για την προστασία της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των συλλεγόμενων δεδομένων
- ✓ Την ανάγκη για ενημέρωση και επαλήθευση του μοντέλου βάσει της πραγματικής συμπεριφοράς της υποδομής για τη διασφάλιση της μέγιστης ακρίβειας
- ✓ Την έλλειψη εξειδικευμένων επαγγελματιών στην ανάλυση δεδομένων, την ψηφιακή μοντελοποίηση και τη μηχανική υποδομών
- ✓ Την πολλές φορές σημαντική επένδυση που απαιτείται για την ανάπτυξη και τη διαχείριση των ψηφιακών διδύμων

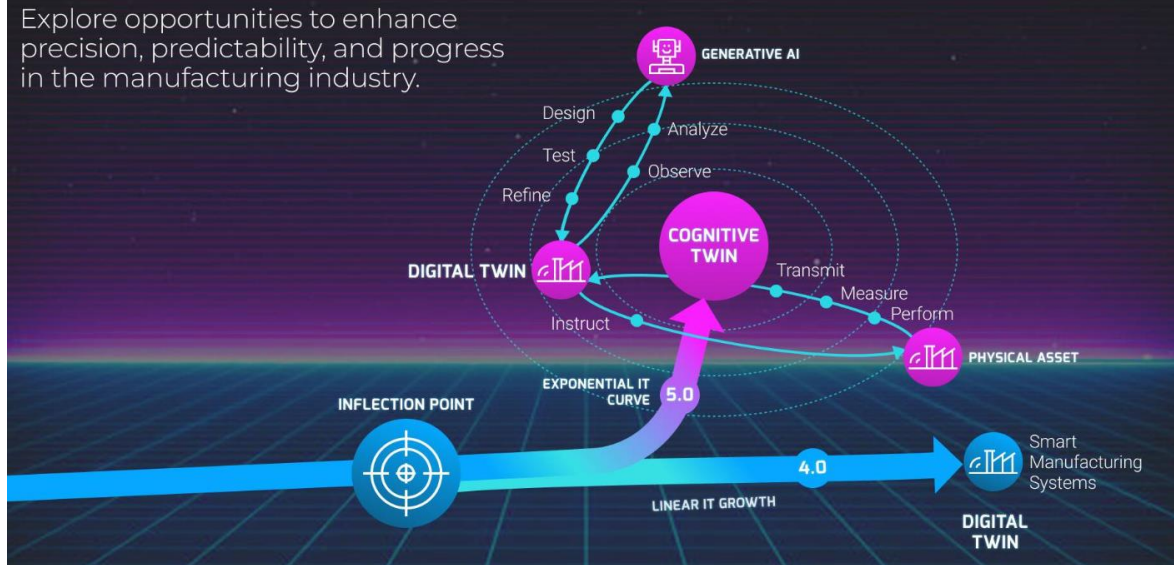


Εικόνα 3.4: Ψηφιακό δίδυμο γέφυρας
Πηγή: <https://strucinspect.com/en/digital-twin/>

3.5 Τεχνολογίες που συνδυάζονται με τα ΨΔ

Τα τελευταία χρόνια τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI), το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), και η υπολογιστική νέφους (cloud computing), έχουν επιτρέψει και βοηθήσει την ψηφιοποίηση διάφορων στοιχείων σε πολλούς τομείς. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται από τα ΨΔ ώστε να γίνει η ενοποίηση του πραγματικού και εικονικού αντικειμένου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, αποτελώντας τη βάση για τη μελέτη του. Οι πρόσθετες αυτές τεχνολογίες συμβάλλουν στη βελτίωση των αποτελεσμάτων των ΨΔ. Ειδικότερα, η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει την απόκτηση πιο χρήσιμων και έξυπνων γνώσεων. Με την πρόοδο στις τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας και στην ανάλυση ροής, είναι δυνατή η χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες και τις τεχνολογίες συλλογής πληροφοριών, όπως τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βοηθήσει τους επιθεωρητές να αναλύσουν δεδομένα αισθητήρων και να εντοπίσουν βλάβες σε πραγματικό χρόνο (info.qii.ai). Με αυτό τον τρόπο, στην επιθεώρηση της γέφυρας, αξιολογείται η αναπαράστασή της με πολύ καλή ακρίβεια και προβλέπεται η μελλοντική (ακόμα και πριν την επιτόπια επιθεώρηση) κατάσταση της με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες χρήσης της. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, πως με την ενσωμάτωση άλλων τεχνολογιών και ιδίως του AI, πραγματοποιούνται επιθεωρήσεις εις βάθος λαμβάνοντας ποιοτικά δεδομένα, ώστε να επιτευχθεί η ακριβής αξιολόγηση των γεφυρών.

Explore opportunities to enhance precision, predictability, and progress in the manufacturing industry.



Εικόνα 3.5: Ψηφιακά δίδυμα και Τεχνητή νοημοσύνη

Πηγή: <https://www.infotech.com/research/ss/generative-ai-in-digital-twins>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εφαρμογή Μετρητικών Τεχνικών

4.1 Τεχνικά στοιχεία της γέφυρας

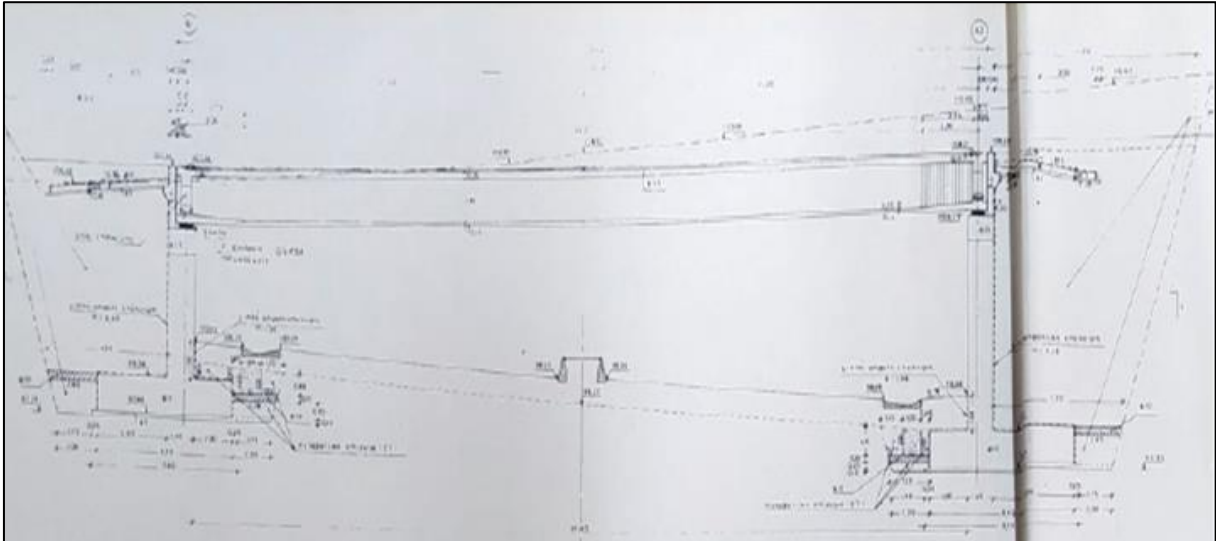
Η γέφυρα που μελετάται, είναι η Α017 επί της Ολυμπίας Οδού στον αυτοκινητόδρομο Αθηνών-Κορίνθου, στη χιλιομετρική θέση 45+550.

Είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι μεσαίου ανοίγματος (41,42 μ.)

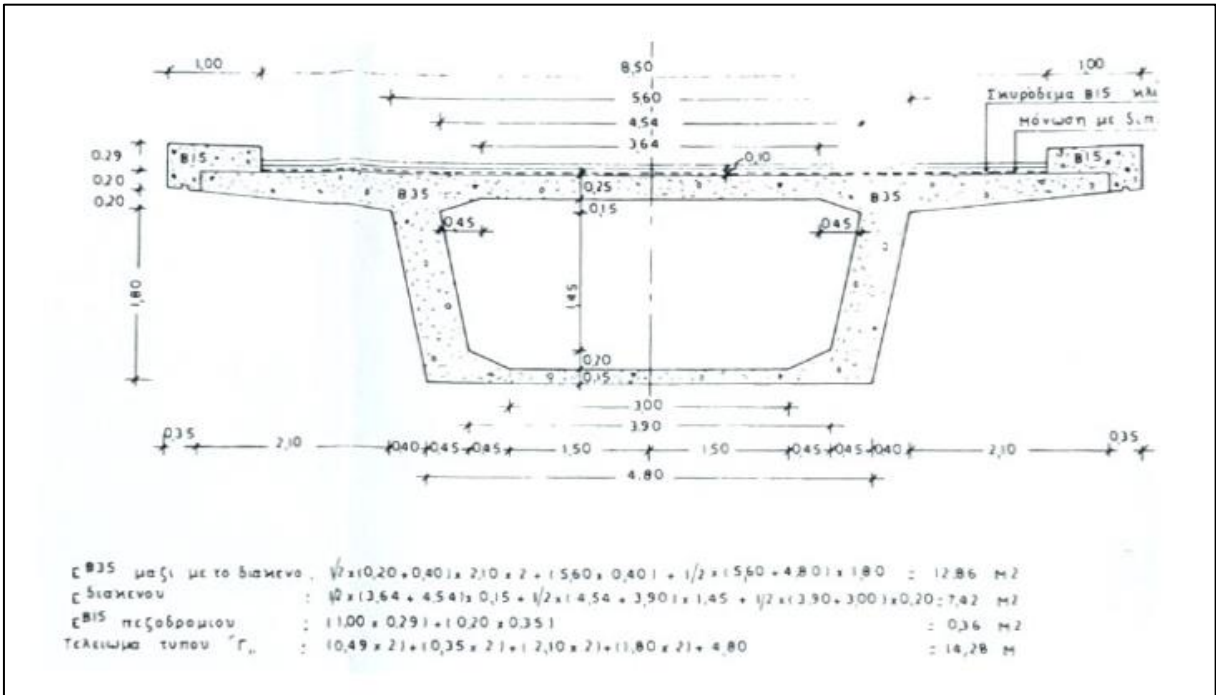


Εικόνα 4.1: Λήψη γέφυρας από το Google Earth

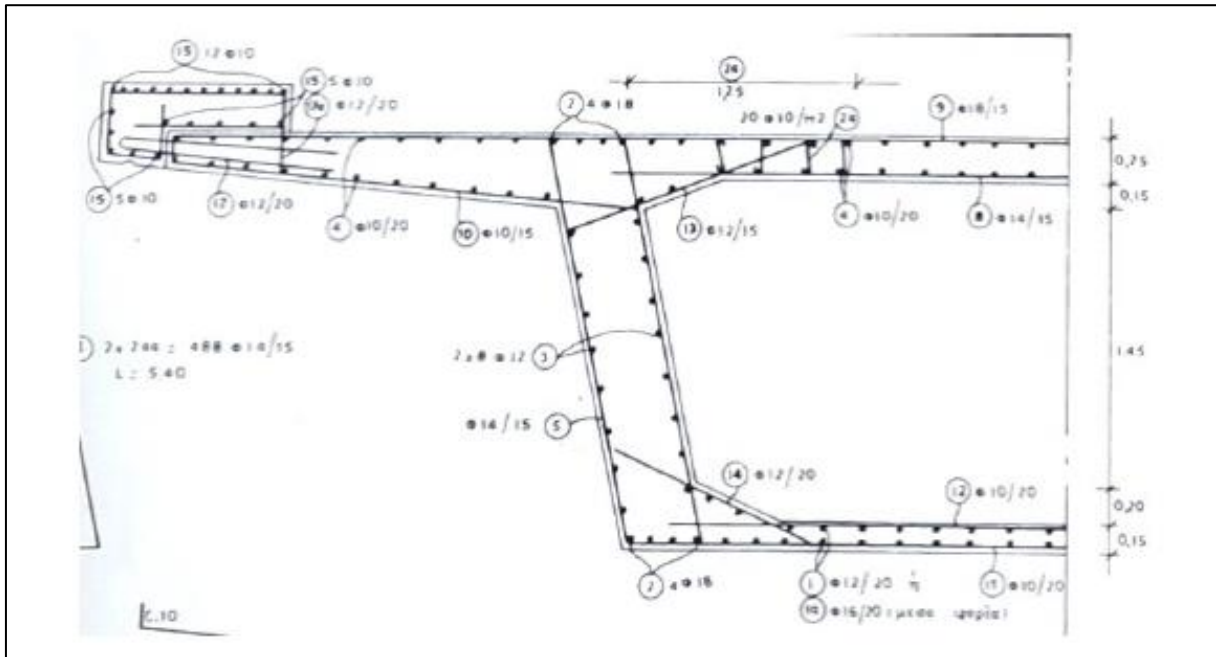
Από προηγούμενη μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί στην γέφυρα, έχουν αποκομιστεί τα παρακάτω σχέδια (Ολυμπία Οδός):



Εικόνα 4.2: Διαμήκης Τομή Γέφυρας



Εικόνα 4.3: Εγκάρσια Τομή Γέφυρας



Εικόνα 4.4: Διάταξη Οπλισμού στο μέσο του Ανοίγματος της Γέφυρας

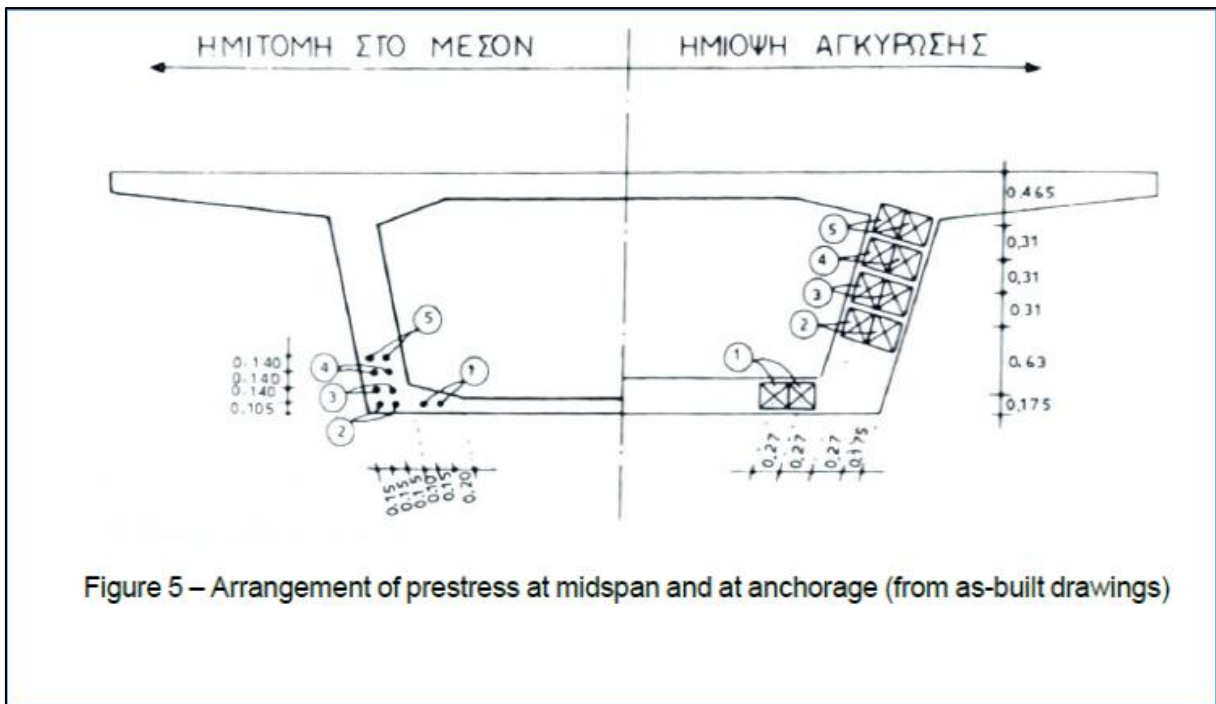


Figure 5 – Arrangement of prestress at midspan and at anchorage (from as-built drawings)

Εικόνα 4.5: Διάταξη της Προέντασης στο Μέσο του Ανοίγματος

4.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

Για την ορθότερη τεκμηρίωση της γέφυρας και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- ✓ Τρισδιάστατος σαρωτής
- ✓ ΣμηΕΑ DJI Phantom 4 RTK
- ✓ ΣμηΕΑ DJI Mavic Air 3
- ✓ Φωτοσταθερά τύπου checkerboard

4.2.1 Τρισδιάστατος σαρωτής

Για την πραγματοποίηση των σαρώσεων, χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής FaroFocus Premium.



Εικόνα 4.6: Ο σαρωτής Faro Focus Premium.

Ο συγκεκριμένος σαρωτής παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία FARO σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις εμβέλειας των 70, των 150 και των 350 μέτρων αντίστοιχα. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής με εμβέλεια 150 μέτρων.

Η εμβέλεια σάρωσης 150 μέτρων και το σφάλμα μέτρησης του σαρωτή (2mm στα 10 μέτρα και 3.5mm στα 25 μέτρα) είναι ιδανικά για τις συγκεκριμένες μετρήσεις όπου η γεωμετρία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου πρέπει να αποδοθεί με ακρίβεια.

Χαρακτηρίζεται επιπλέον από την πολύ καλή κάμερα με δυνατότητα λήψεων HDR προσδίδοντας έναν ρεαλιστικό και φαντασμαγορικό χρωματισμό στο νέφος σημείων που δημιουργείται. Υποστηρίζεται η δυνατότητα συνένωσης των σαρώσεων στο πεδίο (on site pre-registration) μέσω αντίστοιχης εφαρμογής της FARO παρέχοντας έτσι στο χρήστη αρκετά μειωμένο χρόνο στην μετέπειτα επεξεργασία (post processing). Τέλος, μέσω της διαθέσιμης προεπισκόπησης, ο χρήστης μπορεί να έχει εποπτεία των σαρώσεων που έχει πραγματοποιήσει, σε πραγματικό χρόνο.

Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά να είναι τα ακόλουθα:

Performance Specifications			
Range Option	Focus Premium 350	Focus Premium 150	Focus Premium 70
Unambiguity Interval	614 m for up to 0.5 MPts/sec 307 m at 1 MPts/sec 153 m at 2 MPts/sec	614 m for up to 0.5 MPts/sec 307 m at 1 MPts/sec 153 m at 2 MPts/sec	614 m for up to 0.5 MPts/sec 307 m at 1 MPts/sec 153 m at 2 MPts/sec
	Range		
White, 90% Reflectivity	0.5 – 350 m	0.5 – 150 m	0.5 – 70 m
Dark-grey, 10% Reflectivity	0.5 – 150 m	0.5 – 150 m	0.5 – 70 m
Black, 2% Reflectivity	0.5 – 50 m	0.5 – 50 m	0.5 – 50 m
	Range Noise^{1,2}		
White, 90% Reflectivity	0.1 mm @ 10 m, 0.2 mm @ 25 m		
Dark-grey, 10% Reflectivity	0.3 mm @ 10 m, 0.4 mm @ 25 m		
Black, 2% Reflectivity	0.7 mm @ 10 m, 1.2 mm @ 25 m		
Max Speed	Up to 2 MPts/sec		
3D Accuracy ³	2 mm @ 10 m, 3.5 mm @ 25 m		
Ranging Error ⁴	±1 mm		
Angular Accuracy ⁵	19 arcsec		
LaserHDR	Yes		
Temperature Range ⁶	Operating: +5 ° to +40 °C, Extended Operating: -10 ° to +55 °C, Storage: -10 ° to +60 °C		

Additional Performance Specifications		Additional Features	
Color Unit		Dual Axis Compensator	
Color Resolution	Up to 266 MPx color	Performs a leveling of each scan with an accuracy of 19 arcsec valid within ±2°	
Raw Color Resolution	867 MPx	Height Sensor	
HDR Camera	13 MPx - 2x, 3x, 5x brackets	Via an electronic barometer, the height relative to a fixed point can be detected and added to a scan	
Parallax	Minimized due to co-axial design	Compass⁹	
Deflection Unit		The electronic compass gives the scan an orientation	
Field of View	300° vertical ⁸ / 360° horizontal	GNSS	
Step Size	0.009° (40,960 Pts on 360°) vertical / 0.009° (40,960 Pts on 360°) horizontal	Integrated GPS & GLONASS	
Max. Scan Speed	97 Hz (vertical)	On-Site Compensation	
Laser (Optical Transmitter)		Creates current quality report and improves compensation automatically	
Laser Class	Laser Class 1	Accessory Bay	
Wavelength	1553.5 nm	The accessory bay connects versatile accessories to the scanner	
Beam Divergence	0.3 mrad (1/e)	Inverse Mounting	
Beam Diameter at Exit	2.12 mm (1/e)	Yes	
Data Handling and Control		Real-time, On-site Registration	
Data Storage	SATA 3.0 SSD 128 GB and SDXC ⁷ V30 64 GB SD Card; SD3.0, UHS-I / SDXC ⁷ / SDHC ⁷ , max. 512 GB	Stream App real-time scan streaming, registration, overview map and Sphere cloud upload	
Scanner Control	Via touch screen display and WLAN connection, Control by FARO Stream App (iOS & Android) or mobile devices with HTML5	Electronic Automation Interface	
Interface Connection		Available as option, only at point of sale	
WLAN	IEEE 802.11 ac/a/b/g/n 2x2 MIMO, as access point or client in existing networks (2.4 and 5 GHz)	Digital Hash Function	
USB	USB 3 port	Scans are cryptographically hashed and signed by the scanner	
		Rescanning of Distant Targets	
		Defined areas recaptured in higher resolution at a greater distance	
		Retake Photos	
		Select individual photographs with unwanted objects and retake them	
General Specifications			
Power Supply		19 V (external supply), 14.4 V (internal battery)	
Typical Power Consumption		19 W idle, 32 W scanning, 72 W charging	
Typical Battery Operation Time		About 4 hours	
Typical Scan Time from start until the scanner can be moved⁷		Gray scale < 1 min HDR Colored < 1:15 Colored Flash Scan < 30 seconds ¹⁰	
Ingress Protection (IP) Rating Class		54	
Humidity		Non-condensing	
Weight		4.4 kg (including battery)	
Size/Dimensions		230 x 183 x 103 mm	
Calibration		Recommended annually	
Manufacturer Warranty		2 years	

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή FaroFocusPremium

4.2.2 ΣμηΕΑ DJI Phantom 4 RTK

Το RTK, που σημαίνει Real-Time Kinematic Processing, είναι μια τεχνολογία διόρθωσης GPS που παρέχει ακριβείς συντεταγμένες σε πραγματικό χρόνο όταν τα drones φωτογραφίζουν μια τοποθεσία. Το RTK είναι μια προηγμένη τεχνολογία GPS που βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων χαρτογράφησης με drone. Η τεχνολογία αυτή βοηθά στη διόρθωση ανακριβών πληροφοριών που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της χαρτογράφησης με drone. Αυτές οι βελτιώσεις επιτρέπουν πολύ υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας στα αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να συλλεχθούν πολύ πιο αποτελεσματικά σε σύγκριση με τις μεθόδους χαρτογράφησης (www.propelleraero.com).

Το συγκεκριμένο drone χρησιμοποιήθηκε για τις περιμετρικές λήψεις αλλά και αυτές που έγιναν στο επάνω μέρος της γέφυρας. Έχει βάρος 1341 γραμμάρια και είναι εφοδιασμένο με δέκτη GNSS RTK δύο συχνοτήτων (L1, L2) ακρίβειας υψομετρικής 1.5cm+1ppm (RMS) και οριζοντιογραφικής 1cm+1ppm (RMS).

Έχει μέγιστη ταχύτητα πτήσης τα 58km/h και μέγιστη διάρκεια πτήσης τα 30 λεπτά, εύρος κατακόρυφης λειτουργίας του Gimbal -90° έως $+30^{\circ}$, ενώ είναι εφοδιασμένο με κάμερα η οποία έχει ανάλυση 20 Mpixel με φακό 8.8 mm / 24 mm με f/2.8 – f/11 (www.dji.com).



Εικόνα 4.7: Το ΣμηΕΑ DJI Phantom 4 RTK

4.2.3 ΣμηΕΑ DJI Mavic Air 3

Το συγκεκριμένο drone χρησιμοποιήθηκε για τις λήψεις στο κάτω μέρος της γέφυρας. Έχει βάρος 720 gr. Έχει μέγιστη εμβέλεια πτήσης 32km και μέγιστη διάρκεια πτήσης 46 λεπτά, εύρος

κατακόρυφης λειτουργίας του Gimbal -90° έως $+60^\circ$, ενώ είναι εφοδιασμένο με κάμερα, η οποία έχει ευρυγώνιο αλλά και τηλεσκοπικό φακό με ανάλυση στα 48 Mpixel με φακό 82° -24 mm με $f/2.7$ για τον ευρυγώνιο ενώ για τον τηλεσκοπικό ισχύουν τα FOV(Field of View) 35° -70 mm με $f/2.8$.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο drone πέραν της ανωτερότητας του στον τομέα της κάμερας έναντι του phantom RTK που χρησιμοποιήθηκε για τις περιμετρικές λήψεις, είναι το εύρος λειτουργίας του gimbal. Με $+60^\circ$ επί του κατακόρυφου άξονα μπορούν πολύ εύκολα να πραγματοποιηθούν λήψεις στο κάτω μέρος της γέφυρας.



Εικόνα 4.8: Το ΣμηΕΑ DJI Mavic Air 3

4.2.4 Φωτοσταθερά τύπου checkerboard

Σε μια τέτοια διαδικασία, τα φωτοσταθερά απαιτούνται για την ορθή συνένωση των νεφών, αλλά και τη σύνδεση του νέφους σημείων του φωτογραμμετρικού μοντέλου με αυτό του σαρωτή μετασχηματίζοντας το πρώτο στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του δεύτερου.

Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω εφαρμογή ήταν μοναδικά αριθμημένα, ώστε να είναι εύκολα αναγνωρίσιμα κατά τη διαδικασία της «σκόπευσής» για τις προαναφερόμενες διαδικασίες.

Είναι μεγάλα σε μέγεθος (διαστάσεις 25×25) και σχηματισμένα έτσι ώστε να μπορούν να «στοχευθούν» εύκολα επί του νέφους των σημείων, κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Τοποθετήθηκαν 20 στόχοι, ομοιόμορφα κατανομημένοι, σε όλη την κατασκευή, ώστε να πραγματοποιηθεί μία συνένωση (registration) μεταξύ των σαρώσεων του laser scanner μεγαλύτερης ακρίβειας, ενώ μέσω αυτών είναι εφικτή η απόδοση συντεταγμένων και γεωμετρίας, δηλαδή να γεωαναφερθεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του laser scanner το αραιό νέφος σημείων το οποίο θα έχει προκύψει έπειτα από τη συνταύτιση των εικόνων των δύο drone.



Εικόνα 4.9: Φωτοσταθερά τοποθετημένα επί της γέφυρας

4.3 Διαδικασία επίγειων μετρήσεων

Έπειτα από αυτοψία του χώρου, σχεδιάστηκε αρχικά η τοποθέτηση των φωτοσταθερών. Με γνώμονα την ορθή κατανομή τους, το βήμα σάρωσης (να είναι εντός εμβέλειας σάρωσης του σαρωτή) και τη χρήση τους ως σημεία σύνδεσης του αραιού νέφους σημείων (το οποίο θα προκύψει από τις φωτογραφίες με το πυκνό νέφος σημείων του σαρωτή), επιλέχτηκε να τοποθετηθούν στα ακρόβαθρα, στο οδόστρωμα και τις πλαϊνές νησίδες του δρόμου. Έτσι θα είναι ορατά και από τα uav αλλά και από τον σαρωτή με σκοπό την χρήση τους κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Στη συνέχεια έγινε η τοποθέτηση τους επί των τοιχίων και όπου αλλού είχε κριθεί απαραίτητο (π.χ. επί του δρόμου) ώστε να είναι εντός του πεδίου σάρωσης αλλά και ομοιόμορφα κατανομημένα.



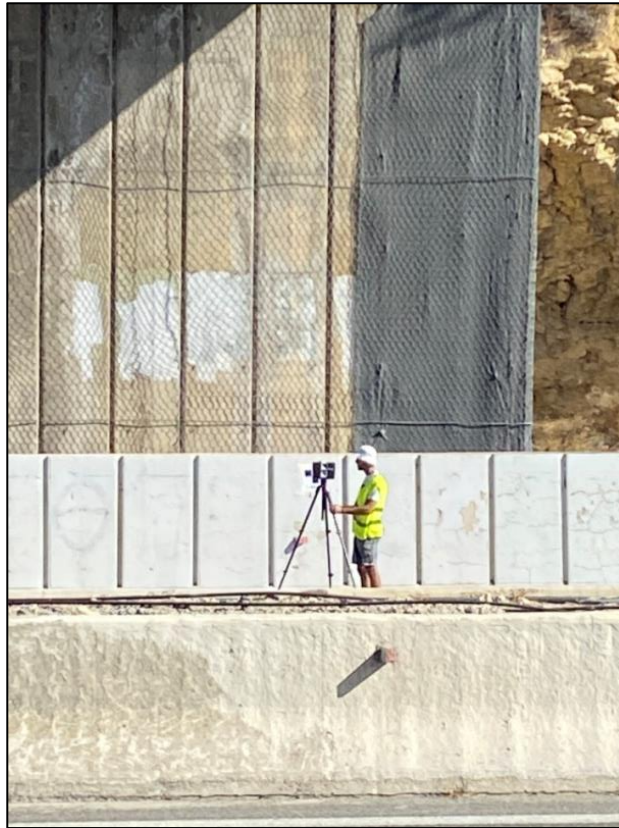
Εικόνα 4.10: Τοποθέτηση φωτοσταθερών

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η σάρωση με τον τρισδιάστατο επίγειο σαρωτή FARO Focus Premium. Τοποθετήθηκε επί του τρίποδα και αφού τέθηκε σε λειτουργία επιλέχθηκε το προφίλ σάρωσης. Το προφίλ διαμορφώθηκε έπειτα από συμπεράσματα που βγήκαν σχετικά με τη χρονική διάρκεια της σάρωσης και το επιθυμητό αποτέλεσμα όσον αφορά την πυκνότητα και την ποιότητα του τελικού νέφους των σημείων.

Κρίθηκε κατάλληλο λοιπόν ένα προφίλ με χαρακτηριστικά 1/4 ανάλυση και ποιότητα 3x. Αυτό αντιστοιχεί σε διάρκεια σάρωσης 3:55 λεπτά, μέγεθος σάρωσης 10240x4267 PT, 43,7 Mrpts και απόσταση μεταξύ των σημείων 6,1 mm/ 10 m. Με τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις λοιπόν θα επιτευχθεί ένα αρκετά πυκνό νέφος με καλή ποιότητα το οποίο ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εργασίας, με χρωματισμό και καλή ανάλυση σε μικρό χρόνο.

Με χρόνο σάρωσης σε κάθε στάση τα 3 λεπτά και 55 δευτερόλεπτα και τον αριθμό των συνολικών στάσεων να ανέρχεται στις 18, η συνολική σάρωση της γέφυρας διήρκησε περίπου μια ώρα.

Έπειτα ξεκίνησε η σάρωση της γέφυρας με 18 στάσεις όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στα άκρα της γέφυρας, καθώς δεν υπήρξε η δυνατότητα να διασχιστεί η εθνική οδός, εφόσον η λειτουργία της δεν διεκόπη (κάτι το οποίο έχει προαναφερθεί ως βασικότατο πλεονέκτημα της παρούσας διαδικασίας).



Εικόνα 4.11: Διαδικασία σάρωσης

Με δεδομένο λοιπόν πως ήταν διαθέσιμη μόνο η ΛΕΑ για την πραγματοποίηση των εργασιών, αλλά και την αρκετά μεγάλη εμβέλεια σάρωσης του σαρωτή (150μέτρα) οι στάσεις που τοποθετήθηκε ο σαρωτής περιορίστηκαν στις περιοχές γύρω από τα άκρα της γέφυρας.

Τέλος, λήφθηκε υπόψη η τοποθέτηση του σαρωτή σε κοντινή απόσταση σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος, όπου υπήρχε φυσικά η δυνατότητα (όπως για παράδειγμα στα ακρόβαθρα τα οποία εμφανίζουν αρκετές παθογένειες ώστε να παρέχεται καλύτερη πληροφορία).

4.4 Διαδικασία εναέριων μετρήσεων

Αφού ολοκληρώθηκαν οι επίγειες μετρήσεις με το σαρωτή, λήφθηκαν οι περιμετρικές λήψεις της γέφυρας με το drone DJI PHANTOM 4 RTK. Τέθηκε το drone σε χειροκίνητη πτήση και όχι σε κάποιο πλάνο πτήσης (flight plan) προκαθορισμένο από το λογισμικό του drone καθώς η απόσταση

λήψης των φωτογραφιών θα έπρεπε να είναι σε αρκετά κοντινή απόσταση για τη λήψη καλύτερης πληροφορίας.

Ήταν απαραίτητο να είναι ενεργοποιημένοι όλοι οι αισθητήρες εμποδίων που έχει διαθέσιμους το συγκεκριμένο μοντέλο καθώς πετούσε σε αρκετά χαμηλό ύψος με πολλά εμπόδια γύρω του. Οι λήψεις έγιναν με επικάλυψη 80/80 (οριζόντια/κατακόρυφα) καθώς η σωστή επικάλυψη είναι η πιο βασική προϋπόθεση ώστε να γίνει επιτυχώς αργότερα η συντάχτιση των εικόνων.

Μια βασική παράμετρος, η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και φάνηκε να δυσχεραίνει κατά πολύ το έργο σε αντίστοιχες εφαρμογές, είναι ο άνεμος. Τη συγκεκριμένη ημέρα οι άνεμοι έπνεαν με μεγάλες ταχύτητες, με ριπές οι οποίες έφταναν (ή ακόμη και ξεπερνούσαν) τα 7 μποφόρ.

Τόσο δυνατοί άνεμοι σε συνδυασμό με το μικρό βάρος του drone αλλά και τη δύσκολη πτήση (κινούμενα οχήματα και φορτηγά σε μεγάλες ταχύτητες λόγω της συνεχούς κυκλοφορίας) δυσκόλεψαν σε μεγάλο βαθμό το πέρας των εργασιών. Λήψεις πραγματοποιήθηκαν σε κοντινή απόσταση αλλά και σε μακρινή ώστε να εξασφαλιστεί το μέγιστο δυνατό αποτέλεσμα.



Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία της πτήσης περιμετρικά της γέφυρας

Μετά το πέρας των εργασιών των περιμετρικών λήψεων σειρά είχε το κάτω μέρος της γέφυρας αλλά και του εσωτερικού μέρους των ακρόβαθρων της γέφυρας με το drone DJI AIR 3. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή των περιμετρικών λήψεων με μόνη διαφορά ότι δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν αρκετά μακρινές λήψεις λόγω των κινούμενων οχημάτων.



Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία της πτήσης στα ακρόβαθρα

4.5 Μετρήσεις με ρωγμόμετρο

Στο τελικό στάδιο των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δειγματοληπτικές μετρήσεις σε κάποιες ρωγμές με ρωγμόμετρο τύπου κάρτας ώστε να υπάρξει ένα είδος αναφοράς κατά τη διαδικασία διαστασιολόγησης των ρωγμών στο γραφείο. Αυτό έγινε διότι υπάρχει ένα εύρος σφάλματος κατά την διαστασιολόγηση, της τάξεως των 0,2-0,3mm. Αυτό συμβαίνει διότι η διαδικασία γίνεται οπτικά με την τελική ακρίβεια της εικονοψηφίδας της ορθοφωτογραφίας που θα προκύψει να είναι της τάξεως των 0,8mm-1.0mm στην συγκεκριμένη περίπτωση. Με τις επίγειες μετρήσεις επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της τελικής διαστασιολόγησης αλλά και ενός είδους συνόρθωσης των τελικών αποτελεσμάτων της ψηφιοποίησης με αυτά των επίγειων οπτικών μετρήσεων με τη χρήση του ρωγμόμετρου. Έπειτα επαληθεύθηκε πως είχαν πραγματοποιηθεί όλες οι μετρήσεις και τα δεδομένα ήταν ορθά.

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών έφτασε περίπου τις πέντε ώρες, με βασικό ωστόσο παράγοντα καθυστέρησης και δυσκολίας από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

4.6 Επεξεργασία Μετρήσεων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων αρχικά συλλέχθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα από τον σαρωτή, εισήχθησαν στο λογισμικό επεξεργασίας (στην συγκεκριμένη περίπτωση το Faro Scene). Έπειτα ακολούθησε η συνένωση των νεφών, η δημιουργία του τελικού πυκνού νέφους σημείων και ο καθαρισμός θορύβου από το τελικό πυκνό νέφος σημείων του σαρωτή με το Autodesk RECAP.

4.6.1 Πρωτογενή δεδομένα

Από τις μετρήσεις του τρισδιάστατου σαρωτή προέκυψαν 18 αρχεία (όσες και οι στάσεις) τύπου .fls., ο οποίος είναι ο τύπος αρχείων που δημιουργούν οι σαρωτές της FARO και μπορεί να επεξεργασθεί από το λογισμικό της συγκεκριμένης εταιρίας (το FARO SCENE), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των συγκεκριμένων μετρήσεων αλλά και από άλλα ελεύθερα λογισμικά.

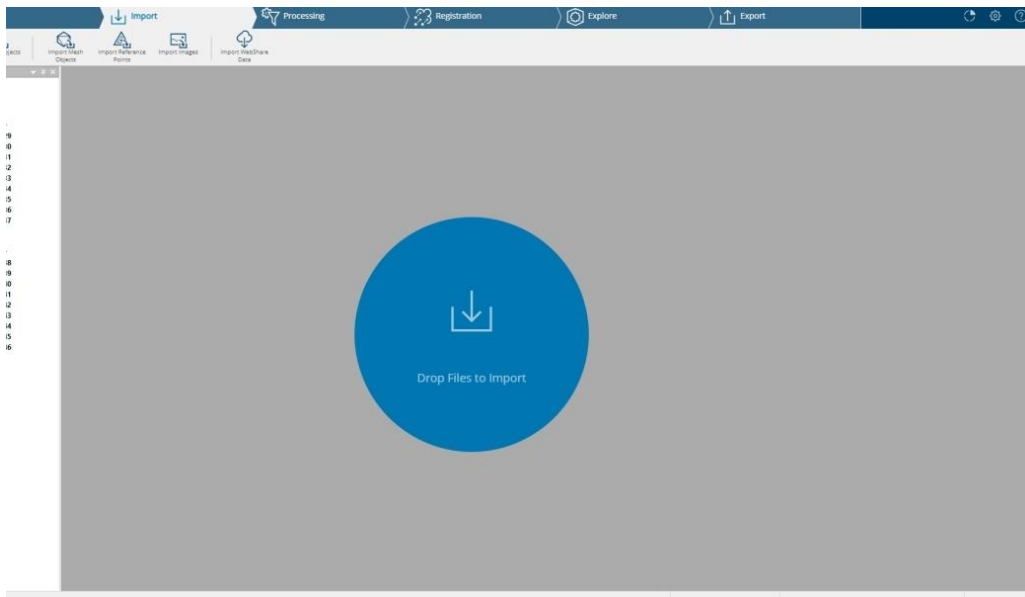


FARO_Scan_029.fls	29/6/2024 8:19 μμ	μμ	Laser Scan	249 036 KI
FARO_Scan_030.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	247 404 KI
FARO_Scan_031.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	234 776 KI
FARO_Scan_032.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	236 404 KI
FARO_Scan_033.fls	29/6/2024 8:19 μμ	μμ	Laser Scan	241 364 KI
FARO_Scan_034.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	246 912 KI
FARO_Scan_035.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	247 528 KI
FARO_Scan_036.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	248 732 KI
FARO_Scan_037.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	239 668 KI
FARO_Scan_038.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	223 772 KI
FARO_Scan_039.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	240 484 KI
FARO_Scan_040.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	242 772 KI
FARO_Scan_041.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	245 352 KI
FARO_Scan_042.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	244 468 KI
FARO_Scan_043.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	233 584 KI
FARO_Scan_044.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	218 848 KI
FARO_Scan_045.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	234 240 KI
FARO_Scan_046.fls	29/6/2024 8:18 μμ	μμ	Laser Scan	235 416 KI

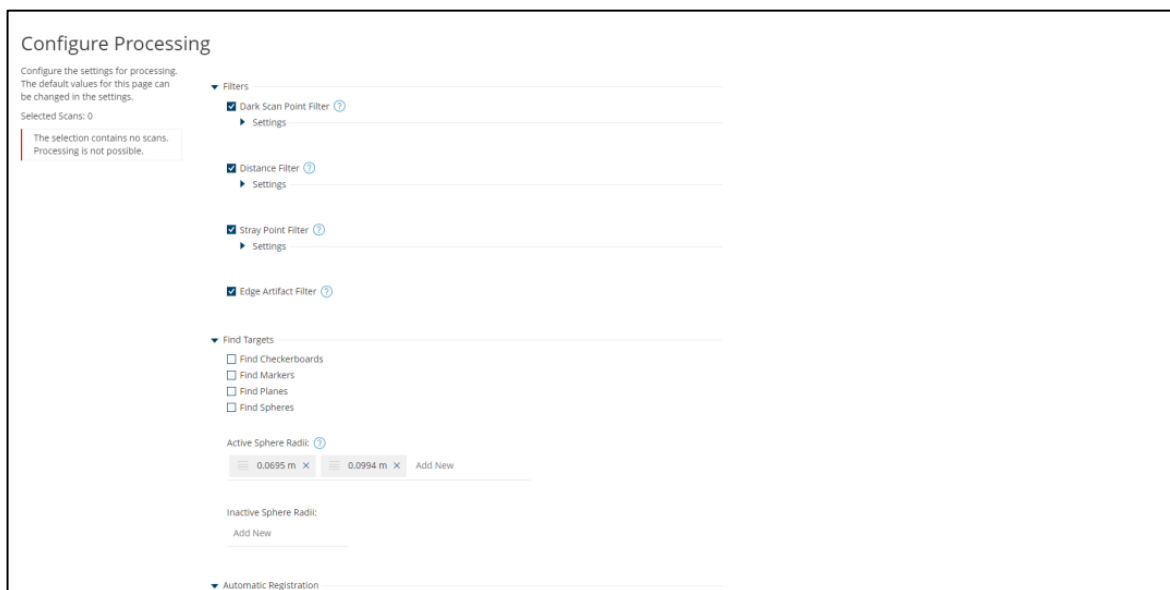
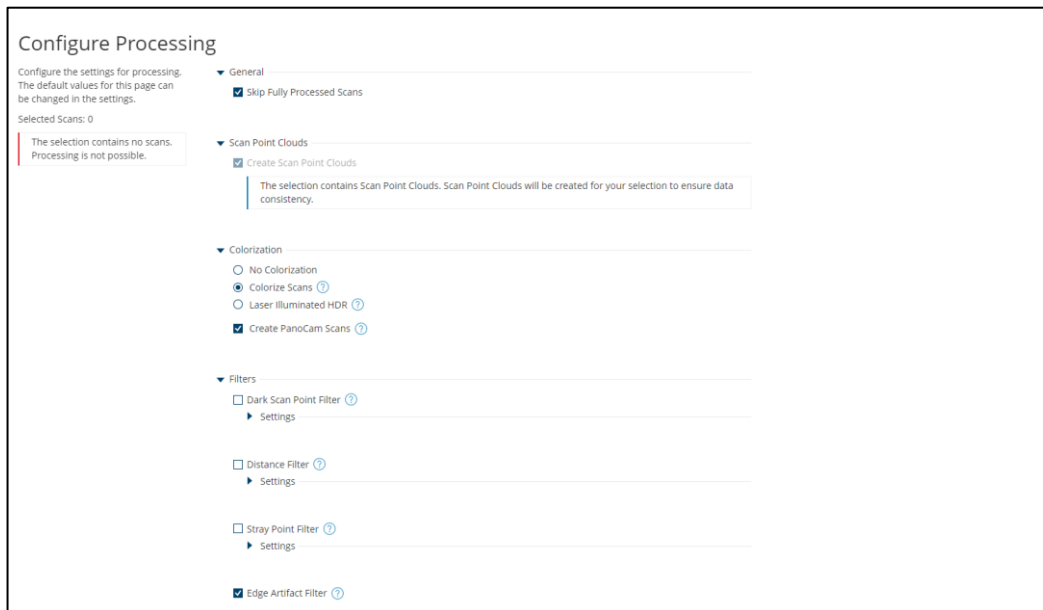
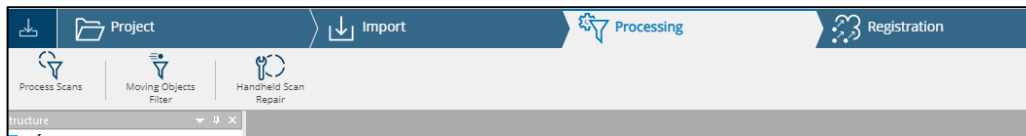
Εικόνα 4.14: Scans σε μορφή .fls

Το λογισμικό Scene έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία και διαχείριση σαρωμένων δεδομένων, με δυνατότητες αυτόματης αναγνώρισης αντικειμένων καθώς και συνένωση και γεωαναφορά σαρώσεων. Διαθέτει φιλικό περιβάλλον προς τον χρήστη με πολλές επιλογές και δυνατότητες, από διεξαγωγή μετρήσεων μέχρι την τρισδιάστατη απεικόνιση των συνενωμένων νεφών σημείων και εξαγωγή αυτών σε διάφορες μορφές και τύπους αρχείων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για απευθείας αποθήκευση ή δημοσίευση στο διαδίκτυο (web server). Η πιο πρόσφατη έκδοση του λογισμικού είναι η 5.4. Αναλυτικότερα, ανάμεσα στα κυριότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι η συνένωση των σαρώσεων, η οποία πραγματοποιείται με δύο μεθόδους. Το λογισμικό χωρίς τη χρήση και ύπαρξη τεχνητών στόχων όπως σφαίρες και σκακιέρες μπορεί και προχωρά στη συνένωση των νεφών. Η πρώτη μέθοδος συνένωσης ονομάζεται από την εταιρεία ως “Top View Based”, η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη, επιτρέπει τη γεωαναφορά των σαρώσεων σε εσωτερικούς ή πυκνοδομημένους χώρους, όπου δεν ενδείκνυται η χρήση GPS. Η δεύτερη μέθοδος συνένωσης, η οποία ονομάζεται από την εταιρεία ως “Cloud to Cloud”, δίνει νέες ευκαιρίες στους χρήστες σε ταχύτητα και αξιοπιστία κάτω από δύσκολες συνθήκες. Ενδείκνυται για εξωτερικούς χώρους όπου η χρήση δεκτών GPS, πυξίδας ή και αλτίμετρου είναι δυνατή. (Βέργος, 2015)

Μέσω της εφαρμογής FARO SCENE μεταφέρθηκαν τα δεδομένα από τον σαρωτή στον υπολογιστή. Αφού εισήχθησαν οι σαρώσεις στο λογισμικό, επόμενο βήμα ήταν η λεγόμενη επεξεργασία τους. Εκεί το λογισμικό εντάσσει την κάθε σάρωση σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων, υπολογίζει τα διανύσματα normals, χρωματίζει το νέφος (εάν επιλεγεί, καθώς υπάρχει η δυνατότητα ολοκλήρωσης της διαδικασίας με το νέφος να παραμένει ασπρόμαυρο) και εφαρμόζει διάφορα φίλτρα τα οποία μπορεί να επιλεγούν.



Εικόνα 4.15: Εισαγωγή των σαρώσεων στο λογισμικό Faro Scene



Εικόνα 4.16: Διαδικασία επεξεργασίας σαρώσεων (Process)

4.6.2 Συνένωση νεφών

Όταν το αντικείμενο που πρέπει να σαρωθεί είναι μεγάλο, η σάρωση πρέπει να πραγματοποιείται από διάφορα σημεία, καθώς για να ολοκληρωθεί η ανακατασκευή του, δεν είναι εφικτή η πλήρης σάρωσή του από ένα μόνο σημείο. Έτσι, από κάθε διαφορετική θέση δημιουργείται και από ένα διαφορετικό νέφος σημείων, το καθένα από τα οποία έχει το δικό του σύστημα αναφοράς. Ωστόσο, για να αναπαρασταθεί με ακρίβεια το αντικείμενο, όλα τα ξεχωριστά νέφη θα πρέπει να ενοποιηθούν

και να μετατραπούν σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «Registration» ή συνένωση.

Μετά το πέρας της διαδικασίας των σαρώσεων, ακολούθησε η ενοποίησή της, έτσι ώστε να παραχθεί ένα ενιαίο πυκνό νέφος σημείων όπου ανήκει σε κοινό σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή της συνένωσης γίνεται αυτόματα πιο εύκολη, από τη στιγμή που το λογισμικό χωρίζει τις σαρώσεις με βάση την ώρα σάρωσης. Έτσι, δεν είναι απαραίτητη και η δημιουργία κάποιου σκαριφήματος ή διαγράμματος της πορείας που ακολουθήθηκε (Βέργος, 2015).

Επιλέγοντας τις αντίστοιχες σαρώσεις το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να προχωρήσει σε συνένωση με τρεις τρόπους:

1. **Αυτόματη συνένωση (Automatic Registration):** Χρησιμοποιείται μόνον εφόσον έχει γίνει προηγουμένως συνένωση στο πεδίο (on site pre register)
2. **Οπτική Συνένωση (Visual Registration):** Με το συγκεκριμένο τρόπο γίνεται η τοποθέτηση της μιας σάρωσης πάνω στην άλλη με αποκλίσεις κάποιων εκατοστών και το λογισμικό εντοπίζει μόνο του τα ομόλογα σημεία και προχωρά στην συνένωσή τους
3. **Χειροκίνητη συνένωση (Manual Registration):** Εκεί επιλέγονται χειροκίνητα τα ομόλογα σημεία τα οποία χρειάζεται να είναι το λιγότερο τρία και ορθά καταναμημένα, ενώ στην περίπτωση του συγκεκριμένου λογισμικού μπορούν να επιλεγούν και κοινά επίπεδα (planes) αλλά και φωτοσταθερά τύπου Checkerboard τα οποία βοηθούν πολύ το λογισμικό να φέρει σε σωστή θέση τις σαρώσεις και να καταλήξει σε μια ορθή και πολύ ακριβή συνένωσή τους.



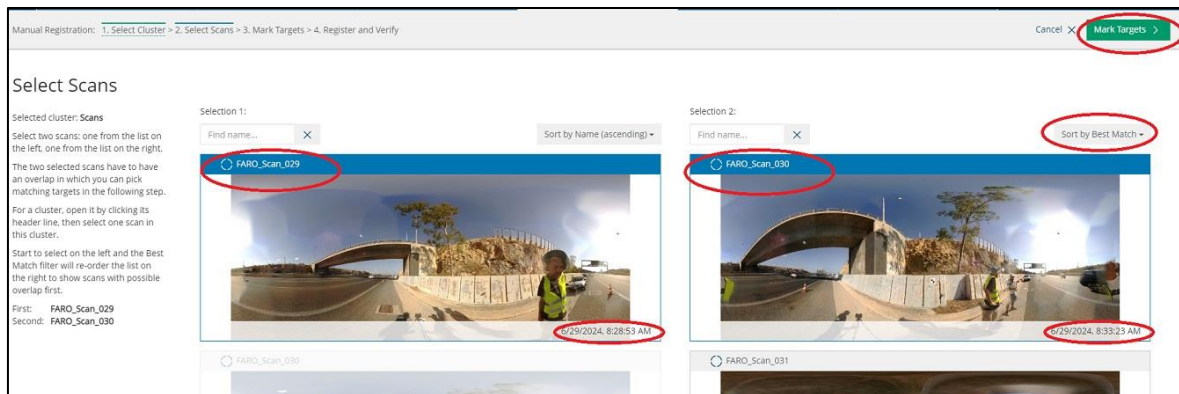
Εικόνα 4.17: Στιγμιότυπο επιλογής τρόπου συνένωσης νεφών σε περιβάλλον Faro Scene

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η χειροκίνητη συνένωση ως πιο σίγουρη και ακριβής. Η χειροκίνητη συνένωση γίνεται με δύο τρόπους:

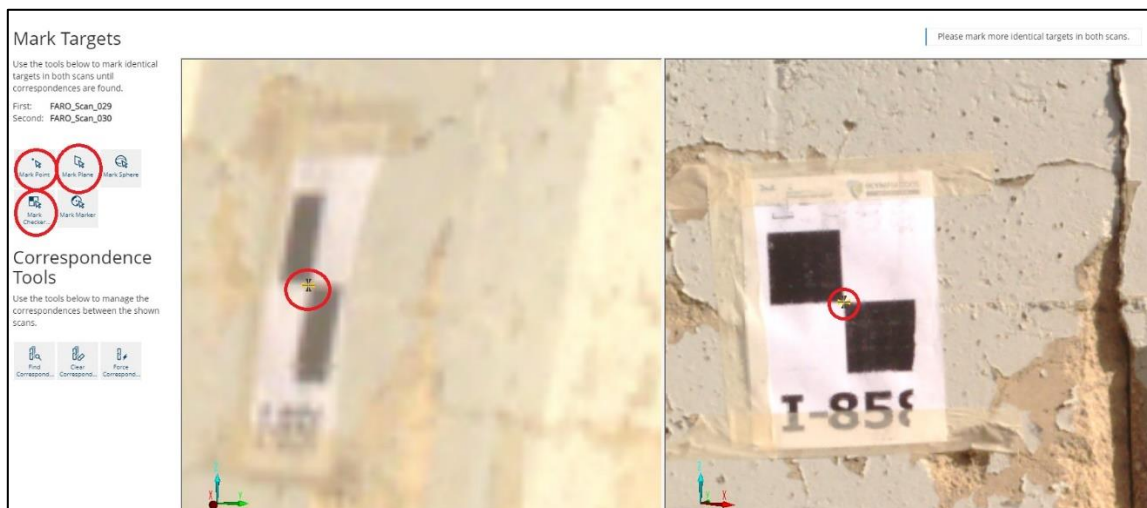
- ✓ Συνένωση με βάση γνωστά σημεία (Target based registration): Με τη συγκεκριμένη μέθοδο εντοπίζοντας φωτοσταθερά σημεία, τα οποία έχουν προηγουμένως τοποθετηθεί στο πεδίο και μετρηθεί είτε με κάποιο γεωδαιτικό σταθμό είτε με κάποιον δέκτη GNSS στις σαρώσεις, το λογισμικό προχωρά στην συνένωση των σαρώσεων και τον ταυτόχρονο μετασχηματισμό τους

στο εισαγόμενο από τον χειριστή σύστημα αναφοράς. Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου και εφόσον έχει επιλεγεί να γίνει «αυτοεντοπισμός» φωτοσταθερών τύπου checkerboard είτε άλλων φωτοσταθερών της FARO τότε εφόσον το λογισμικό έχει εντοπίσει τα συγκεκριμένα φωτοσταθερά σε όλες τις εικόνες προχωρά στην αυτόματη συνένωση των νεφών με βάση τα δικά του ευρήματα στο δικό του ωστόσο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

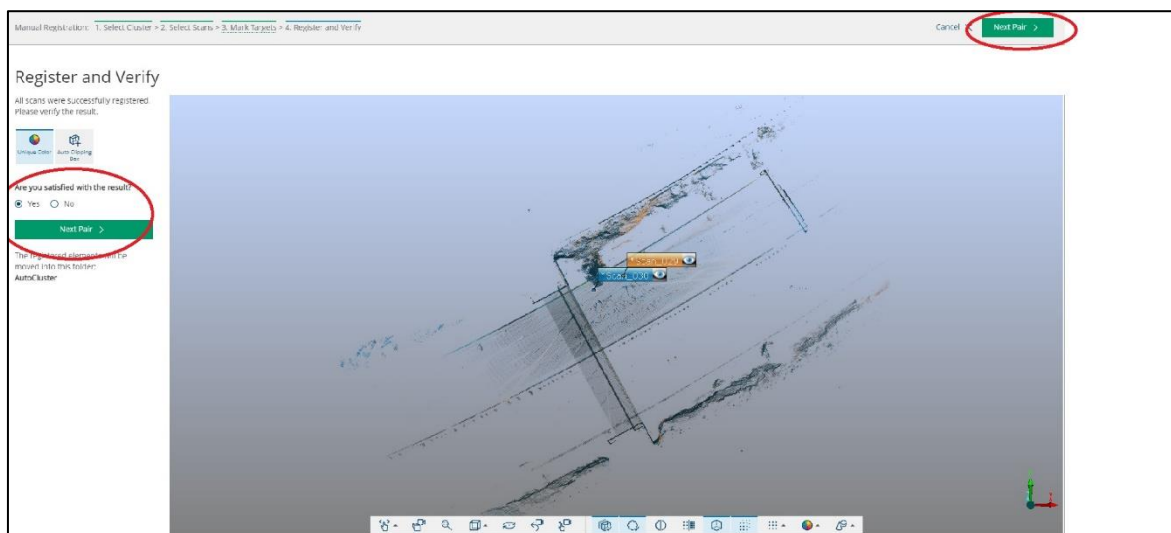
- ✓ Συνένωση με βάση τα νέφη (Cloud to Cloud registration): Με τη συγκεκριμένη μέθοδο η συνένωση γίνεται επιλέγοντας «κοινά» ή αλλιώς ομόλογα σημεία επί των σαρώσεων σε περιβάλλον ωστόσο φωτογραφίας στο συγκεκριμένο λογισμικό. Επίσης, μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε επίπεδα (planes). Έτσι τα νέφη έρχονται σχετικά κοντά με ακρίβεια κάποιων εκατοστών και έπειτα ο αλγόριθμος ICP του λογισμικού αναλαμβάνει να «ταιριάξει» τα νέφη σε ένα αυθαίρετο κοινό σύστημα αναφοράς με ακρίβεια χιλιοστών.



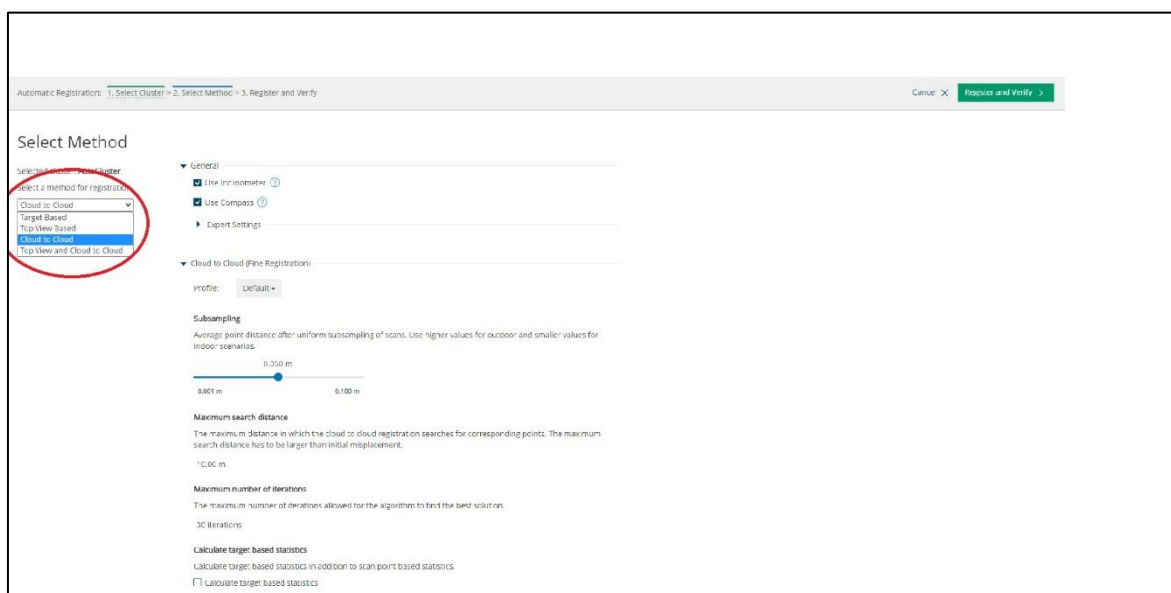
Εικόνα 4.18: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE



Εικόνα 4.19: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE



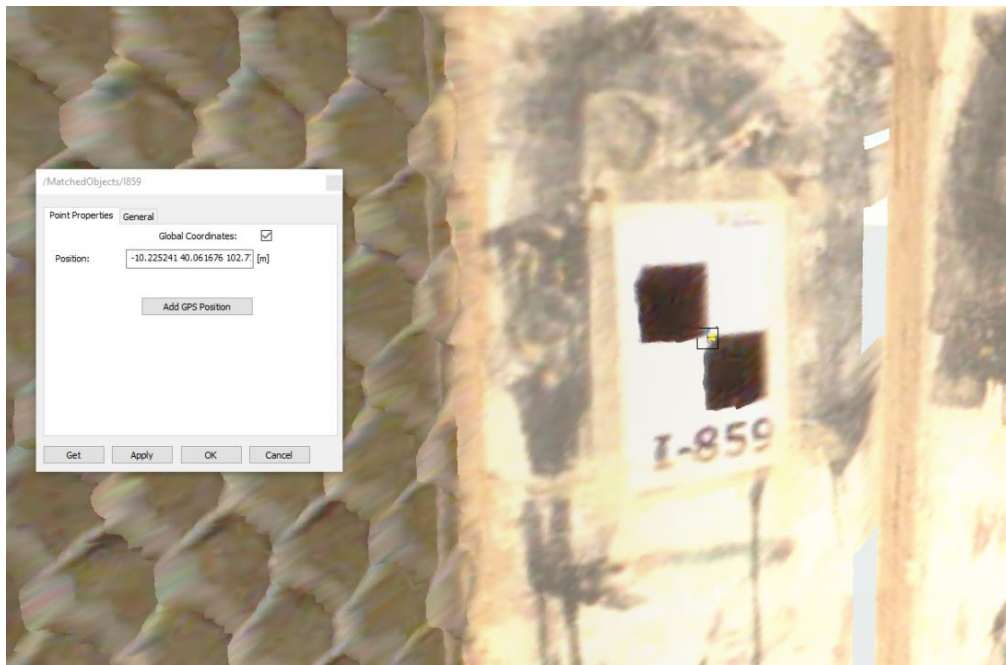
Εικόνα 4.20: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE



Εικόνα 4.21: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FARO SCENE



Εικόνα 4.22: Περιβάλλον διαδικασίας manual registration στο FAROSCENE



Εικόνα 4.23: Συντεταγμένες φωτοσταθερού σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος cloud to cloud registration. Το μοντέλο επιλύθηκε με ακρίβειες μέγιστου και μέσου σφάλματος τις τάξεις των 7,2 και 4,7 χιλιοστών αντίστοιχα. Ακολουθούν οι πίνακες με τις ακρίβειες σύνδεσης των νεφών, αυτές εξήχθησαν από το λογισμικό:

Overview

Scan Point Statistics

Maximum Point Error	7.2 mm
Mean Point Error	4.7 mm
Minimum Overlap	76.3 %

Inclinometer Mismatches

Cluster/Scan	Scan	Mismatch [deg]
AutoCluster	FARO_Scan_035	0.0175
AutoCluster	FARO_Scan_036	0.0193
AutoCluster1	FARO_Scan_038	0.0686
AutoCluster1	FARO_Scan_041	0.0087
AutoCluster1	FARO_Scan_040	0.0603
AutoCluster	FARO_Scan_033	0.0053
AutoCluster	FARO_Scan_032	0.0126
AutoCluster	FARO_Scan_029	0.0215
AutoCluster1	FARO_Scan_045	0.0191
AutoCluster	FARO_Scan_034	0.0119
AutoCluster	FARO_Scan_037	0.0316
AutoCluster	FARO_Scan_030	0.0144
AutoCluster1	FARO_Scan_039	0.0177
AutoCluster1	FARO_Scan_042	0.0142
AutoCluster1	FARO_Scan_046	0.0123
AutoCluster1	FARO_Scan_044	0.0270
AutoCluster1	FARO_Scan_043	0.0652
AutoCluster	FARO_Scan_031	0.0280

Detailed Errors

Scan Point Statistics

Cluster/Scan 1	Cluster/Scan 2	Point Error [mm]	Overlap
AutoCluster/FARO_Scan_037	AutoCluster1/FARO_Scan_046	4.2	91.6 %
AutoCluster/FARO_Scan_037	AutoCluster1/FARO_Scan_045	3.0	93.6 %
AutoCluster/FARO_Scan_036	AutoCluster1/FARO_Scan_045	4.4	89.2 %
AutoCluster/FARO_Scan_035	AutoCluster1/FARO_Scan_046	5.1	76.3 %
AutoCluster/FARO_Scan_036	AutoCluster1/FARO_Scan_046	4.8	88.5 %
AutoCluster/FARO_Scan_036	AutoCluster1/FARO_Scan_044	7.2	78.2 %
AutoCluster/FARO_Scan_037	AutoCluster1/FARO_Scan_044	4.2	85.0 %

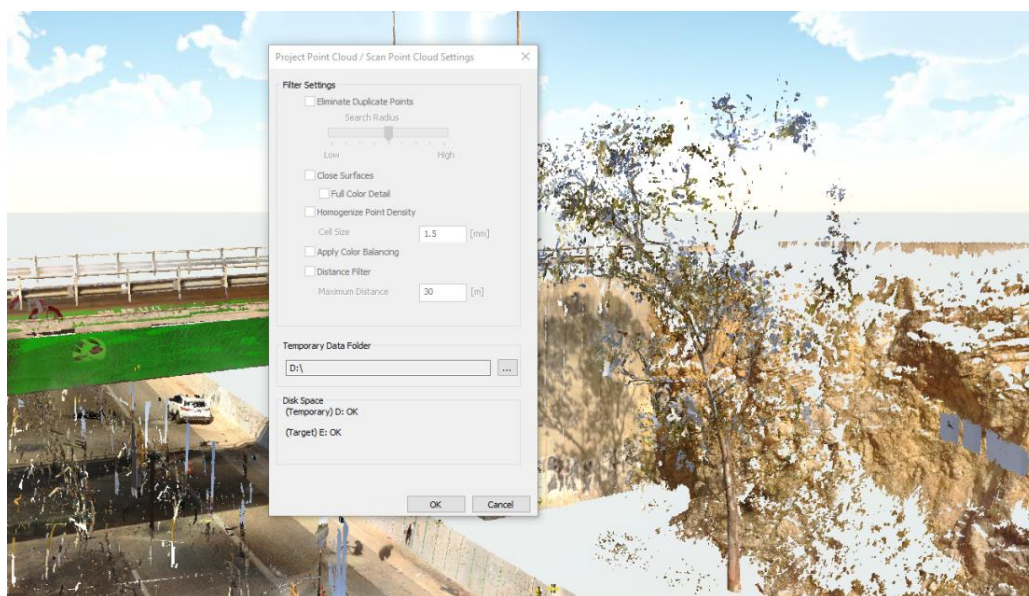
Scan Errors

Scan Point Statistics

Cluster/Scan	Connections	Max. Point Error [mm]	Mean Point Error [mm]	Min. Overlap
AutoCluster1	1	7.2	4.7	76.3 %
AutoCluster	1	7.2	4.7	76.3 %

Εικόνα 4.24: Registration Report συνένωσης νεφών στο λογισμικό Faro Scene

Υστερα, αφού ενώθηκε το μοντέλο, δημιουργήθηκε το point cloud όπου εκεί το λογισμικό έφτιαξε ένα ενιαίο point cloud γεμίζοντας τα κενά, πραγματοποίησε «ομογενοποίηση» της πυκνότητας των σημείων, εξισορρόπησε τα χρώματα, έσβησε τα διπλά σημεία και τέλος διέγραψε περιττή πληροφορία σύμφωνα με μια προκαθορισμένη ακτίνα, την οποία καθορίζει ο χρήστης. Για τη δημιουργία του συγκεκριμένου νέφους σημείων επιλέχθηκε μία ακτίνα 30 μέτρων, η οποία είναι και η προκαθορισμένη από το λογισμικό.



Εικόνα 4.25: Δημιουργία τελικού πυκνού νέφους σημείων

Μετά το πέρας της διαδικασίας προκύπτει το ολοκληρωμένο νέφος σημείων. Σε αυτό παρατηρείται πως υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό θορύβου. Ως θόρυβο ορίζουμε τα σημεία που προκύπτουν από διάφορα κινητά αντικείμενα τα οποία δεν αποτελούν μέρος του αντικειμένου σάρωσης. Στην παρούσα περίπτωση τέτοια αντικείμενα είναι τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά τα οποία κινούνταν επί της εθνικής οδού. Το λογισμικό SCENE έχει τη δυνατότητα διαγραφής θορύβου αυτόματα μέσω της επιλογής του Moving Objects Filter. Το συγκεκριμένο φίλτρο συγκρίνει έναν προκαθορισμένο αριθμό σαρώσεων μεταξύ τους, εντοπίζει αντικείμενα τα οποία δεν βρίσκονταν σε όλες τις σαρώσεις και τα διαγράφει. Ωστόσο υπάρχει και η δυνατότητα της χειροκίνητης αφαίρεσης του θορύβου από το χρήστη. Επιλέχθηκε η χειροκίνητη μέθοδος καθώς κρίθηκε ως πιο αποτελεσματική και πιο σύντομη. Για να γίνει αυτό το τελικό πυκνό νέφος σημείων εξήχθη σε E57 ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο τύπο αρχείου από όλα τα λογισμικά επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων.



Εικόνα 4.26: Τελικό πυκνό νέφος σημείων

4.6.3 Καθαρισμός Νέφους και επεξεργασία τελικού νέφους σημείων από σαρωτή

Για την περαιτέρω επεξεργασία και τη διαγραφή του θορύβου επιλέχθηκε να εισαχθεί το πυκνό νέφος σημείων στο Autodesk Recap.

Το Autodesk Recap (ή Reality Capture) είναι λογισμικό της Autodesk που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και την επεξεργασία τρισδιάστατων μοντέλων από πραγματικά δεδομένα που συλλέγονται στο φυσικό κόσμο. Το Recap έχει σχεδιαστεί ειδικά για επαγγελματίες που ασχολούνται με την αρχιτεκτονική, τη μηχανική, τις κατασκευές και άλλους κλάδους όπου είναι απαραίτητο να ενσωματώνονται δεδομένα 3D σάρωσης και φωτογραμμετρίας σε ψηφιακά μοντέλα.

Κύριες λειτουργίες του λογισμικού είναι (Autodesk.com, 2024):

1. Δημιουργία Νέφους Σημείων (Point Clouds):

- Το Recap μπορεί να επεξεργαστεί δεδομένα σάρωσης laser και να δημιουργήσει σύννεφα σημείων (point clouds), που αποτελούν πολύ ακριβείς ψηφιακές αναπαραστάσεις αντικειμένων ή χώρων.

2. Φωτογραμμετρία:

- Εκτός από τα δεδομένα laser scanning, το Recap μπορεί να εισάγει φωτογραφίες και να δημιουργήσει τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιώντας τεχνικές φωτογραμμετρίας.

3. Επεξεργασία και Καθαρισμός Δεδομένων:

- Επιτρέπει την επεξεργασία του σύννεφου σημείων (όπως φιλτράρισμα, καθαρισμός θορύβου και αποκοπή τμημάτων) για τη βελτιστοποίηση των δεδομένων και τη διευκόλυνση της χρήσης τους σε άλλα εργαλεία.

4. Συνεργασία με Άλλα Λογισμικά Autodesk:

- ο Το Recap είναι σχεδιασμένο να ενσωματώνεται ομαλά με άλλα εργαλεία της Autodesk, όπως το **AutoCAD**, το **Revit** και το **Civil 3D**, επιτρέποντας την εύκολη μεταφορά των δεδομένων που δημιουργούνται.

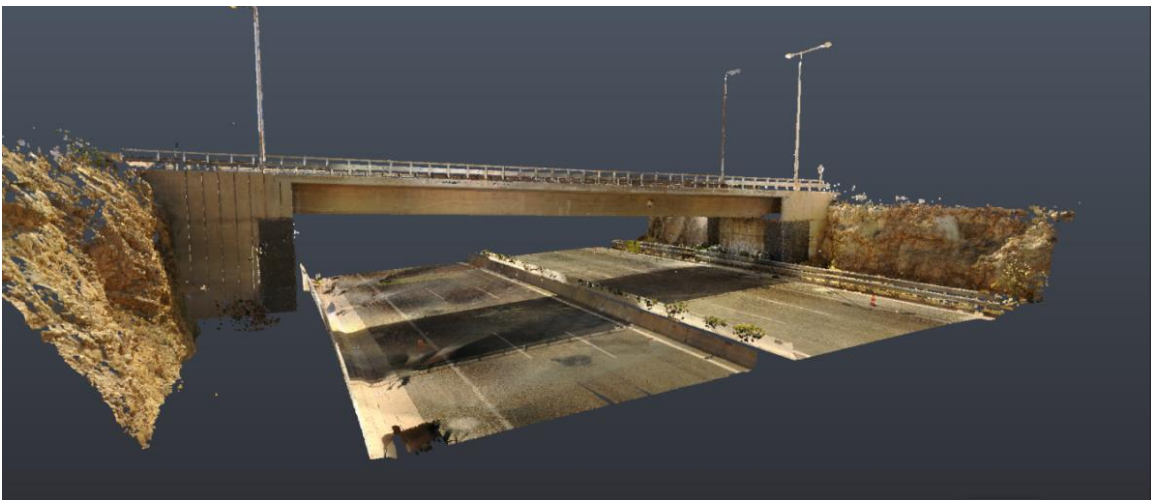
5. Μετρήσεις και Επισημάνσεις:

- ο Οι χρήστες μπορούν να πάρουν ακριβείς μετρήσεις, να δημιουργούν σημειώσεις και να προσθέτουν επισημάνσεις στα δεδομένα σάρωσης.

Με την εισαγωγή του πυκνού νέφους σημείων στο συγκεκριμένο λογισμικό πραγματοποιείται αυτόματα η μετατροπή του σε αρχείο .recp, το οποίο είναι τύπος αρχείου που αναγνωρίζεται από το συγκεκριμένο λογισμικό αλλά και από όλη την σουίτα λογισμικών της εταιρείας Autodesk. Το περιβάλλον του Autodesk Recap είναι πολύ φιλικό προς το χρήστη, το νέφος «κινείται» πολύ γρήγορα και με μεγάλη ευκολία με αποτέλεσμα να είναι αρκετά πιο εύκολη η διαδικασία «καθαρισμού» του νέφους από τον θόρυβο.

4.7 Τελικό τρισδιάστατο νέφος σημείων από σαρωτή

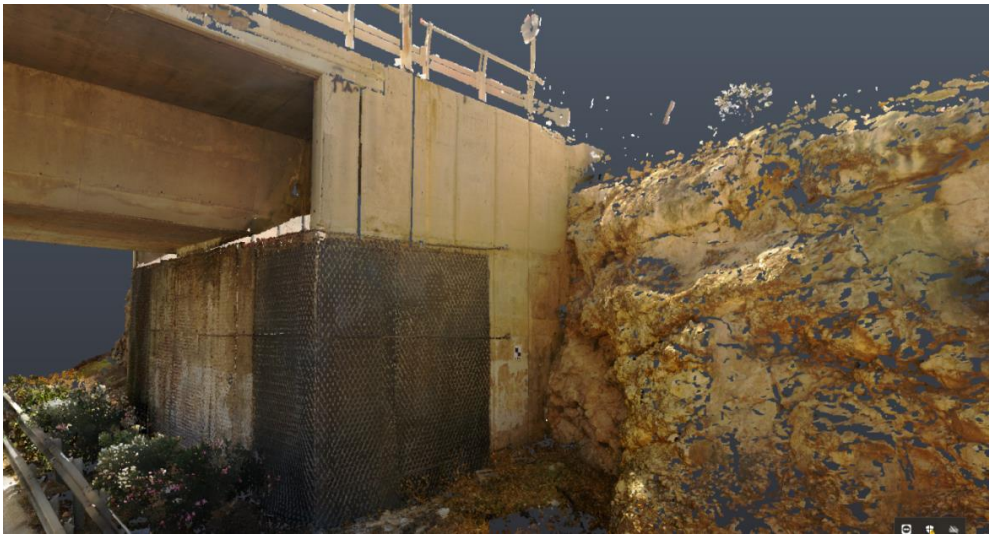
Μετά το πέρας των παραπάνω διαδικασιών προκύπτει το τελικό επεξεργασμένο νέφος σημείων από τον επίγειο σαρωτή λέιζερ. Ακολουθούν εικόνες από το τελικό τρισδιάστατο νέφος σημείων της γέφυρας:



Εικόνα 4.27: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.28: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.29: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



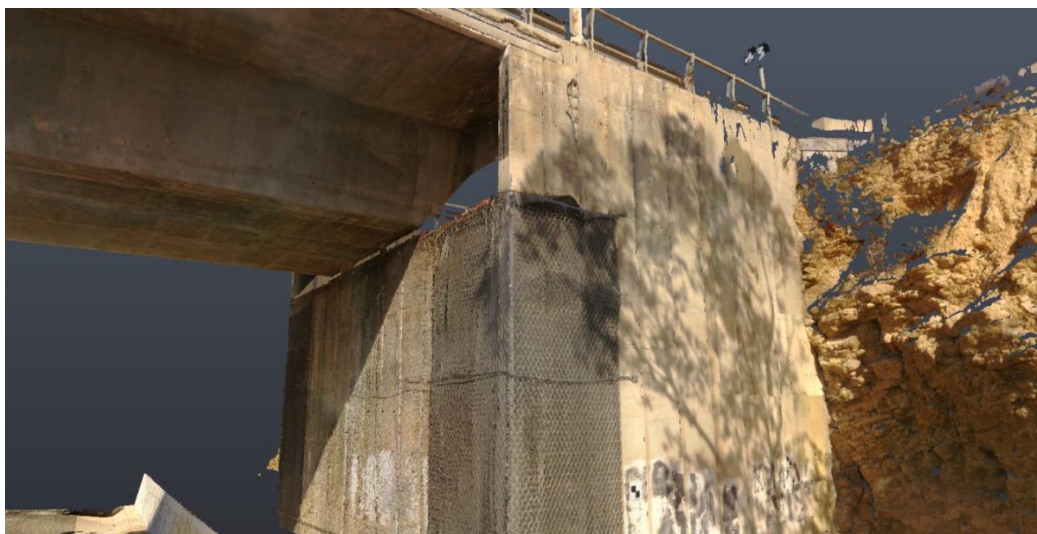
Εικόνα 4.30: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.31: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.32: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.33: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.34: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.35: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap



Εικόνα 4.36: Στιγμιότυπο τελικού νέφους 3d σαρωτή έπειτα από τον τελικό καθαρισμό σε περιβάλλον Autodesk Recap

4.8 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου μέσω φωτογραμμετρίας

Μέσω των λήψεων που έγιναν από τα ΣμηΕΑ που προαναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο θα δημιουργηθεί ένα αραιό νέφος σημείων μέσω της φωτογραμμετρίας. Έπειτα, θα γεωαναφερθεί το αραιό νέφος σημείων που θα έχει προκύψει στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του επίγειου σαρωτή. Θα ακολουθήσει η δημιουργία του τριγωνισμένου μοντέλου (Mesh) επί του πυκνού νέφους σημείων του επίγειου σαρωτή και εν συνεχεία θα δοθεί φωτοϋφή από τις λήψεις που πραγματοποιήθηκαν από τα ΣμηΕΑ στο νέο τριγωνισμένο μοντέλο που θα έχει προκύψει. Τέλος, θα παραχθούν ορθομωσαϊκά των όψεων της γέφυρας τα οποία θα ψηφιοποιηθούν ώστε να δημιουργηθούν As-Built σχέδια με αποτυπωμένες τις ρωγμές και τις παθογένειες του σκυροδέματος. Για να προκύψουν τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Agisoft Metashape.

Agisoft Photoscan

Το **Agisoft PhotoScan**, που πλέον είναι γνωστό ως **Agisoft Metashape**, είναι ένα ισχυρό λογισμικό φωτογραμμετρίας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από εικόνες. Το λογισμικό αυτό είναι ευρέως διαδεδομένο σε τομείς όπως η τοπογραφία, η γεωγραφική ανάλυση, η αρχαιολογία, η πολιτιστική κληρονομιά, η αρχιτεκτονική, και οι εφαρμογές που απαιτούν ακριβείς τρισδιάστατες αναπαραστάσεις από φωτογραφίες.

Το **Agisoft Metashape** είναι ιδιαίτερα δημοφιλές λόγω της ευκολίας χρήσης του και της ευρείας γκάμας εφαρμογών που προσφέρει, ενώ η ισχυρή του αλγοριθμική βάση επιτρέπει την παραγωγή μοντέλων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης από δεδομένα εικόνας. (Agisoft.com, 2024)

Βασικά Χαρακτηριστικά και Δυνατότητες:

1. Φωτογραμμετρική Επεξεργασία Εικόνων:

- Το Agisoft PhotoScan/Metashape χρησιμοποιεί φωτογραφίες που λαμβάνονται από διάφορες γωνίες για να δημιουργήσει τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ανάλυσης, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η ταυτοποίηση σημείων και η δισδιάστατη-τρειςδιάστατη αντιστοίχιση.

2. Δημιουργία Σύννεφων Σημείων (Point Clouds):

- Το λογισμικό παράγει πυκνά σύννεφα σημείων από τις εισαγόμενες φωτογραφίες και τα επεξεργάζεται για τη δημιουργία μοντέλων με μεγάλη ακρίβεια.

3. Δημιουργία Τρισδιάστατων Μοντέλων (3D Mesh):

- Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες από τα σύννεφα σημείων, το PhotoScan/Metashape μπορεί να δημιουργήσει 3D mesh, δηλαδή μοντέλα με επιφάνειες που βασίζονται στα δεδομένα εικόνας.

4. Δημιουργία Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου (DEM):

- Παράγει ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Digital Elevation Models), τα οποία είναι χρήσιμα για γεωγραφικές και τοπογραφικές εφαρμογές.
5. **Κείμενο-Χρωματισμένα Μοντέλα:**
- Μπορεί να εφαρμόσει υφή και χρωματική πληροφορία στο τρισδιάστατο μοντέλο για την ακριβέστερη οπτική αναπαράσταση του αντικειμένου.
6. **Ορθοφωτογραφίες:**
- Δημιουργεί γεωαναφερμένες ορθοφωτογραφίες από τις εικόνες που έχουν ληφθεί, οι οποίες είναι χρήσιμες για εφαρμογές χαρτογράφησης.
7. **Υποστήριξη Μεγάλων Δεδομένων:**
- Το λογισμικό μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλες συλλογές εικόνων και να χειριστεί δεδομένα υψηλής ανάλυσης, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για μεγάλες φωτογραμμετρικές αποστολές και έρευνες.
8. **Ενσωμάτωση Γεωγραφικών Δεδομένων (GIS):**
- Το Metashape υποστηρίζει την εισαγωγή γεωγραφικών συντεταγμένων και μπορεί να εξάγει δεδομένα σε διάφορες μορφές, για χρήση σε GIS εφαρμογές.

Χρήσεις:

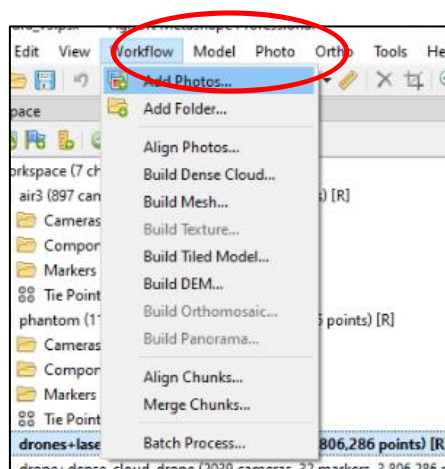
- **Τοπογραφία και Χαρτογράφηση:** Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων τοπογραφίας και χάρτες με ακριβή γεωμετρικά δεδομένα.
- **Αρχαιολογία και Πολιτιστική Κληρονομιά:** Αποτύπωση και ψηφιοποίηση αρχαιολογικών αντικειμένων και μνημείων.
- **Κατασκευές και Αρχιτεκτονική:** Επεξεργασία δεδομένων για τρισδιάστατες μελέτες και αποτυπώσεις.
- **Γεωργία:** Παρακολούθηση καλλιεργειών και ανάλυση αγροτικών εκτάσεων.

4.8.1 Εισαγωγή εικόνων – Δημιουργία αραιού νέφους σημείων

Μετά τη λεπτομερή σχεδίαση της πτήσης στο uan Phantom 4 RTK και την εκτέλεσή της ελήφθησαν 1142 φωτογραφίες, ενώ ελήφθησαν και 896 χειροκίνητα τραβηγμένες και όχι μέσω κάποιου flight plan φωτογραφίες από το Mavic air 3. Συνολικά λοιπόν ελήφθησαν 2038 φωτογραφίες. Ωστόσο οι φωτογραφίες επεξεργάστηκαν ως διαφορετικά project τα οποία εν συνεχεία συνενώθηκαν σε ένα.

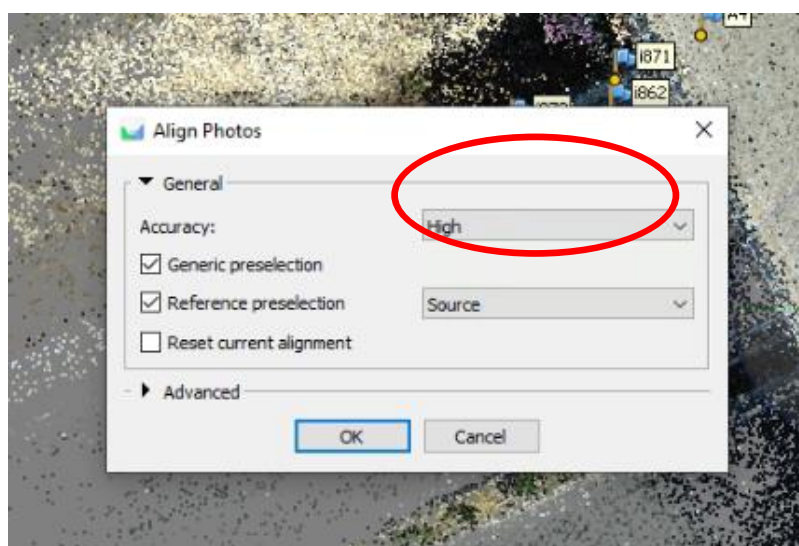
Αρχικά λοιπόν δημιουργούνται δύο chunk δηλαδή δύο μπλοκ αεροφωτογραφιών τα οποία θα επεξεργασθούν διαφορετικά. Στο πρώτο chunk θα εισαχθούν οι αεροφωτογραφίες από το phantom

4 RTK και στο δεύτερο τις αεροφωτογραφίες από το Mavic Air 3. Με την εντολή Add Photos εισάγονται οι αεροφωτογραφίες.

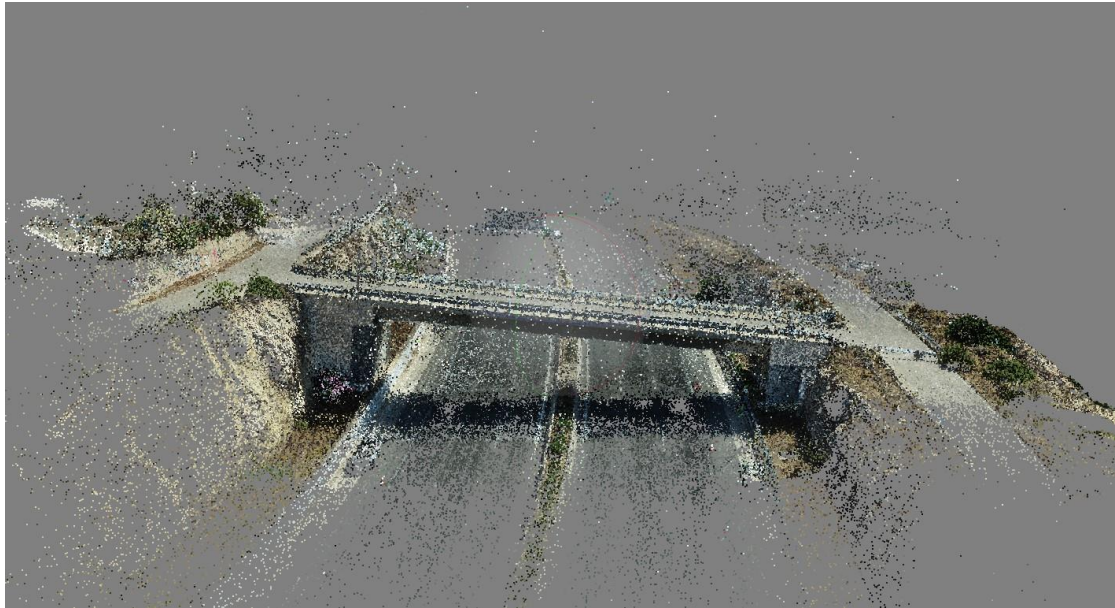


Εικόνα 4.37: Διαδικασία εισαγωγής εικόνων στο Agisoft Metashape

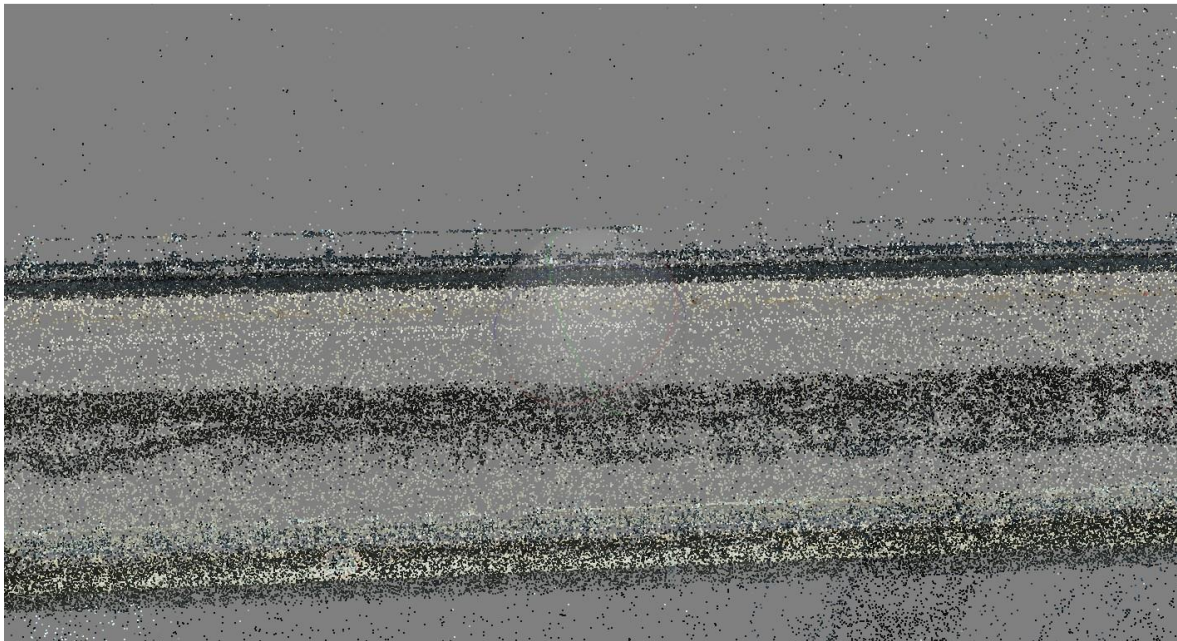
Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία αραιού νέφους σημείων από τις αεροφωτογραφίες. Για να επιτευχθεί αυτό το λογισμικό χρησιμοποιεί την διαδικασία του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων, όπου εκεί προσανατολίζονται οι εικόνες στο χώρο σχηματίζοντας έτσι σε αυθαίρετο χώρο και με αυθαίρετη κλίμακα ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Η παραπάνω διαδικασία γίνεται με την εντολή Align Photos. Τις παραμέτρους που θέτει το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε η υψηλή ακρίβεια high accuracy καθώς προκύπτουν ποιοτικότερα και ακριβέστερα αποτελέσματα. Μέσω λοιπόν της μεθόδου του αεροτριγωνισμού προκύπτει το αραιό νέφος σημείων.



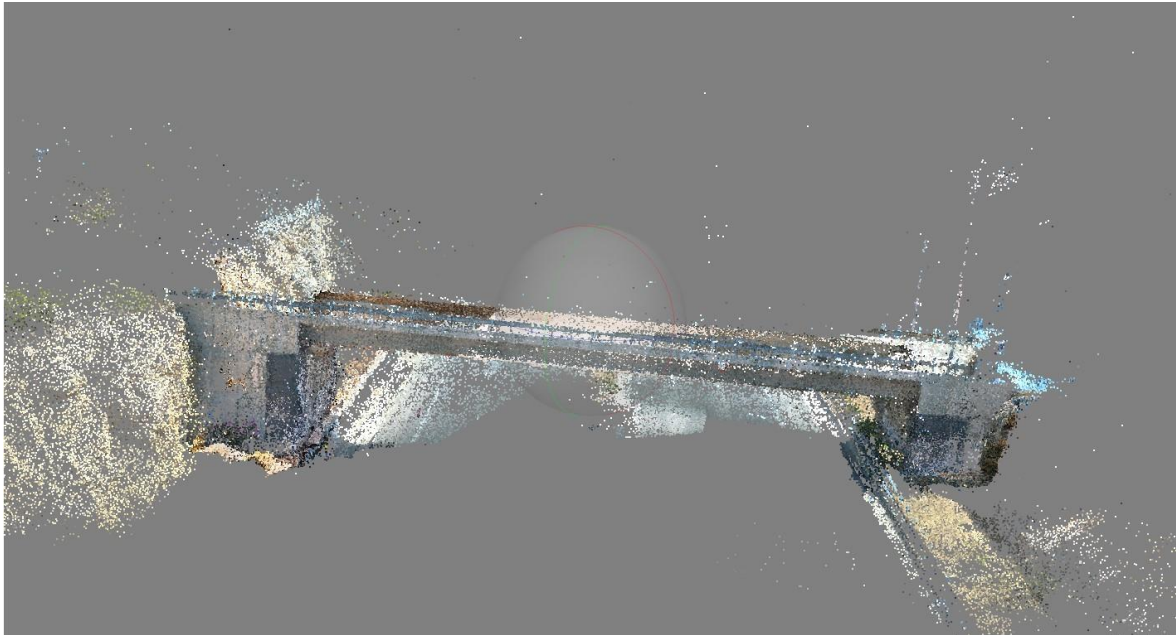
Εικόνα 4.38: Σχετικός προσανατολισμός εικόνων σε περιβάλλον Agisoft Metashape (Align)



Εικόνα 4.39: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Phantom 4 RTK



Εικόνα 4.40: Αραιό νέφος σημείων Σμηα Phantom 4 RTK (Bottom View γέφυρας)



Εικόνα 4.41: Αραιό νέφος σημείων Σμηνα Mavic Air 3



Εικόνα 4.42: Αραιό νέφος σημείων Σμηνα Mavic Air 3 (Bottom View γέφυρας)



















4.8.2 Εισαγωγή φωτοσταθερών – Μετασχηματισμοί αραιού νέφους σημείων

Τα φωτοσταθερά τύπου checkerboard τα οποία τοποθετήθηκαν στις επίγειες μετρήσεις εξάγονται από το λογισμικό Faro Scene μαζί με άλλα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία ωστόσο είναι ορατά και στο φωτογραμμετρικό μοντέλο με τις συντεταγμένες τους να είναι στο ανεξάρτητο σύστημα του σαρωτή. Εντοπίστηκαν τα αντίστοιχα σημεία επί των φωτογραφιών στο φωτογραμμετρικό μοντέλο, ορίστηκαν ως Markers όπως αναφέρονται στο λογισμικό Agisoft και έλαβαν τις αντίστοιχες ονομασίες και συντεταγμένες με αυτές του σαρωτή.



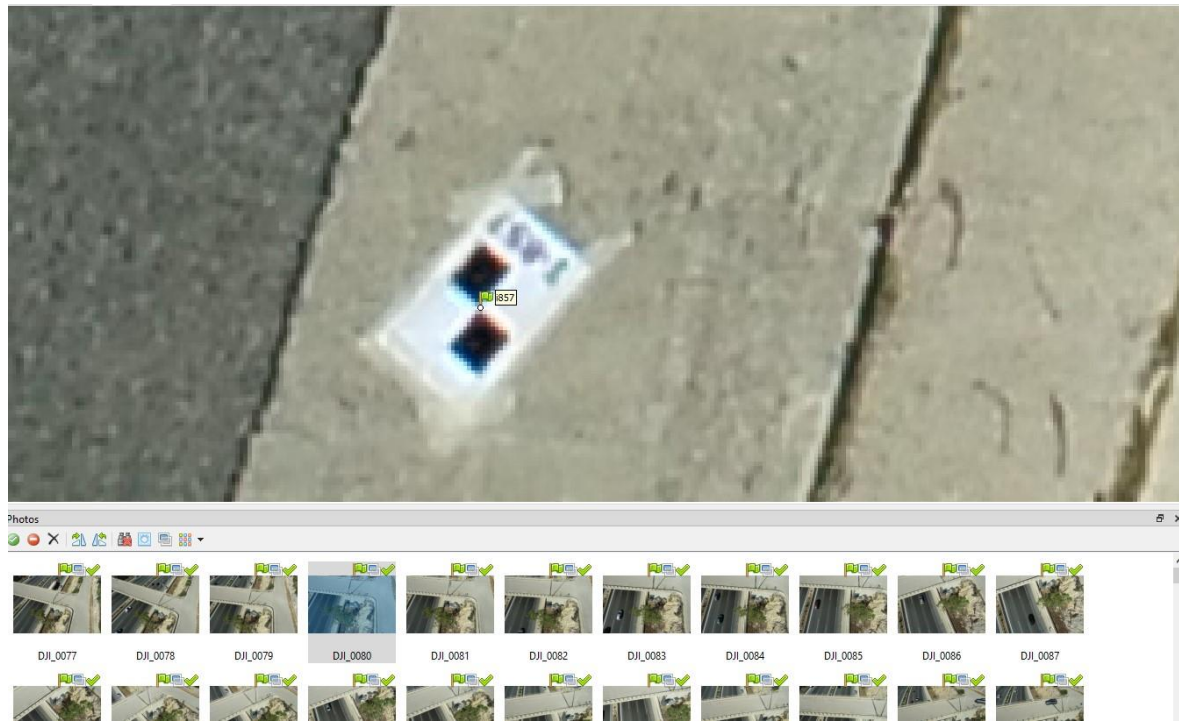
Εικόνα 4.43: Τοποθετημένα φωτοσταθερά επί του αραιού νέφους σημείων

Η διαδικασία αυτή έγινε επιλέγοντας με free form selection την περιοχή που βρίσκεται το εκάστοτε φωτοσταθερό επί του αραιού νέφους σημείων. Με δεξί κλικ και επιλογή Add Marker το λογισμικό προσθέτει το φωτοσταθερό.

-  A1
-  A2
-  A3
-  A4
-  A5
-  A7
-  A8
-  i857
-  i859
-  i860
-  i862
-  i863
-  i864
-  i866
-  i869
-  i870
-  i871
-  i872
-  i873
-  i874
-  i875

Εικόνα 4.44: Φωτοσταθερά με τις αντίστοιχες ονομασίες τους

Έπειτα με δεξί κλικ και την επιλογή Filter Photos by markers εμφανίζονται στο κάτω μέρος οι φωτογραφίες στις οποίες απεικονίζεται το φωτοσταθερό που έχει εισαχθεί. Εκεί το φωτοσταθερό μετακινείται στη σωστή θέση επί της εικόνας.



Εικόνα 4.45: Τοποθέτηση φωτοσταθερών σε περιβάλλον Agisoft Metashape

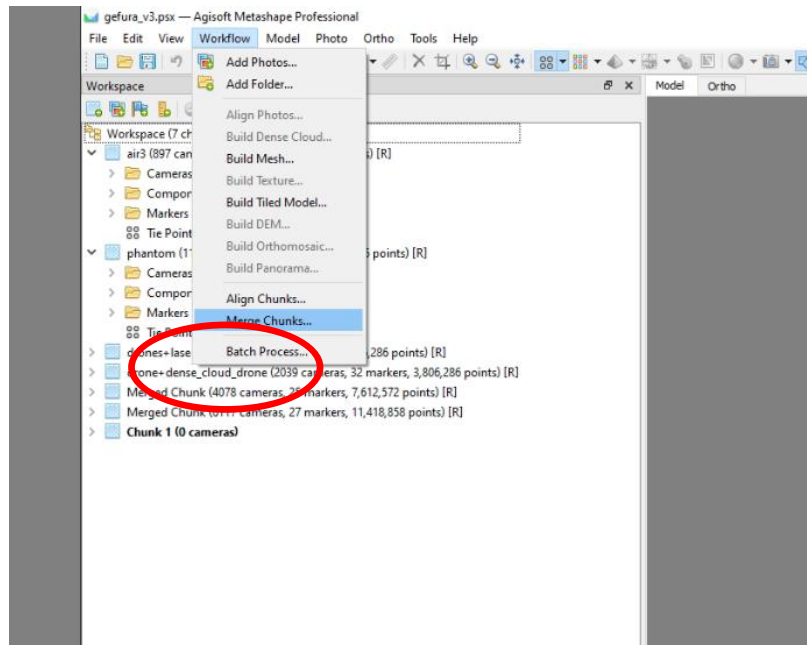
Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα 21 φωτοσταθερά που είχαν εισαχθεί. Έπειτα, για κάθε φωτοσταθερό εισάγονται οι συντεταγμένες του σαρωτή και με την επιλογή optimize το λογισμικό προχωρά στο μετασχηματισμό του νέφους ώστε να «έρθει» στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων με το πυκνό νέφος σημείων του σαρωτή. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε με τον ίδιο τρόπο και για το chunk με τις αεροφωτογραφίες από το uan manic air 3.

Markers	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy	Error (m)	Projec	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> A1	0.000464	-0.007667	-0.001817	0.005000	0.007893	28	0.303
<input checked="" type="checkbox"/> A2	-0.008885	-0.005925	-0.002881	0.005000	0.011061	35	0.637
<input checked="" type="checkbox"/> A3	-0.005017	-0.009151	-0.000839	0.005000	0.010470	28	0.237
<input checked="" type="checkbox"/> A4	-0.003344	0.005449	-0.011172	0.005000	0.012872	92	0.317
<input checked="" type="checkbox"/> A5	0.007481	-0.003021	0.003005	0.005000	0.008609	36	0.325
<input checked="" type="checkbox"/> A7	-0.000129	0.008666	-0.011808	0.005000	0.014648	10	0.383
<input checked="" type="checkbox"/> A8	-0.004655	-0.011129	-0.006567	0.005000	0.013735	77	0.368
<input checked="" type="checkbox"/> i857	0.007518	0.010793	-0.000809	0.005000	0.013178	94	0.359
<input checked="" type="checkbox"/> i859	0.011179	0.005670	0.013247	0.005000	0.018237	92	1.298
<input checked="" type="checkbox"/> i860	0.012519	-0.011122	-0.006452	0.005000	0.017946	97	0.405
<input checked="" type="checkbox"/> i862	0.004149	0.005297	0.007916	0.005000	0.010389	170	0.358
<input checked="" type="checkbox"/> i863	0.001373	0.007859	0.013739	0.005000	0.015887	86	0.316
<input checked="" type="checkbox"/> i864	0.003474	0.005436	0.009031	0.005000	0.011099	62	0.379
<input checked="" type="checkbox"/> i866	0.011606	-0.037018	-0.018468	0.005000	0.042966	89	0.412
<input checked="" type="checkbox"/> i869	0.002711	0.009334	-0.002826	0.005000	0.010122	46	0.339
<input checked="" type="checkbox"/> i870	-0.027106	0.038459	0.001091	0.005000	0.047064	127	0.401
<input checked="" type="checkbox"/> i871	0.002484	-0.001143	0.002641	0.005000	0.003801	88	0.429
<input checked="" type="checkbox"/> i872	-0.016325	-0.008184	0.003167	0.005000	0.018534	37	0.382
<input checked="" type="checkbox"/> i873	0.003230	-0.005294	0.006542	0.005000	0.009014	79	1.087
<input checked="" type="checkbox"/> i874	0.010762	0.006027	-0.001317	0.005000	0.012405	53	0.397
<input checked="" type="checkbox"/> i875	-0.013489	-0.003336	0.004578	0.005000	0.014631	47	0.459
Total Error							
Control points	0.009808	0.013606	0.007905		0.018542		0.546
Check points							

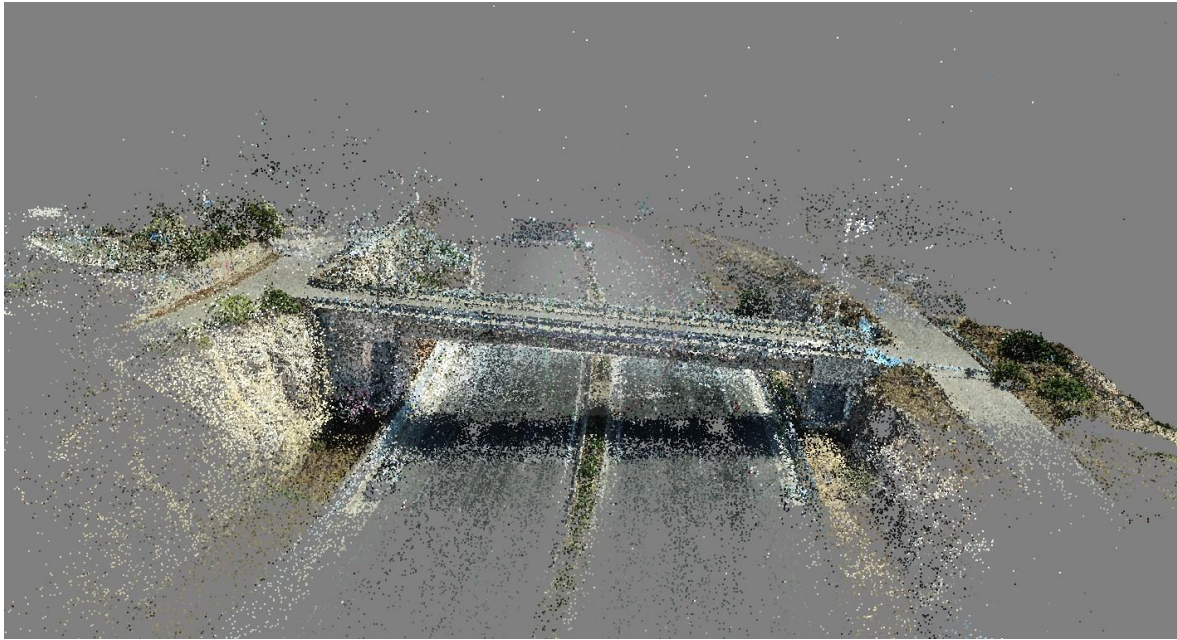
Εικόνα 4.46: Σφάλματα φωτοσταθερών έπειτα από τον μετασχηματισμό σε περιβάλλον Agisoft Metashape

4.8.3 Ένωση των δύο αραιών νεφών σημείων

Τα δύο αραιά νέφη σημείων τα οποία βρίσκονται πλέον στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων θα ενωθούν σε ένα αραιό νέφος σημείων. Αυτό γίνεται με την επιλογή Merge Chunks, όπου το λογισμικό, εφόσον έχουν έρθει στο ίδιο σύστημα, δημιουργεί ένα κοινό αραιό νέφος σημείων.



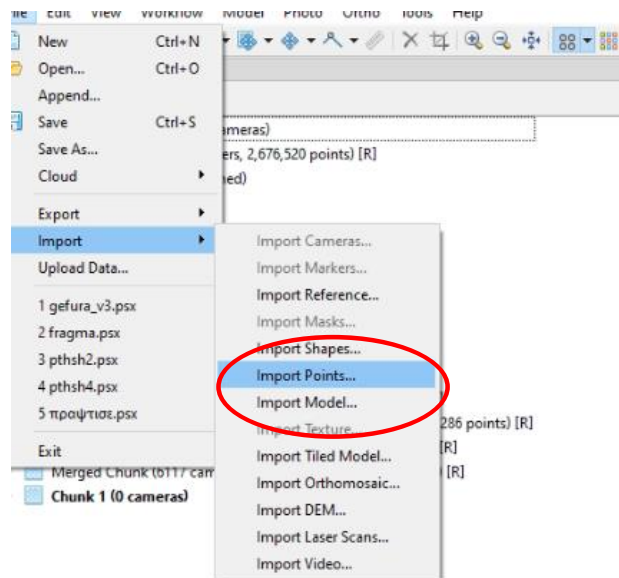
Εικόνα 4.47: Διαδικασία συνένωσης αραιών νεφών σημείων από τα δύο Σημεα με την εντολή Merge Chunks



Εικόνα 4.48: Τελικό αραιό νέφος έπειτα από την σύνενοση και τον μετασχηματισμό

4.8.4 Εισαγωγή πυκνού νέφους σημείων σαρωτή στο Agisoft

Ύστερα ακολουθεί η εισαγωγή του προηγουμένως επεξεργασμένου πυκνού νέφους σημείων (dense cloud) από τον τρισδιάστατο σαρωτή στο λογισμικό Agisoft. Εφόσον έχουν μετασχηματιστεί και ενωθεί τα δύο αραιά νέφη σημείων σε ένα, εισάγεται το πυκνό νέφος από τον σαρωτή σε μορφή E57 με την εντολή add, import points και επιλέγεται το αντίστοιχο αρχείο.



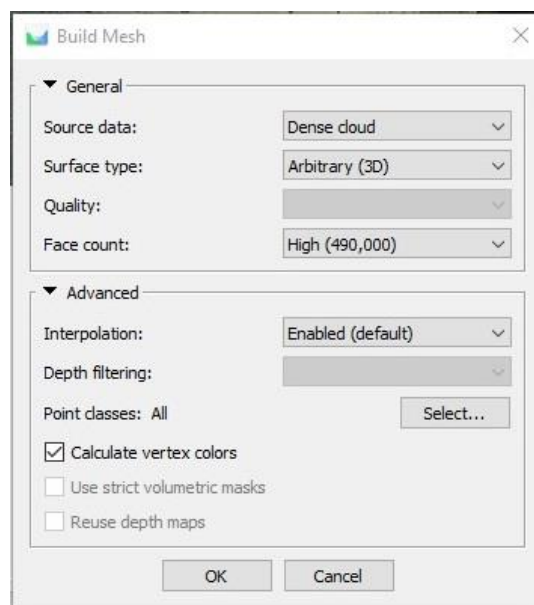
Εικόνα 4.49: Διαδικασία εισαγωγής πυκνού νέφους σημείων σαρωτή σε περιβάλλον Agisoft Metashape



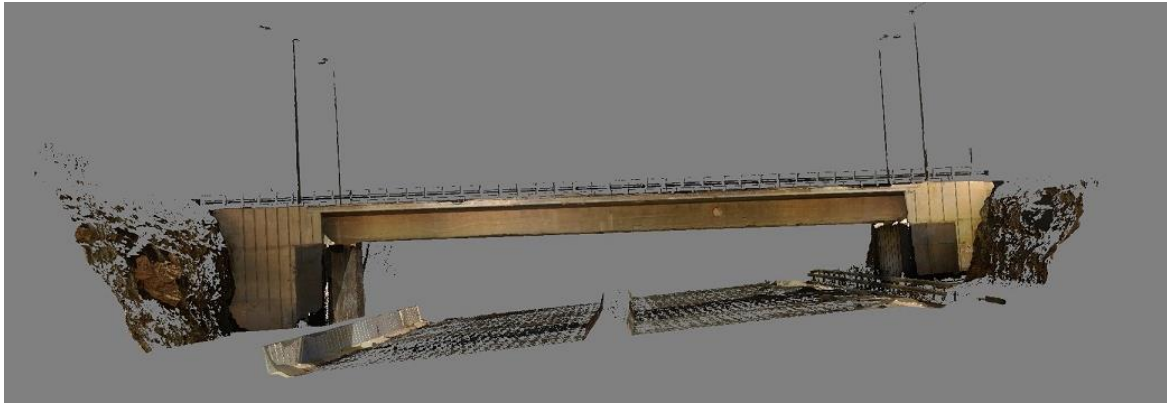
Εικόνα 4.50: Πυκνό νέφος σημείων σαρωτή σε περιβάλλον Agisoft Metashape

4.8.5 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου – πλέγματος (Mesh) και εισαγωγή φωτοϋφής (Texture)

Με την επιλογή build mesh δημιουργείται ένα τρισδιάστατο τριγωνισμένο μοντέλο αποτελούμενο από τρίγωνα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους δίνοντας έτσι την τελική όψη του τρισδιάστατου αντικειμένου.



Εικόνα 4.51: Διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατου τριγωνισμένου μοντέλου

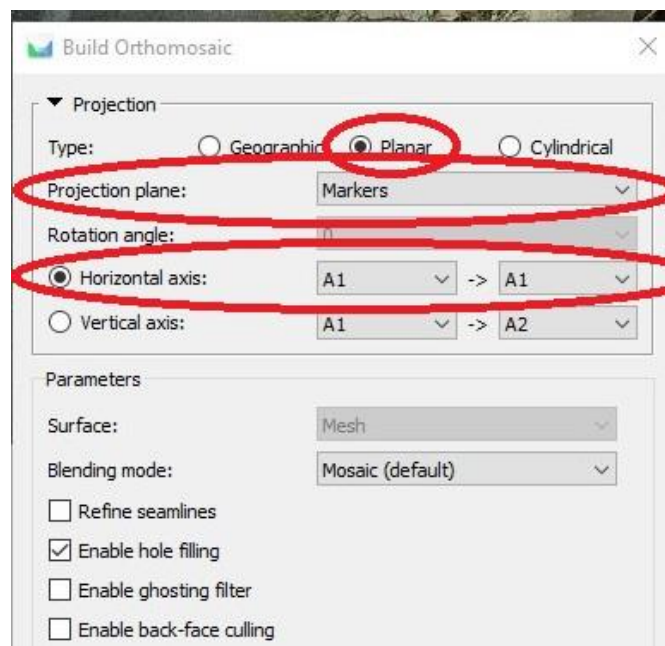


Εικόνα 4.52: Τρισδιάστατο τριγωνισμένο μοντέλο γέφυρας σε περιβάλλον Agisoft Metashape

Επί αυτού του τριγωνισμένου μοντέλου λοιπόν θα εισαχθεί η φωτούφή από τις φωτογραφίες δηλαδή υφή χρωματική πληροφορία με σκοπό την ακριβέστερη οπτική αναπαράσταση του τρισδιάστατου αντικειμένου. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε η εντολή build Texture.

4.8.6 Δημιουργία ορθομοσαϊκού

Τελικό παραγόμενο προϊόν θα είναι ένα ορθομοσαϊκό των όψεων της γέφυρας από τις οποίες θα προκύψουν as-built σχέδια των όψεων της γέφυρας με ψηφιοποιημένες και διαστασιολογημένες τις ρωγμές και τις παθογένειες του σκυροδέματος. Για τη δημιουργία του ορθομοσαϊκού χρησιμοποιείται η εντολή build Orthomosaic. Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή planar και ως projection plane ορίστηκαν markers, τα οποία εισήχθησαν με σκοπό να ορισθούν ως οριζόντιος και κατακόρυφος άξονας για τη δημιουργία του ορθομοσαϊκού.

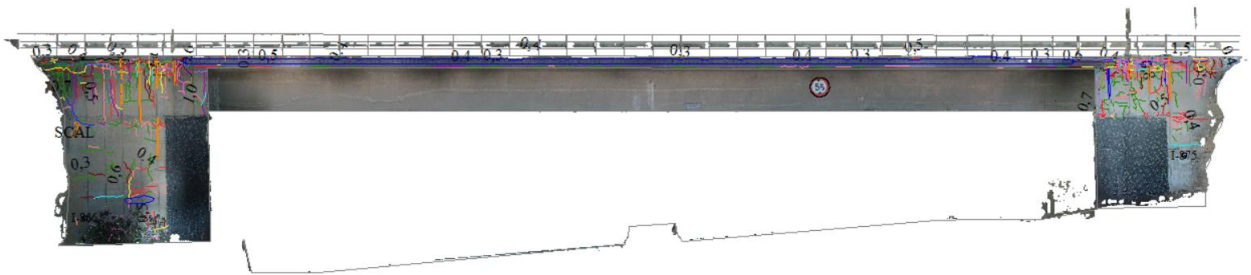


Εικόνα 4.53: Διαδικασία δημιουργίας ορθομοσαϊκού

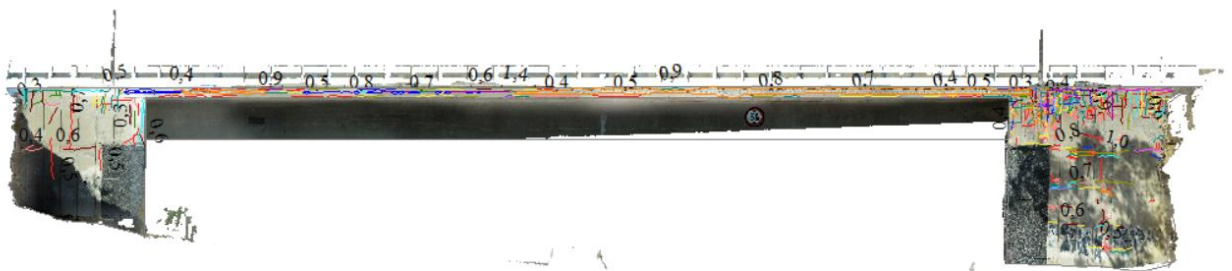
Στην συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκε ένα ορθομωσαϊκό με εικονοψηφίδα της τάξεως του 1mm.

4.9 Εντοπισμός και ψηφιοποίηση ρωγμών και παθογενειών σκυροδέματος – Σχέδια AS-BUILT

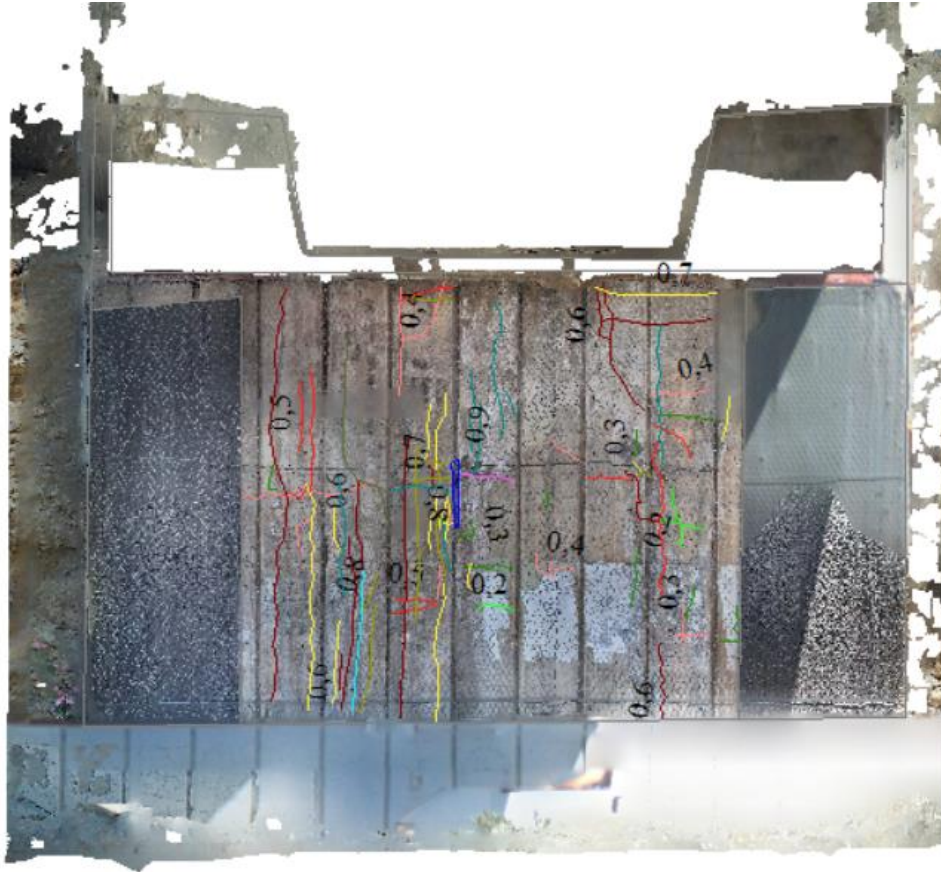
Σε αυτό το στάδιο τα προηγούμεως εξαχθέντα ορθομωσαϊκά εισάγονται στο λογισμικό GlobalMapper. Εκεί ψηφιοποιούνται δημιουργώντας έτσι σχέδια υφιστάμενης κατάστασης (As Built), ενώ εντοπίζονται οπτικά και ψηφιοποιούνται οι ρωγμές και οι παθογένειες του σκυροδέματος. Όσον αφορά την διαστασιολόγηση, αυτή γίνεται με την εντολή measure όπου μεγεθύνοντας στο μεγαλύτερο άνοιγμα της ρωγμής μετράται αντιδιαμετρικά εκεί που η εικονοψηφίδα είναι πιο σκούρα μαύρη. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ένα σφάλμα της τάξεως 0,2-0,3 mm, τα οποία επαληθεύονται και συνορθώνονται με επιτόπιες δειγματοληπτικές μετρήσεις με ρωγμόμετρο όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έπειτα ψηφιοποιούνται επί του ορθομωσαϊκού και εισάγονται στο εκάστοτε layer, όπου αργότερα εξάγονται σε αρχεία .dwg με σκοπό την τελική επεξεργασία τους και τη δημιουργία των 2Dσχεδίων.



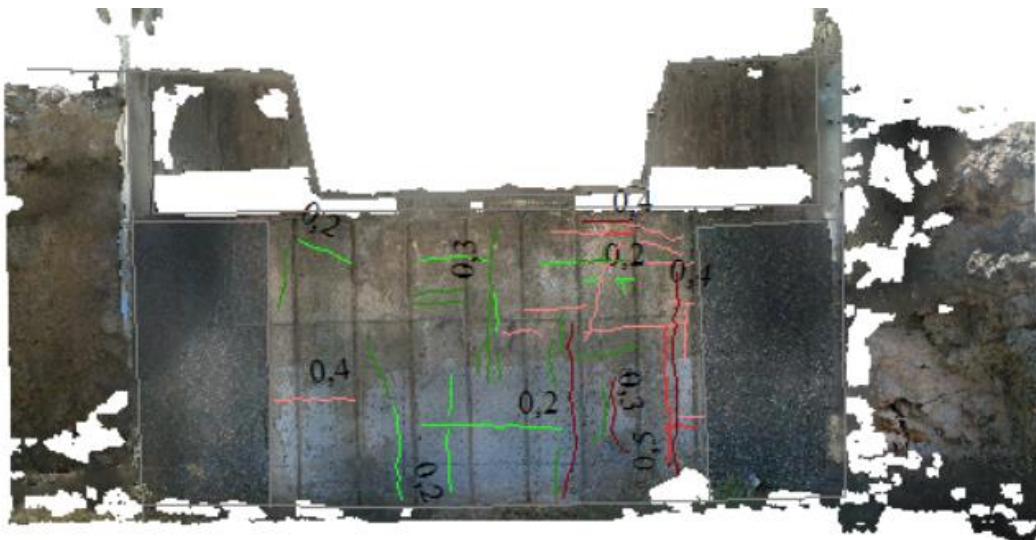
Εικόνα 4.54: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες νότιας όψης γέφυρας



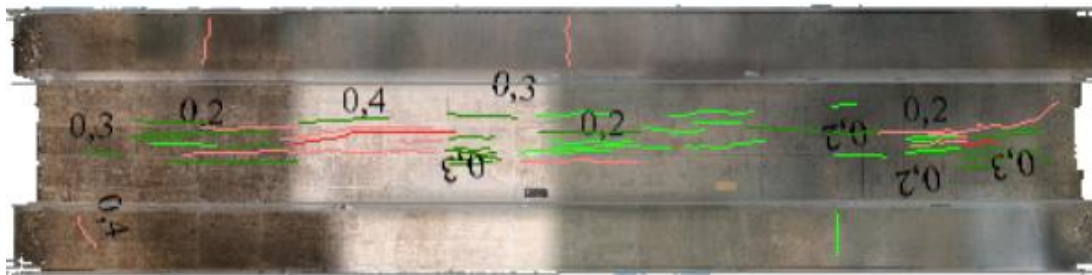
Εικόνα 4.55: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες βόρειας όψης γέφυρας



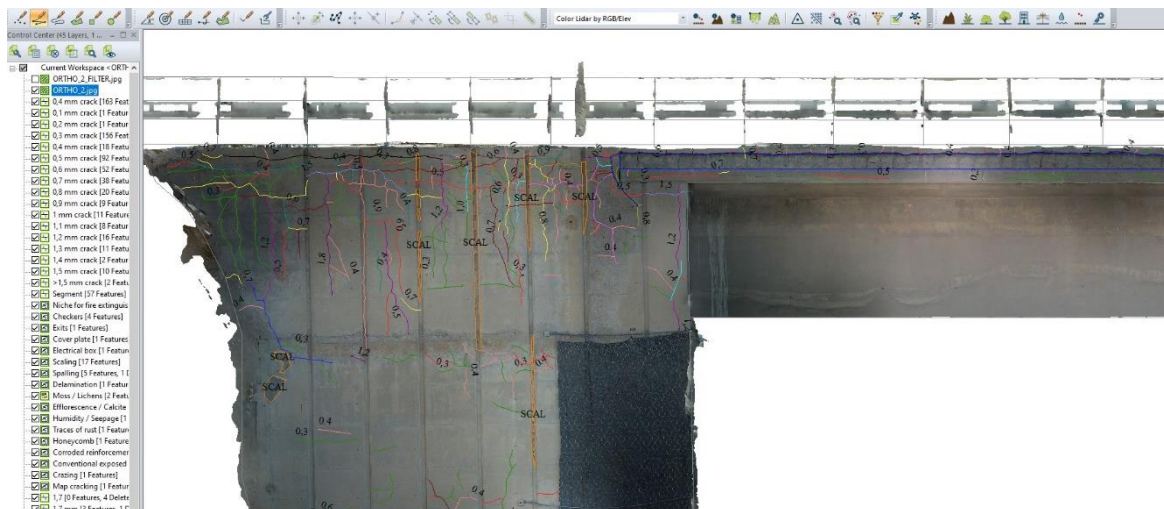
Εικόνα 4.56: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογόνειες γέφυρες



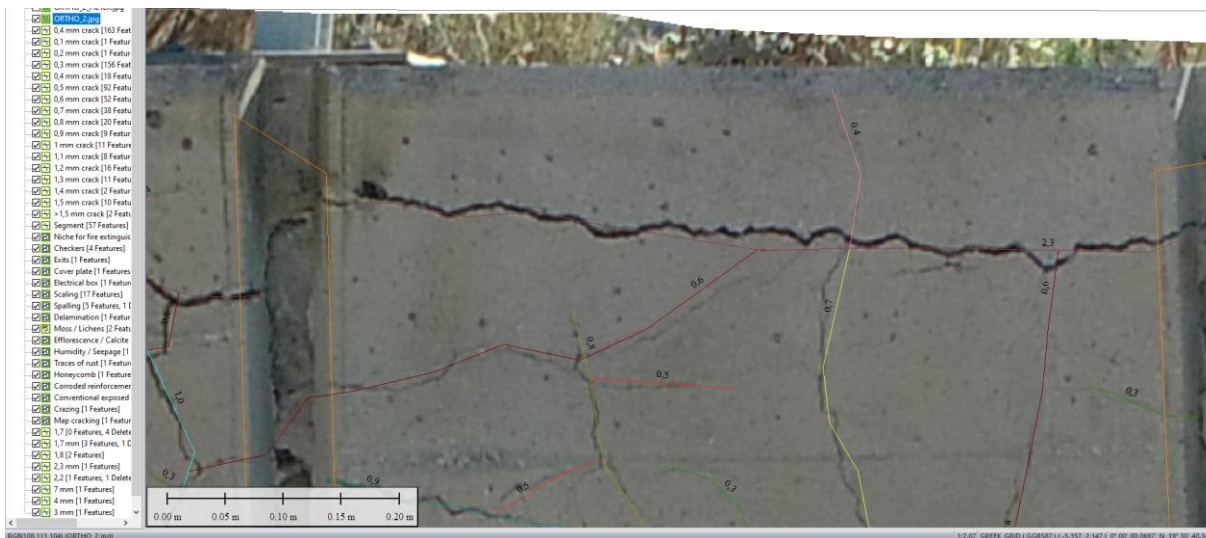
Εικόνα 4.57: Ορθομωσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογόνειες γέφυρες



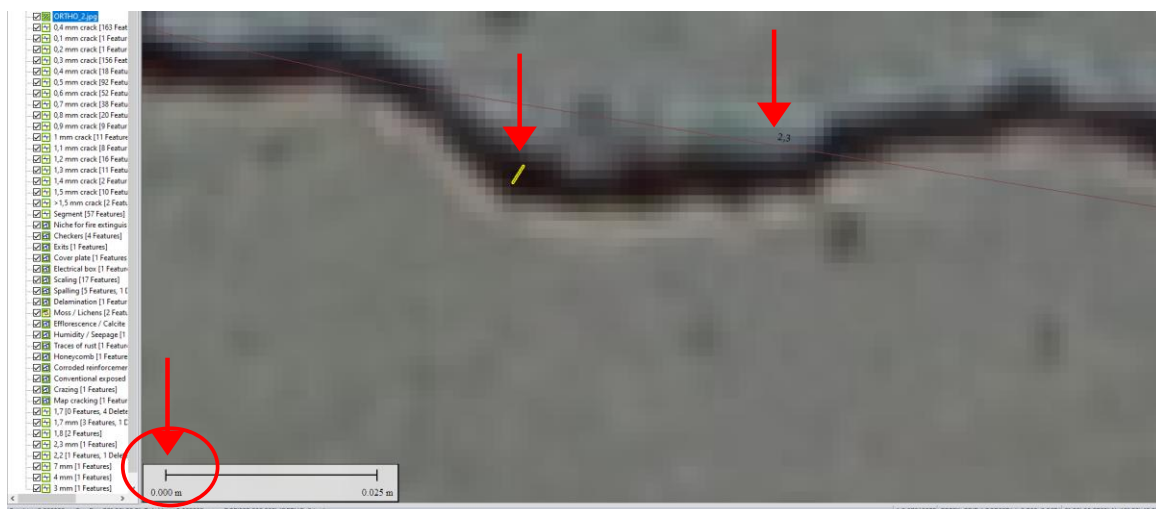
Εικόνα 4.58: Ορθομοσαϊκό με ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες κάτω μέρους γέφυρας (Bottom view)



Εικόνα 4.59: Ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες επί ορθομοσαϊκού γέφυρας



Εικόνα 4.60: Ψηφιοποιημένες ρωγμές και παθογένειες επί ορθομοσαϊκού γέφυρας



Εικόνα 4.61: Διαδικασία ψηφιοποίησης και διαστασιολόγησης ρωγμής επί ορθομοσαϊκού γέφυρας σε περιβάλλον GlobalMapper

As Built Σχέδια

Τα «as-built» σχέδια είναι τα τελικά αναθεωρημένα διαγράμματα που απεικονίζουν με ακρίβεια την πραγματική κατάσταση μιας κατασκευής ή υποδομής, όπως αυτή ολοκληρώθηκε. Πριν από την έναρξη της κατασκευαστικής διαδικασίας, δημιουργείται και εγκρίνεται ένα αρχικό σχέδιο, το οποίο περιλαμβάνει τις προδιαγραφές, τις διαστάσεις και τις κρίσιμες λεπτομέρειες. Αυτό το αρχικό σχέδιο αποτελεί τον οδηγό για τους εργολάβους και τους υπεργολάβους καθ' όλη τη διάρκεια του έργου.

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, είναι συνηθισμένο να προκύπτουν αλλαγές και προκλήσεις που απαιτούν τροποποιήσεις. Οι εργαζόμενοι ενημερώνουν το αρχικό σχέδιο ώστε να αντικατοπτρίζει τις προσαρμογές που πραγματοποιούνται στην πράξη. Με την ολοκλήρωση του έργου, οι εργολάβοι υποβάλλουν τα «as-built» σχέδια, τα οποία αποτελούν την τελική, ακριβή αποτύπωση της κατασκευής και είναι απαραίτητα για τη μελλοντική συντήρηση και διαχείριση της.

Τι περιλαμβάνουν τα «as-built» σχέδια:

Τα «as-built» σχέδια περιλαμβάνουν πολλές σημαντικές λεπτομέρειες, όπως:

Τεκμηρίωση των αλλαγών που έγιναν κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Προσαρμογές που προέκυψαν από επιθεωρήσεις ή απαιτήσεις κανονιστικής συμμόρφωσης.

Αλλαγές στα υλικά, τις διαφοροποιήσεις στον τύπο, το μέγεθος ή τη θέση τους.

Τροποποιήσεις στα δομικά χαρακτηριστικά, τις αλλαγές στη θέση πορτών, παραθύρων ή υδραυλικών εγκαταστάσεων.

Ακριβείς διαστάσεις της τελικής δομής, συμπεριλαμβανομένων τροποποιήσεων στο αρχικό σχέδιο.

Επιπλέον, οποιαδήποτε προβλήματα αντιμετωπίστηκαν, λύσεις που εφαρμόστηκαν, καθώς και εργασίες που έγιναν πέραν του αρχικού σχεδιασμού, πρέπει να καταγράφονται στα «as-built» σχέδια.

Η σημασία των «as-built» σχεδίων:

Η αξία αυτών των σχεδίων είναι ανεκτίμητη σε οποιοδήποτε κατασκευαστικό έργο. Παρέχουν μια λεπτομερή καταγραφή της διαδικασίας και των τροποποιήσεων, κάτι που είναι κρίσιμο για:

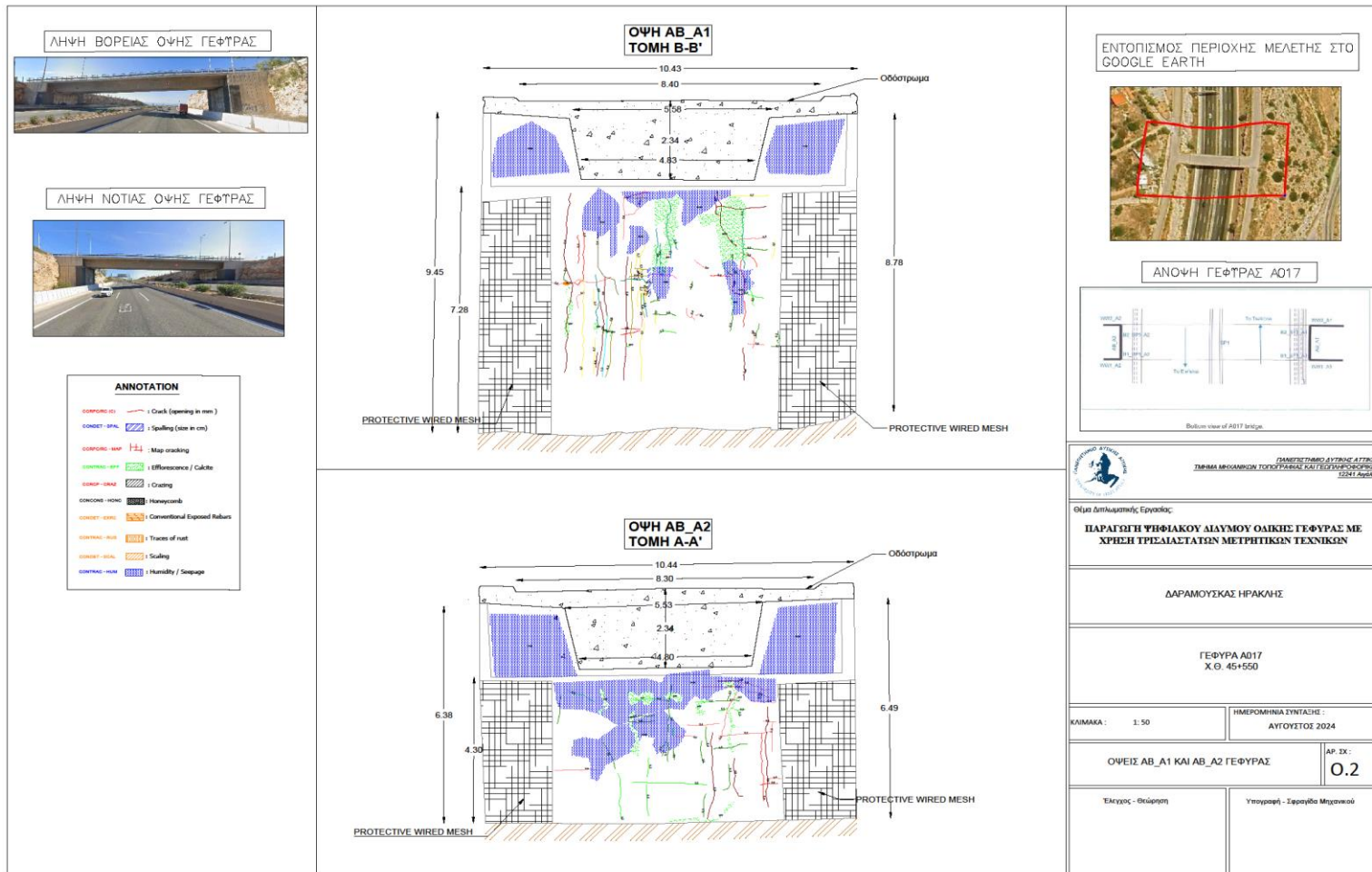
Μελλοντική συντήρηση και ανακαίνιση: Οι μηχανικοί και οι εργολάβοι μπορούν να ανατρέξουν στα «as-built» σχέδια για να κατανοήσουν τη δομή και να εκτελέσουν εργασίες με ασφάλεια και ακρίβεια.

Αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων: Με μια σαφή εικόνα των αλλαγών, οι ιδιοκτήτες μπορούν να προλάβουν πιθανά προβλήματα και να εξασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία της κατασκευής.

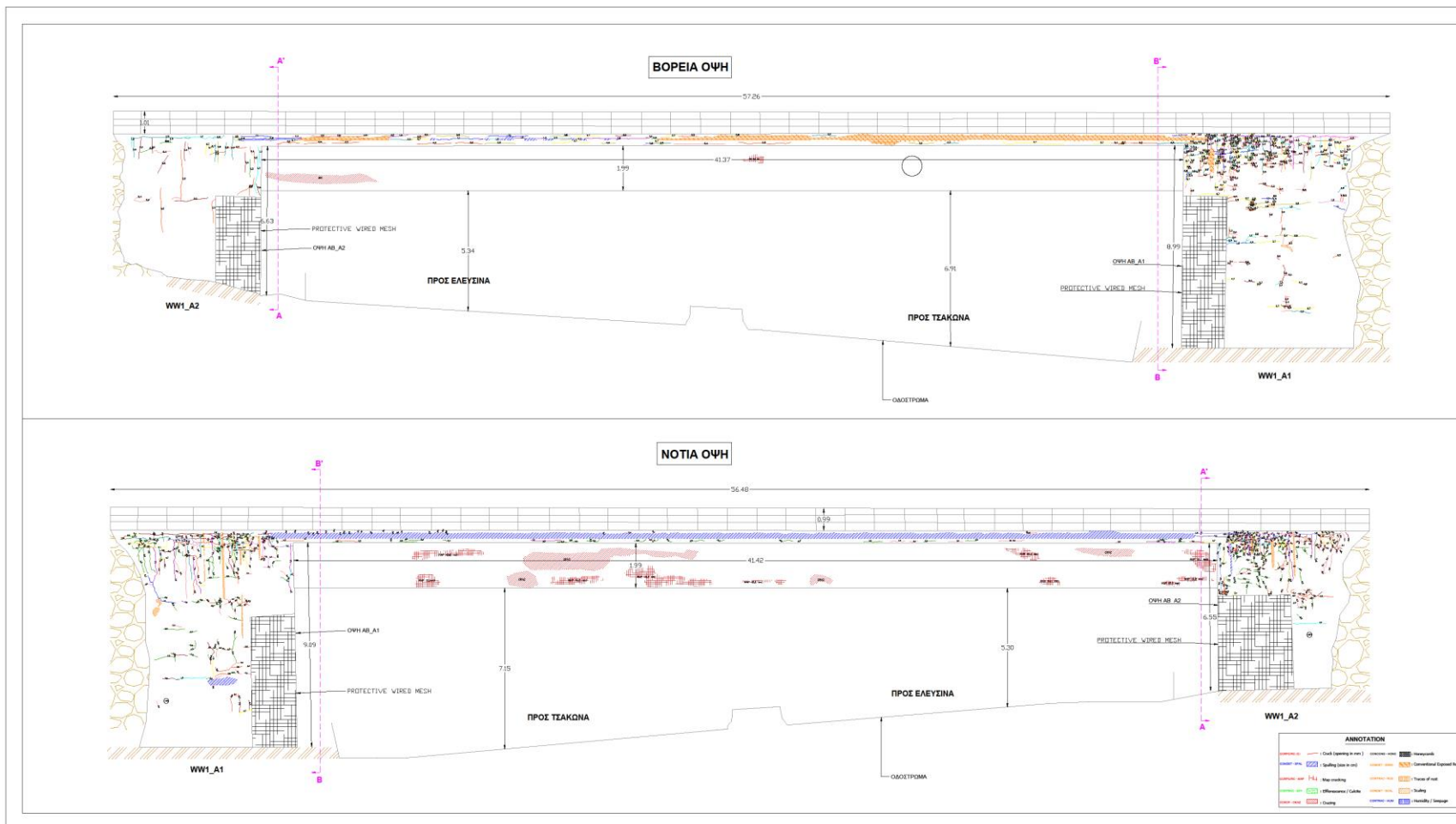
Διασφάλιση ποιότητας: Τα «as-built» σχέδια χρησιμεύουν ως σημείο αναφοράς για τον έλεγχο ποιότητας και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

Τέλος, τα «as-built» σχέδια αποτελούν σημαντικό εργαλείο επικοινωνίας για όλους τους εμπλεκόμενους στο έργο. Βοηθούν στην κατανόηση των τεχνικών λεπτομερειών, επιτρέποντας καλύτερο συντονισμό μεταξύ εργολάβων, υπεργολάβων και τεχνικών ομάδων, συμβάλλοντας έτσι στην επιτυχία του έργου (www.dreiy.com).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τελικά σχέδια που παρήχθησαν από τις μετρήσεις:



Σχέδιο 1:;Ώψεις ΑΒ_Α1 και ΑΒ_Α2, Τομές Α-Α' και Β-Β'



ΕΠΙΤΟΠΙΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΟ GOOGLE EARTH

ΛΗΨΗ ΝΟΤΙΑΣ ΟΨΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

ΛΗΨΗ ΒΟΡΕΙΑΣ ΟΨΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

ΑΝΘΡΩ ΓΕΦΥΡΑΣ Α017

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ (ΙΤΥΕ)

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΑΡΑΔΟΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΛΤΙΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΡΕΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΙΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΡΜΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ

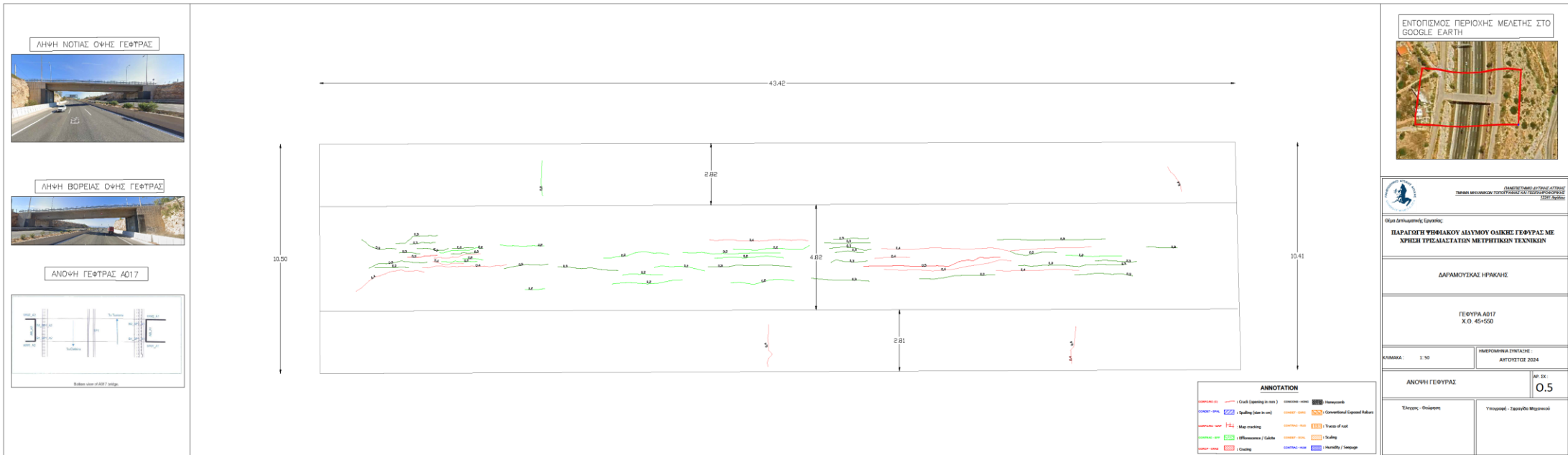
ΓΕΦΥΡΑ Α017
Κ.Θ. 65/100

ΚΥΜΑΚΑ: 1:50 ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ: ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2024 ΑΦ. 25

ΒΟΡΕΙΑ ΚΑΙ ΝΟΤΙΑ ΟΨΗ ΓΕΦΥΡΑΣ 0.1

ΤΕΧΝΟΣ: Θεόδωρος ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Γεωργίος Μπαρδάνης

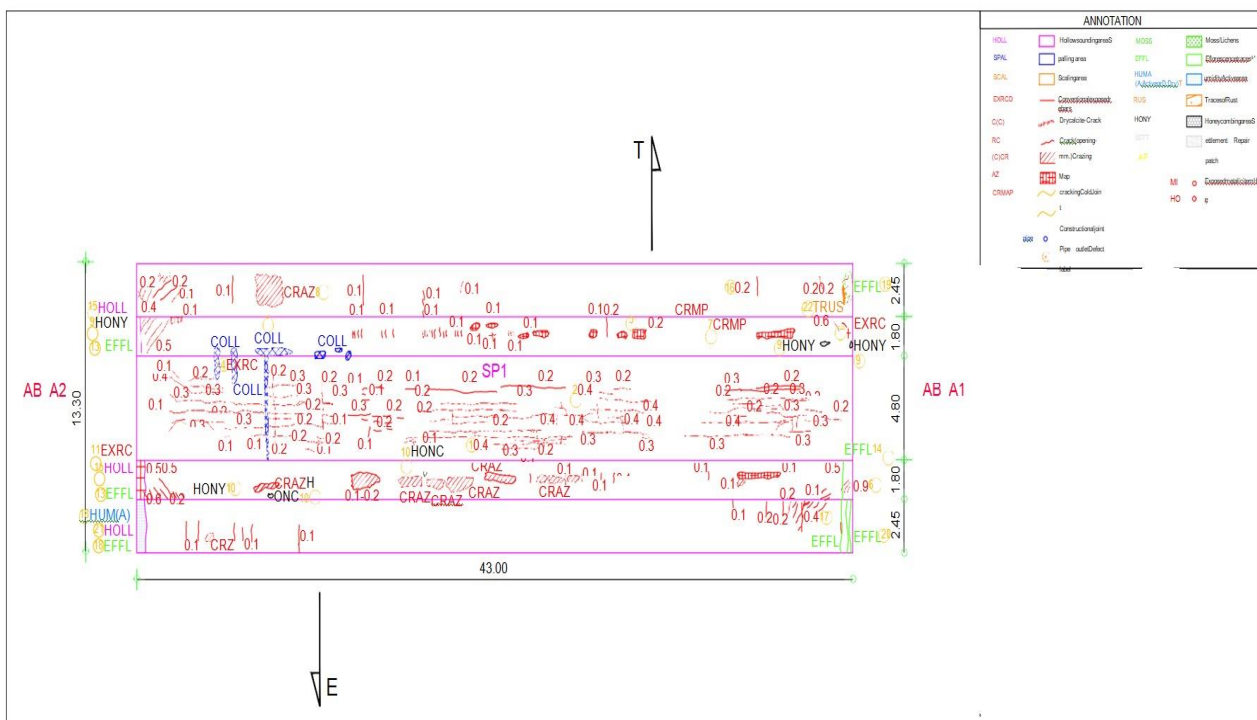
Σχέδιο 2: Βόρεια και Νότια όψη γέφυρας



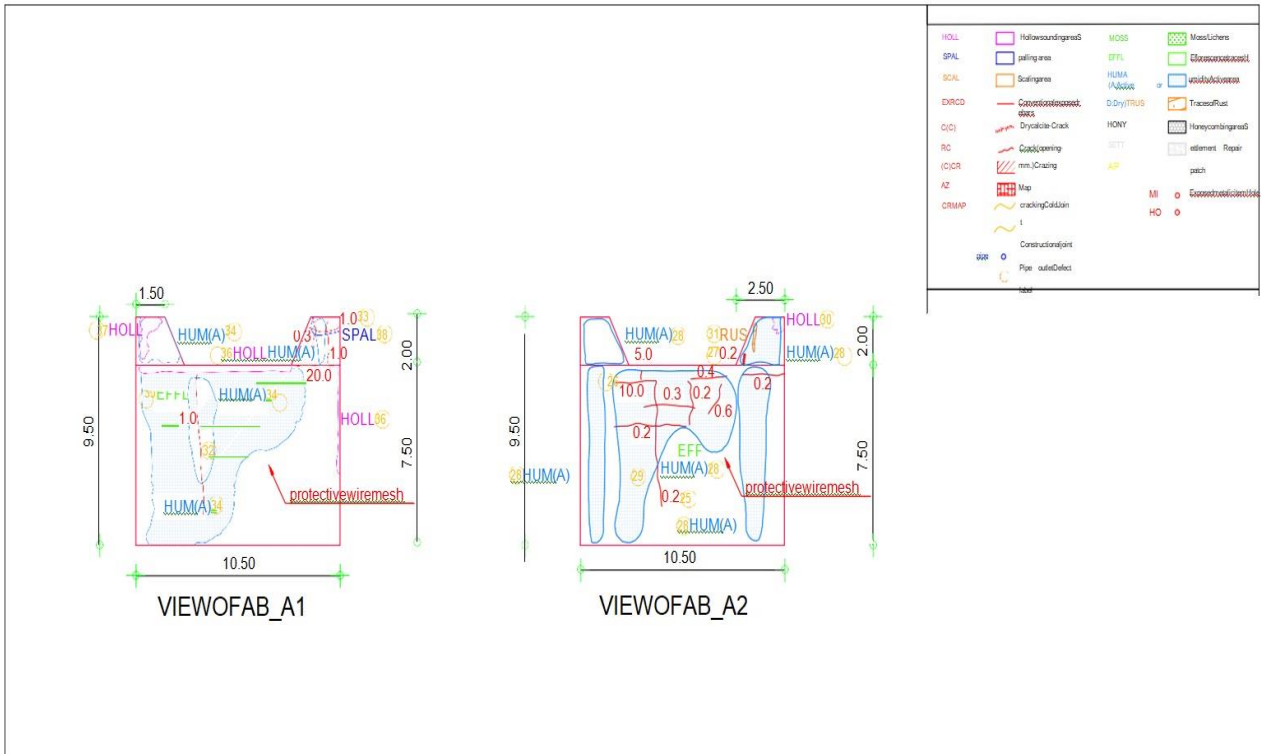
Σχέδιο 3 Άνωψη γέφυρας (Bottom view)

4.10 Σύγκριση τελικών σχεδίων επιθεώρησης με τη χρήση ψηφιακού διδύμου και οπτικής μεθόδου

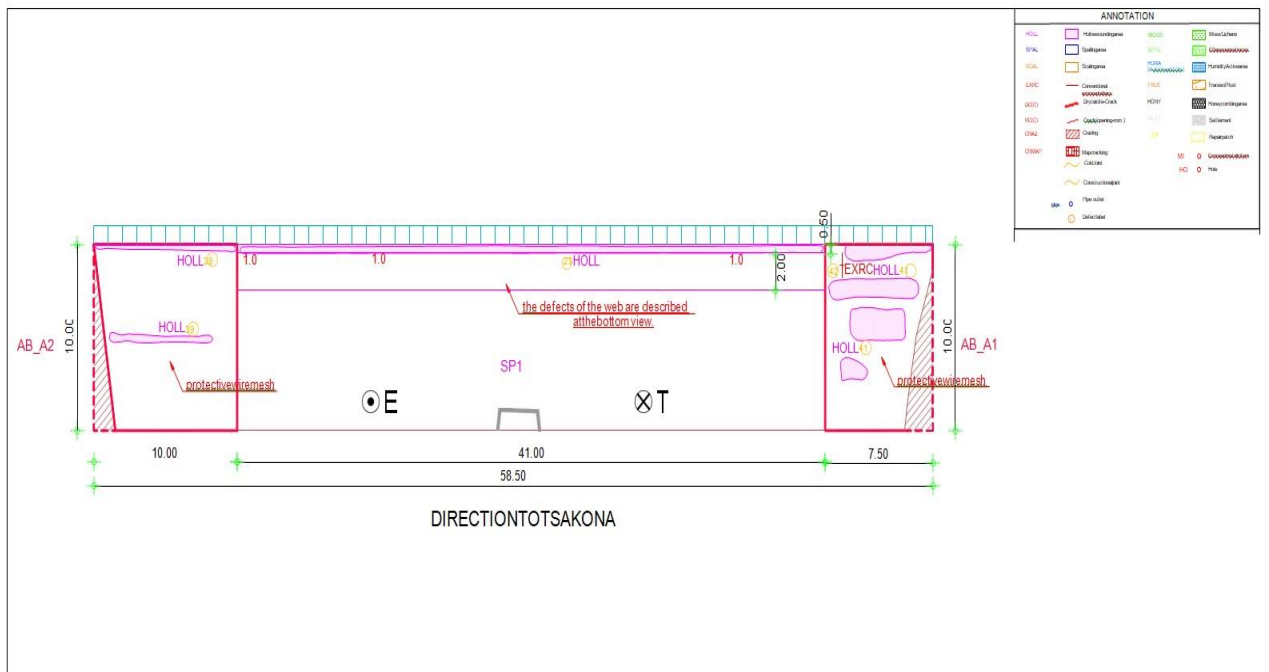
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα συγκριθούν τελικά σχέδια τεχνικής επιθεώρησης του ίδιου τεχνικού έργου κατά την χρονολογία 2022 με την οπτική μέθοδο και τα τελικά σχέδια επιθεώρησης με τη μέθοδο της δημιουργίας του ψηφιακού διδύμου. Παρατηρείται λοιπόν πως πέραν της άνοψης της γέφυρας (bottom view), όπου εκεί λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών (πολύ υψηλοί άνεμοι) οι λήψεις με το uav κατέστησαν υπερβολικά δύσκολες καταλήγοντας λοιπόν σε ένα όχι και τόσο καλό αποτέλεσμα με τις ρωγμές και τις παθογένειες στο συγκεκριμένο κομμάτι της γέφυρας να είναι πολύ δύσκολα διακριτές, στις υπόλοιπες όψεις υπάρχει πολύ ακριβέστερη και ορθότερη αποτύπωση και διαστασιολόγηση των ρωγμών κατά κύριο λόγο, ενώ όσον αφορά τις παθογένειες τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν πολύ, με τις τελευταίες ωστόσο να είναι ορθότερα καταγεγραμμένες.



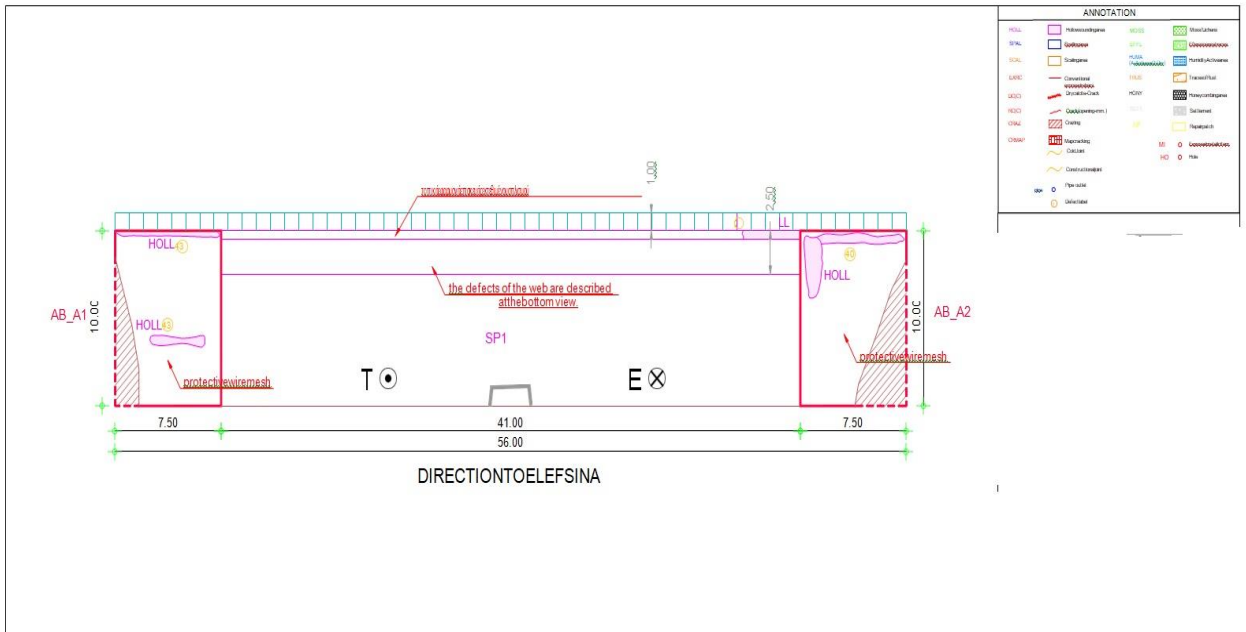
Εικόνα 4.62: Άνοψη γέφυρας (Bottom view) από προηγούμενη επιθεώρηση
Πηγή: Ολυμπία Οδός



Εικόνα 4.63: Όψεις AB_A1 και AB_A2 από προηγούμενη επιθεώρηση
 Πηγή: Ολυμπία Οδός



Εικόνα 4.64: Βόρεια όψη γέφυρας από προηγούμενη επιθεώρηση
 Πηγή: Ολυμπία Οδός



Εικόνα 4.65: Νότια όψη γέφυρας από προηγούμενη επιθεώρηση
 Πηγή: Ολυμπία Οδός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Μετά το πέρας όλων των εργασιών και την ολοκλήρωση της διαδικασίας οδηγούμαστε στο συμπέρασμα της αναγκαιότητας της εισαγωγής της δημιουργίας ψηφιακών διδύμων των κατασκευών στην τεχνική επιθεώρηση τους. Η ταχύτητα λήψης των μετρήσεων, η επεξεργασία τους αλλά και η ακρίβεια των τελικών τους αποτελεσμάτων καθιστούν πλέον την τεχνική επιθεώρηση μεγάλων τεχνικών έργων μια επιθεώρηση «ρουτίνας». Κατά την σύγκριση επίσης των παλαιών σχεδίων επιθεώρησης τα οποία έγιναν με την μέθοδο της επιτόπιας παρατήρησης και διαστασιολόγησης παρατηρούμε πως με την μέθοδο της δημιουργίας του ψηφιακού διδύμου τα ευρήματα παθογενειών είναι αρκετά περισσότερα ενώ τα σχέδια αρκετά πιο ακριβή καθώς το μοντέλου του ψηφιακού διδύμου δημιουργήθηκε με γεωμετρία ακρίβειας της τάξεως των mm. Παρέχεται επίσης ολιστική σάρωση της κατασκευής (στην περίπτωση μας γέφυρας) με τελικά σχέδια As-Built (όψεις, τομές, ανόψεις) μεγάλης ακρίβειας. Τα δεδομένα είναι ανά πάσα στιγμή διαθέσιμα για τυχόν επανεξέταση, ή για τυχόν σύγκριση με κάποια προηγούμενη ή και την επόμενη επιθεώρηση. Μεγάλο πλεονέκτημα προκύπτει επίσης στον τομέα της αποτύπωσης των ευρημάτων τα οποία αποτυπώνονται και αυτά με τοπογραφική ακρίβεια συγκριτικά με την μέθοδο της επιτόπιας παρατήρησης μέσω της οποίας αποτυπώνονται σκαριφηματικά με αποτέλεσμα η ακρίβεια της θέσης μιας παθογένειας επί της κατασκευής να έχει μεγάλες αποκλίσεις από της πραγματικότητα καθιστώντας τον επανεντοπισμό της αρκετά δύσκολο και χρονοβόρο. Τέλος, η δυνατότητα παροχής συνεχούς κυκλοφορίας οχημάτων και στα δύο ρεύματα αποτελεί αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα έναντι της μέχρι σήμερα εφαρμόσιμης μεθόδου. Ωστόσο, για την πραγματοποίηση των παραπάνω μετρήσεων θα πρέπει να επισημανθεί πως θα πρέπει οι καιρικές συνθήκες να είναι σχετικά ευνοϊκές (κυρίως δίχως πολύ υψηλούς ανέμους αλλά και χωρίς βροχή), ενώ επίσης ο χειριστής του ΣΜηα θα πρέπει να είναι αρκετά έμπειρος και προσεκτικός καθώς η πτήση σε αυτές τις συνθήκες καθίσταται αρκετά απαιτητική και δύσκολη.

5.2 Προτάσεις

Προέκυψαν οι παρακάτω προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης, που θα συμβάλλουν στη βελτίωση της μεθοδολογίας και την εξέλιξη της έρευνας στο αντικείμενο αυτό. Αρχικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μία καλύτερη κάμερα με ανάλογους φακούς με τις μετρήσεις να γίνονται επίγεια με το τελικό αποτέλεσμα να είναι αρκετά πιο ποιοτικό και ακριβές. Επίσης με την πρόοδο της τεχνολογίας να κάνει πολύ μεγάλα άλματα παρατηρούμε την έλευση 3d σαρωτών slam, οι οποίοι

συνδυαστικά με μια πολυγωνική όδευση από έναν γεωδαιτικό σταθμό προσφέρουν 3d νέφος σημείων πολύ μεγάλης ακρίβειας (έως και 5mm) το οποίο θα μετέτρεπε την διαδικασία της σάρωσης σε μια πραγματικά ολιγόλεπτη διαδικασία. Ωστόσο, κάτι το οποίο θα άλλαζε κατά πολύ το χρονοδιάγραμμα ολοκλήρωσης των τελικών σχεδίων και θα ήταν αρκετά πιο αποδοτικό θα ήταν η εισαγωγή μιας πλατφόρμας AI, η οποία θα αναλάμβανε τον ρόλο του εντοπισμού και αντίστοιχα της διαστασιολόγησης και κατηγοριοποίησης των ρωγμών. Έτσι, η επιθεώρηση μεγάλων έργων θα εξελιχθεί σε μια απλή διαδικασία ρουτίνας με σημαντικά περιορισμένη διάρκεια και κόστος ολοκλήρωσης.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Καρλάυτης Μ., Κεπατσόγλου Κ., Σφήκας Ι. (2005). ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ. Αθήνα

Διονυσοπούλου Σακριστίαν Σ., Πετρίδου Α. (2023). Η Αναγέννηση των Έργων Γλυπτικής μέσα από τον Κόσμο της Τρισδιάστατης Ψηφιακής Μελέτης. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Κολοβού Β. (2018). ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΥΦΛΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μιχαηλίδης Γ. (2024). Αποτύπωση – Τεκμηρίωση - Μελέτη με τη Χρήση Σύγχρονων Μεθόδων Φωτογραμμετρίας & Laser Scanning του Καθολικού της Ιεράς Μονής Κοιμήσεως Θεοτόκου Ραγίου, Δήμου Φιλιατών, Π.Ε. Θεσπρωτίας. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Νεόφυτος Π., Χαράλαμπος Ε. (2022). Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΕΘΝΙΚΟ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ. (2020). Τεύχος 1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΥΡΙΑΣ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ. Αθήνα: ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Γελασάκης Δ. (2002). ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΡΑΙΣΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ. Βόλος: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Παναγιωτάκος Τ. Διαφάνειες Μαθήματος: Σύνθεση Ειδικών Κατασκευών Σκυροδέματος. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών

Τσίκας Π. (2019). Διαχείριση της Συντήρησης Οδικών Γεφυρών στον Κύκλο Ζωής τους υπό Σεισμικό Κίνδυνο. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών

ΦΕΚ 6430B/10-11-2023. (2023). Έγκριση Κανονισμού Επιθεώρησης και Συντήρησης Γεφυρών-Διοικητική Αρχή Γεφυρών. Αθήνα: Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών

Καλημέρη Μ. (2021). ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πανακάκη Μ. (2012-2013). Η Πεντάτοξη Μαρμάρινη Γέφυρα της Δούκισσας της Πλακεντίας στα Μελίσσια. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λεπιδάς Α. (2024). Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Βλαχάκης Β. (2022). Κατασκευή Ψηφιακού Διδύμου ως Σύστημα Παρακολούθησης Κυκλοφορίας. Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Βέργος Κ. (2015). Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων

Ξενόγλωσση

Crespi N., Drobot A., Minerva R. (2023). Springer Nature Switzerland

Edl M., Mizerak M., Trojan J. (2018). 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation

Διαδικτυακές πηγές

<http://www1.aegean.gr/gympeir/gefires.htm>

<https://www.myota.gr/2023/10/03/%CE%B1rtemis-tech-eng-3d-tunnel-inspection-m%CE%AF%CE%B1-%CF%83%CF%8D%CE%B3%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B7-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1-%CE%B5%CF%80%CE%B9/>

<https://biblus.accasoftware.com/en/bridge-digital-twin/>

<https://strucinspect.com/en/digital-twin/>

<https://info.qii.ai/blog/inspections-using-digital-twin-models-and-ai-for-bridge>

<https://www.dreiy.com/el/2022/01/20/%CF%8C%CF%80%CF%89%CF%82-%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BA%CE%B1%CE%BD-%CF%84%CE%B1-%CF%83%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD/>

<https://www.engineeringcivil.com/crazing-of-concrete-causes-and-prevention.html>

<https://www.nevadareadymix.com/concrete-tips/scaling-concrete-surfaces/>

<https://www.mapei.com/my/en/blog/technical-talk-details/2022/03/16/spalling-concrete-the-causes-and-control-repair-protection-methods>

<https://www.nitterhousemasonry.com/blog/what-is-efflorescence/>

https://www.concreteconstruction.net/how-to/repair/troubleshooting-exposed-reinforcing-steel_o

<https://www.ultratechcement.com/for-homebuilders/home-building-explained-single/descriptive-articles/understanding-the-types-of-cracks-in-concrete>

<https://fcconcreterepairs.com.au/water-leakage-in-concrete-slabs/>

https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFeSd3q3pnhfYBjzmjzbf;_ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVybA--/RV=2/RE=1736121335/RO=11/RU=https%3a%2f%2fwww.buellinspections.com%2fthe-essence-of-efflorescence%2f/RK=2/RS=9aZo8nH5BeNxKYVw8Bt57AD7chg-

https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFGTF2rHpnG6wzr4Kjzbf;_ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVybA--/RV=2/RE=1736121590/RO=11/RU=https%3a%2f%2fwww.beidoou.com%2fsolutions%2f5-concrete-structure-defects-causes-prevention-repair.html/RK=2/RS=me1OKtTX1YkiifD28kYz9XELGdI-