

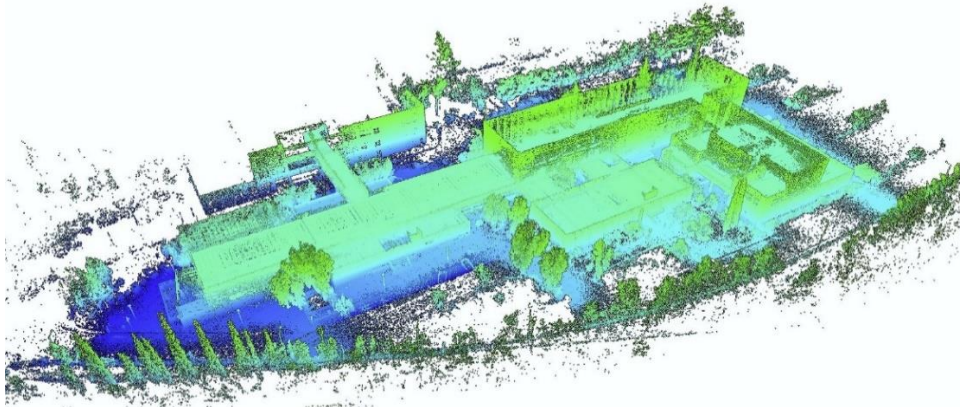


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Τοπογραφίας – ΣΑΤΜ-ΜΓ Ε.Μ.Π.  
Εργαστήριο Γεωδαισίας

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ (SLAM)**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΚΤΗΡΙΟ ΛΑΜΠΑΔΑΡΙΟΥ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μουρτζίνης Δ. Παναγιώτης**

Επιβλέποντες:

Ο. Α. Αραμπατζή

Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Γ. Α. Πηνιώτης

ΕΔΙΠ- Δρ. Μηχ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

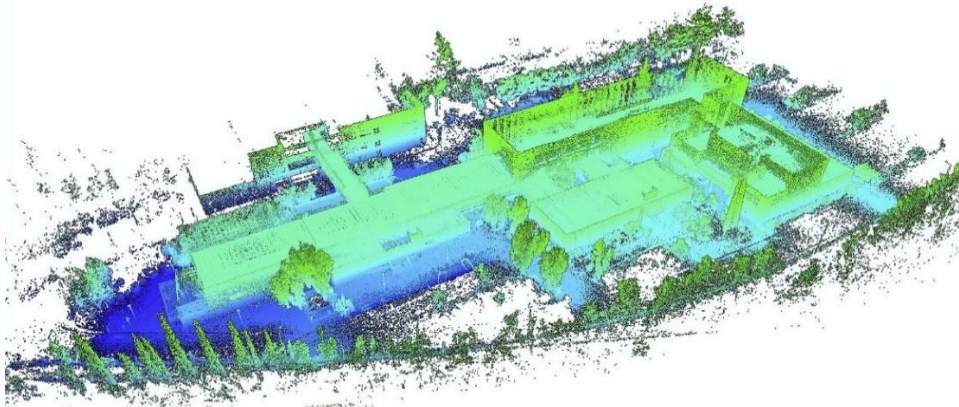
School of Civil Engineering

Department of Topography – S.R.S.G.E N.T.U.A.

Laboratory of Geodesy

# MEASUREMENT ACCURACY ASSESSMENT OF A SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING SYSTEM (SLAM)

APPLICATION IN THE BUILDING "LAMPADARIOU"



DIPLOMA THESIS

**Mourtzinis D. Panagiotis**

Supervisors:

O. A. Arabatzi

Assistant Professor N.T.U.A.

G. A. Piniotis

L.T.S.- Dr. Eng. N.T.U.A.

Athens, July 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Τοπογραφίας – ΣΑΤΜ-ΜΓ Ε.Μ.Π.  
Εργαστήριο Γεωδαισίας

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ (SLAM)  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΚΤΗΡΙΟ ΛΑΜΠΑΔΑΡΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μουρτζίνης Δ. Παναγιώτης**

Επιβλέποντες: Ο. Α. Αραμπατζή      Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.  
Γ. Α. Πηνιώτης      ΕΔΙΠ- Δρ. Μηχ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

*Ορθοδοξία Αραμπατζή*  
*Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π*  
.....  
(Υπογραφή)

*Σάββας Τριανταφύλλου*  
*Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.*  
.....  
(Υπογραφή)

*Ελισσάβη Τελειώνη*  
*Λέκτορας Ε.Μ.Π.*  
.....  
(Υπογραφή)

Αθήνα, Ιούλιος 2024

(Υπογραφή)

.....

**Παναγιώτης Δ. Μουρτζίνης**

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Μουρτζίνης, 2024

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής 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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σύγχρονος κόσμος της γεωμετρικής απεικόνισης και της ρομποτικής διαχείρισης περιβάλλοντος έχει γνωρίσει εκπληκτικές τεχνολογικές εξελίξεις χάρη στο ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την αυτοματοποίηση και την ψηφιακή καταγραφή του κόσμου. Στην καρδιά αυτών των εξελίξεων βρίσκεται η τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), η οποία επιτρέπει στα ρομπότ και σε άλλες μηχανές να αναπτύσσουν μια διαδραστική κατανόηση του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται, με σκοπό την αυτόνομη πλοήγηση.

Για την εφαρμογή SLAM έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα και μέθοδοι, κάνοντας χρήση οπτικών, υπερήχων ή LIDAR αισθητήρων για την παραγωγή τρισδιάστατου χαρτογραφικού υποβάθρου. Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα είναι το LIDAR SLAM, το οποίο χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα laser για να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο χάρτη του περιβάλλοντος. Το σύστημα LIDAR είναι γρήγορο, ακριβές και ιδανικό για εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος περιβαλλόντων και συνθηκών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι δυνατότητες της τεχνολογίας LIDAR SLAM στην αποτύπωση κτιρίων, χρησιμοποιώντας τον φορητό laser σαρωτή ZEB HORIZON της εταιρείας Geoslam. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ακρίβεια μέτρησής του και το κατά πόσο αυτή επηρεάζεται από τις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης και συνθήκες γεωμετρίας του περιβάλλοντος.

Η παραπάνω έρευνα υλοποιήθηκε, μέσω της διεξαγωγής μιας σειράς σαρώσεων, στο κτήριο Λαμπαδαρίου και στον εργαστηριακό χώρο Μετρολογίας της ΣΑΤΜ-ΜΓ, με σκοπό τη δημιουργία υποβάθρων που αποτυπώνουν την γεωμετρία του κτηρίου. Η ακρίβεια μέτρησης προέκυψε από τη σύγκριση της γεωμετρίας του κτηρίου από τη σάρωση, με αυτή που είχε καθοριστεί από τοπογραφική αποτύπωση.

Από τα αποτελέσματα, βρέθηκε ότι οι μετρήσεις είναι συνολικά εντός των ορίων ακρίβειας που καθορίζουν οι προδιαγραφές του σαρωτή, εφόσον τηρηθούν οι οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή. Η εργασία κατέληξε σε καταγραφή της μεθοδολογίας και των βέλτιστων πρακτικών που πρέπει να εφαρμόζονται κατά την διάρκεια των μετρήσεων, για την επίτευξη της ονομαστικής του ακρίβειας. Τέλος προτάθηκαν σενάρια για περαιτέρω ελέγχους, που αφορούν κυρίως τον τρόπο επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων σάρωσης, τροποποιώντας τις παραμέτρους του αλγόριθμου SLAM κατά την επίλυση, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης και τις συνθήκες γεωμετρίας του, με σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

# ABSTRACT

The modern world of geometric representation and robotic environmental management has experienced remarkable technological advances, thanks to the growing interest in automation and digital recording of the world. At the heart of these developments is SLAM technology (Simultaneous Localization and Mapping), which allows robots and other machines to develop an interactive understanding of the environment they are in, for the purpose of autonomous navigation.

Many systems and methods have been developed for the implementation of SLAM, using optical, ultrasonic, or LIDAR sensors to produce a three-dimensional mapping background. One of the most widespread systems is LIDAR SLAM, which uses a laser sensor to create a three-dimensional map of the environment. The LIDAR system is fast, accurate, and ideal for application in a wide range of environments and conditions.

In the present work, the capabilities of LIDAR SLAM technology are examined in buildings' mapping, using the portable laser scanner ZEB HORIZON of Geoslam company. Specifically, the accuracy of its measurements are examined and how it is affected by different measurement methods and environmental conditions.

The aforementioned research was conducted through a series of scans at the Lampadario building and the Metrology lab area with the aim of creating backgrounds that depict the geometry of the building. The accuracy of the measurements resulted from comparing the building's geometry from the scan, against the geometry determined by topographic mapping.

From the results, it was found that the measurements are within the limits of accuracy set by the scanner specifications, provided that the manufacturer's usage instructions are followed. The work concluded with a record of the methodology and best practices that should be applied during the measurements, to achieve the nominal accuracy. Finally, scenarios were proposed for further checks, mainly concerning the way of processing the raw scanning data, modifying the parameters of the SLAM algorithm during processing, depending on the measurement method and geometrical conditions of the environment, with the aim of improving the results.

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής κα. Ορθοδοξία Αραμπατζή, επίκουρη καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και για τη συνολική υποστήριξή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω κ. Γιώργο Πηνιώτη, ΕΔΙΠ- Δρ. Μηχ. της ΣΑΤΜ-ΜΓ Ε.Μ.Π. για την βοήθεια του κατά την διάρκεια των μετρήσεων και κατά την επεξεργασία τους, για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σάββα Τριανταφύλλου, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και την κυρία Ελισσάβητ Τελειώνη, Λέκτορα της ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ για τη συμμετοχή τους στην παρούσα εργασία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην εταιρία Landmark για τη διάθεση του σαρωτή ZEB Horizon της εταιρείας Geoslam και των λογισμικών GeoSLAM Hub και PointCab. Ειδικότερα θέλω να ευχαριστήσω τον ιδιοκτήτη κ. Γρηγόρη Λουτρίδη και τον κ. Γιάννη Ψαλτάκη, για τη βοήθειά τους στην επεξεργασία των δεδομένων και στον χρόνο που διέθεσαν για την επίλυση των αποριών που είχα πάνω στην τεχνολογία των οργάνων.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου και στους πολύ κοντινούς μου ανθρώπους, που με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b><i>i</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>ii</i></b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Πεδία εφαρμογής</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Τεχνολογία SLAM</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Αισθητήρες LIDAR για SLAM</b>	<b>4</b>
2.3.1. Είδη αισθητήρων	4
2.3.2. Χαρακτηριστικά αισθητήρων	5
<b>2.4. Αλγόριθμοι SLAM</b>	<b>6</b>
2.4.1. Αλγόριθμος Γραφήματος (graph based)	7
2.4.1.1. Front-end	9
2.4.1.2. Back-end	10
2.4. Σφάλματα τεχνολογίας SLAM	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ &amp; ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Σαρωτής laser ZEB HORIZON</b>	<b>14</b>
<b>3.2. Τεχνικές προδιαγραφές</b>	<b>15</b>
<b>3.3. Κανόνες ορθής χρήσης</b>	<b>16</b>
3.3.1. Το γεωμετρικό περιβάλλον	16
3.3.2. Κλείσιμο Βρόγχου	16
3.3.3. Μετάβαση μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικών περιβαλλόντων	17
3.3.4. Ταχύτητα Περιπατήματος	17
3.3.5. Ελάχιστη και Μέγιστη Εμβέλεια	17
3.3.6. Διάρκεια Σάρωσης	18
3.3.7. Μελέτη Περιοχών Έρευνας με Περιορισμένη ή Δύσκολη Πρόσβαση	18
3.3.8. Κίνηση Αντικειμένων στο γεωμετρικό περιβάλλον	18
<b>3.4. Μέθοδος μέτρησης με τοποσταθερά (reference points)</b>	<b>18</b>
<b>3.5. Λογισμικό GeoSLAM Hub</b>	<b>19</b>
3.5.1. Βασική ροή εργασιών	20
3.5.2. Παράμετροι επεξεργασίας αλγόριθμου SLAM	20
<b>3.6. Λογισμικό PointCab</b>	<b>21</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	<b>22</b>
<b>4.1. Περιγραφή μεθοδολογίας</b>	<b>22</b>
<b>4.2. Τοπογραφικές μετρήσεις</b>	<b>25</b>

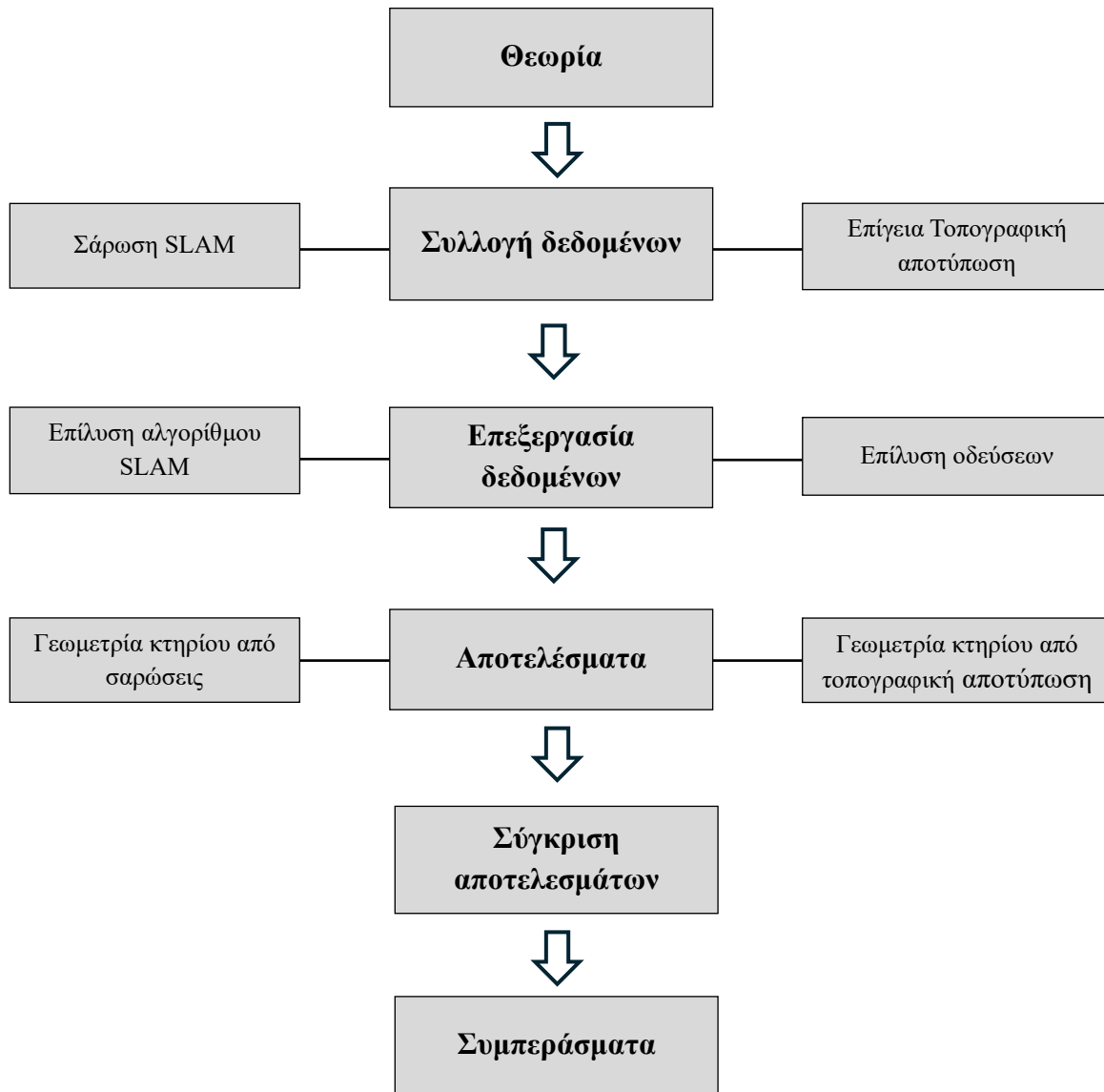


4.2.1.	Επίλυση οδεύσεων	25
4.2.1.1.	Κύρια όδευση (εξωτερική)	26
4.2.1.2.	1 <sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (υπόγειο)	26
4.2.1.3.	2 <sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)	27
4.2.1.4.	3 <sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)	27
4.2.2.	Συνόρθωση δικτύου	28
4.2.2.1.	Συνόρθωση οριζοντιογραφικού δικτύου ελέγχου	30
4.2.2.2.	Συνόρθωση κατακορύφου δικτύου ελέγχου	31
<b>4.3.</b>	<b>Σάρωση βάθρων εργαστηριακού χώρου Μετρολογίας</b>	<b>33</b>
4.3.1.	Οριζοντιογραφική ακρίβεια μετρήσεων	38
4.3.2.	Υψομετρική ακρίβεια μετρήσεων	39
4.3.3.	Τρισδιάστατη ακρίβεια μετρήσεων	40
4.3.3.1.	Διαγράμματα Απόκλισης ( <i>υι</i> ) - Οριζόντιας απόστασης (D)	41
<b>4.4.</b>	<b>Σάρωση κεντρικού κλιμακοστασίου κτηρίου Λαμπαδαρίου</b>	<b>42</b>
<b>4.5.</b>	<b>Πλήρης σάρωση κτηρίου Λαμπαδαρίου</b>	<b>44</b>
4.5.1.	Σενάριο 1: Επίλυση με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.	45
4.5.1.1.	Τομέας 1	45
4.5.1.2.	Τομέας 2	48
4.5.1.3.	Τομέας 3	51
4.5.1.4.	Τομέας 4	53
4.5.1.5.	Τομέας 5	55
4.5.1.6.	Τομέας 6	57
4.5.1.7.	Σύνοψη συμπερασμάτων επίλυσης πρωτογενών δεδομένων σάρωσης και γεωαναφοράς Σεναρίου 1	59
4.5.1.8.	Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης	61
4.5.2.	Σενάριο 2: Επίλυση γεωαναφοράς με σκοπό να επιτευχθεί $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$	64
4.5.2.1.	Τομέας 1	64
4.5.2.2.	Τομέας 2	66
4.5.2.3.	Τομέας 3	67
4.5.2.4.	Τομέας 4	67
4.5.2.5.	Τομέας 5	69
4.5.2.6.	Τομέας 6	69
4.5.2.7.	Σύνοψη συμπερασμάτων επίλυσης γεωαναφοράς ώστε $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$	69
4.5.3.	Σύνοψη συμπερασμάτων	73
<b>4.6.</b>	<b>Επίπτωση μη εφαρμογής οδηγιών ορθής χρήσης</b>	<b>75</b>
4.6.1.	Εξωτερική σάρωση με κλειστή όδευση	75
4.6.1.1.	Σενάριο 1: Επίλυση λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.	76
4.6.1.2.	Σενάριο 2: Επίλυση γεωαναφοράς με σκοπό να επιτευχθεί $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$	81
4.6.1.3.	Σύνοψη συμπερασμάτων	85
4.6.2.	Εξωτερική σάρωση κτηρίου Λαμπαδαρίου με ανοιχτή όδευση	87
4.6.2.1.	Επίλυση με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.	87
4.6.2.2.	Σύνοψη συμπερασμάτων	91
<b>4.7.</b>	<b>Κατά μήκος σάρωση κτηρίου</b>	<b>93</b>
4.7.1.	Εντοπισμός σφαιρών με κλειστή όδευση	93
4.7.1.1.	Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης	95
4.7.2.	Εντοπισμός σφαιρών με ανοιχτή όδευση.	96
4.7.2.1.	Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης	98
4.7.3.	Σύνοψη συμπερασμάτων	99

<b>5.1. Συμπεράσματα</b>	<b>102</b>
<b>5.2. Προτάσεις</b>	<b>104</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>105</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Λογισμικό GeoSLAM Hub</b>	<b>108</b>
1. Βασική ροή εργασιών	108
1.1. Δημιουργία εργασίας	108
1.2. Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων	108
1.3. Θέση αποτελεσμάτων	110
1.4. Επανεπεξεργασία	110
1.5. Εξαγωγή δεδομένων	111
2. Παράμετροι επεξεργασίας αλγόριθμου SLAM	112
2.1. Τοπικές παράμετροι (local)	112
2.2. Γενικές παράμετροι (global)	114
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Λογισμικό PointCab</b>	<b>116</b>
Υπολογιστής Μετασχηματισμού (transform calculator)	116
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Επίλυση οδεύσεων</b>	<b>117</b>
1. Κύρια οδευση (εξωτερική)	117
2. 1 <sup>η</sup> δευτερεύουσα οδευση (υπόγειο)	118
3. 2 <sup>η</sup> δευτερεύουσα οδευση (ισόγειο)	118
4. 3 <sup>η</sup> δευτερεύουσα οδευση (ισόγειο)	119
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Εξαγωγή σχεδίων</b>	<b>120</b>
Εξαγωγή σχεδίων κτηρίου Λαμπαδαρίου από το τρισδιάστατο νέφος σημείων	120
Κατόψεις	120
Όψεις	124
Τομές	125
Μεγάλο αμφιθέατρο	126
Μικρό αμφιθέατρο	127

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία με τη μορφή διαγράμματος.



Εικόνα 1: Διάγραμμα μεθοδολογίας

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η ακόλουθη:

**Κεφάλαιο 1**, που αποτελεί το εισαγωγικό κομμάτι, όπου παρουσιάζεται το αντικείμενο της παρούσας εργασίας και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την επίτευξη του σκοπού της.

**Κεφάλαιο 2**, όπου παρουσιάζεται η θεωρία της τεχνολογίας SLAM, τα είδη των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται καθώς και οι βασικές αρχές λειτουργίας του αλγορίθμου SLAM.

**Κεφάλαιο 3**, όπου γίνεται παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στις σαρώσεις καθώς και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων. Αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φορητού laser σαρωτή ZEB HORIZON και οι κανόνες ορθής χρήσης του, που δίνονται από τον κατασκευαστή. Επίσης γίνεται παρουσίαση των βασικών λειτουργιών και παραμέτρων του λογισμικού GeoSLAM Hub, με το οποίο γίνεται η επίλυση των πρωτογενών δεδομένων της σάρωσης για την παραγωγή τρισδιάστατου νέφους σημείων. Τέλος παρουσιάζεται ο τρόπος γεωαναφοράς των νεφών σημείων με το λογισμικό PointCab.

**Κεφάλαιο 4**, όπου γίνεται παρουσίαση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Τοπογραφικές μετρήσεις: Από τις μετρήσεις αυτές θα καθοριστεί η γεωμετρία του κτηρίου Λαμπαδαρίου, η οποία και θα θεωρηθεί ως η βάση σύγκρισης για τις μετρήσεις του σαρωτή, ώστε να προκύψει η ακρίβεια μέτρησης του.
- Σάρωση βάθρων εργαστηριακού χώρου Μετρολογίας: Μετρήθηκαν οι αποστάσεις και οι υψομετρικές διαφορές κάποιων από τα βάθρα με τον σαρωτή και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα γνωστά μεγέθη του εργαστηρίου. Με αυτό τον τρόπο έγινε εκτίμηση της ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον που τα μετρούμενα μεγέθη είναι απόλυτα ορισμένα.
- Σάρωση κεντρικού κλιμακοστασίου κτηρίου Λαμπαδαρίου: Μετρήθηκε το κεντρικό κλιμακοστάσιο, όπου παρουσιάζονταν οι μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές, για να ελεγχθεί η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή κατά τον κατακόρυφο άξονα.
- Πλήρης σάρωση του κτηρίου Λαμπαδαρίου: Έγινε πλήρης σάρωση του κτηρίου, ακολουθώντας όλες τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, ώστε να προσδιοριστεί η πραγματική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή.
- Σάρωση εξωτερικής περιμέτρου κτηρίου Λαμπαδαρίου: Μετρήθηκε η περίμετρος του κτηρίου σε διάφορα σενάρια, μη εφαρμόζοντας όλες τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, για να διαπιστωθεί η επίπτωση που έχουν στην ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή.
- Κατά μήκος σάρωση κτηρίου: Μετρήθηκε το κτήριο κατά τη διαμήκη διεύθυνση του σε διάφορα σενάρια, μη εφαρμόζοντας όλες τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, για να διαπιστωθεί η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή σε ένα δυσμενές περιβάλλον.

**Κεφάλαιο 5**, όπου γίνεται παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν όσο αναφορά την ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή και γίνεται περιγραφή των ορθών πρακτικών χρήσης που πρέπει να εφαρμοστούν για να επιτευχθεί η ονομαστική ακρίβεια μέτρησής του. Τέλος προτείνονται περαιτέρω έλεγχοι, που αφορούν κυρίως τον τρόπο επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων σάρωσης, τροποποιώντας τις παραμέτρους του αλγόριθμου SLAM κατά την επίλυση, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, με σκοπό τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), τα πεδία εφαρμογής της, οι βασικές αρχές λειτουργίας της, καθώς και τα είδη σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της.

### 2.1. Πεδία εφαρμογής

Το SLAM ήταν επί αρκετά έτη αντικείμενο έρευνας. Όμως, η αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων, καθώς και η ανάπτυξη των οικονομικά προσιτών αισθητήρων, όπως είναι οι κάμερες και οι συσκευές laser, έδωσαν στο SLAM προβάδισμα στις πρακτικές εφαρμογές σε έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό πεδίων.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η εκ του μηδενός δημιουργία χάρτη του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ο ταυτόχρονος προσδιορισμός της θέσης (mapping) του αισθητήρα σε αυτόν τον χάρτη (localization). Για τον λόγο αυτό η μέθοδος αυτή καθίσταται ιδανική για την πλοήγηση ή τη χαρτογράφηση πολύπλοκων περιβαλλόντων ή περιοχών όπου δεν είναι δυνατή η χρήση δεκτών GNSS.

Η τεχνολογία SLAM εφαρμόζεται ήδη:

- Στις κατασκευές για την αποτύπωση πολύπλοκων κτιρίων, δυσπρόσιτων υπόγειων χώρων, σηράγγων, ορυχείων, μεταλλείων, κτλ.
- Στην περιβαλλοντική παρακολούθηση για τη μέτρηση βιοποικιλότητας σε δύσβατα δάση ή την καταγραφή σε επικίνδυνες περιοχές μετά από φυσικές καταστροφές.
- Στις υποβρύχιες εξερευνήσεις για πλοήγηση και αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα, εκεί όπου δεν υπάρχει σήμα GNSS.
- Στα αυτόνομα οχήματα για την πλοήγηση και τον έλεγχό τους, όπως αυτοκίνητα, φορτηγά και drones. Η χαρτογράφηση και η ακριβής τους τοποθέτηση επιτρέπουν σε αυτά τα οχήματα να αντιλαμβάνονται τον χώρο γύρω τους, να αποφεύγουν εμπόδια και να προσανατολίζονται σε περίπλοκα περιβάλλοντα.
- Στη βιομηχανία όπου ρομπότ χρησιμοποιούν τεχνολογία SLAM για την αυτόματη μετακίνηση και την εκτέλεση διαδικασιών αποθήκευσης, μεταφοράς ή συναρμολόγησης. Η ακριβής χαρτογράφηση, τους επιτρέπει να εργάζονται αποτελεσματικά και ανεξάρτητα δίπλα σε ανθρώπους ή άλλα ρομπότ.
- Στις διαστημικές εφαρμογές όπου τα διαστημικά rover χρησιμοποιούν SLAM για την εξερεύνηση άλλων πλανητών. Η τεχνολογία, τους επιτρέπει να πλοηγούνται σε απόκοσμα τοπία, να αναγνωρίζουν εδαφικά χαρακτηριστικά και να εκτελούν έρευνες με μεγάλη ακρίβεια.
- Σε πληθώρα άλλων τομέων, όπως στην εγκληματολογία, στην προσομοίωση ατυχημάτων, σε οικιακές συσκευές (π.χ. σκούπες καθαρισμού), κτλ.

## 2.2. Τεχνολογία SLAM

Η τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) αποτελεί έναν κρίσιμο κλάδο στο πεδίο της ρομποτικής, της αυτοματοποιημένης πλοήγησης και της χαρτογράφησης. Πρόκειται για μια τεχνική που επιτρέπει σε ένα ρομπότ, σε ένα αυτόνομο όχημα και σε ένα σαρωτή να κατανοεί το περιβάλλον του και παράλληλα να προσδιορίζει τη θέση του εντός αυτού του περιβάλλοντος, και αυτό σε πραγματικό χρόνο. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί αυτό, θα πρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, όπου ο σαρωτής τοποθετείται αρχικά σε μια άγνωστη θέση, εντός άγνωστου περιβάλλοντος και στη συνέχεια θα πρέπει να προκύψει ένας χάρτης του περιβάλλοντος αυτού με ταυτόχρονο προσδιορισμό της θέσης του σαρωτή εντός αυτού του χάρτη.

Ο ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM) μπορεί να υλοποιηθεί μέσω διαφόρων τεχνικών προσέγγισης, ανάλογα με το προβλεπόμενο περιβάλλον και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι κυριότερες τεχνικές περιλαμβάνουν:

- **Multi-sensor SLAM:** Χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός αισθητήρων (π.χ., LIDAR, κάμερες, υπερήχων, GPS) για τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον.
- **Visual SLAM:** Εστιάζει στη χρήση οπτικών αισθητήρων (κυρίως κάμερες) για την αναγνώριση και παρακολούθηση σημείων αναφοράς στο περιβάλλον. Αυτό συχνά συμπληρώνεται με αλγόριθμους που είναι αποδοτικοί στην επεξεργασία εικόνων.
- **LIDAR SLAM:** Χρησιμοποιείται η τεχνολογία LIDAR (Light Detection and Ranging) για τη συλλογή τρισδιάστατων πληροφοριών από το περιβάλλον, προσφέροντας ακριβή δεδομένα για την χαρτογράφηση του χώρου και την τοποθέτηση του ρομπότ.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τεχνικής LIDAR SLAM.

## 2.3. Αισθητήρες LIDAR για SLAM

### 2.3.1. Είδη αισθητήρων

Οι αισθητήρες LIDAR αποτελούν βασικό συστατικό των συστημάτων SLAM, παρέχοντας τα απαραίτητα περιβαλλοντικά δεδομένα για τη δημιουργία χαρτών και τον εντοπισμό θέσης. Υπάρχουν αρκετοί τύποι αισθητήρων, ο καθένας με τις δικές του μοναδικές λειτουργίες και πλεονεκτήματα. Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή SLAM εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιθυμητή εμβέλεια, η ανάλυση, το πεδίο ορατότητας και το κόστος.

- **Μηχανικοί σαρωτές LIDAR:** Είναι από τους πλέον κοινούς τύπους αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές SLAM. Αποτελούνται από έναν πομπό laser και έναν ανιχνευτή τοποθετημένο σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα, η οποία επιτρέπει στον αισθητήρα να σαρώνει το περιβάλλον κατευθύνοντας τους παλμούς του laser σε ένα ευρύ πεδίο ορατότητας. Οι μηχανικοί σαρωτές μπορούν να παρέχουν νέφη σημείων υψηλής ανάλυσης με εμβέλεια έως 200 μέτρα, ανάλογα με το μοντέλο και διαμόρφωση του αισθητήρα.

- **Στερεάς Κατάστασης LIDAR (Solid-State):** Οι αισθητήρες στερεάς κατάστασης αντιπροσωπεύουν μια νεότερη γενιά τεχνολογίας LIDAR που δεν βασίζεται σε κινούμενα μέρη για τη σάρωση του περιβάλλοντος. Αντ' αυτού, οι αισθητήρες στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούν ηλεκτρονικές μεθόδους κατεύθυνσης της δέσμης, όπως οπτικά φασματικά συστήματα ή μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) καθρεφτών, για να κατευθύνουν τους παλμούς laser στο πεδίο θέασης. Οι αισθητήρες στερεάς κατάστασης προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα έναντι των αισθητήρων με μηχανική σάρωση, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης αντοχής, της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και του μειωμένου μεγέθους και βάρους.
- **Flash LIDAR:** Οι αισθητήρες αυτοί είναι άλλος ένας τύπος τεχνολογίας στερεάς κατάστασης που στοχεύει την περιοχή με έναν μόνο, ευρυγώνιο παλμό laser, καταγράφοντας το ανακλώμενο φως με έναν δισδιάστατο αισθητήρα. Οι αισθητήρες Flash LIDAR μπορούν να προσφέρουν ταχείες, μονοπλευρικές μετρήσεις του περιβάλλοντος, κάτι που τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα πρόσκτησης δεδομένων, όπως η αεροπορική χαρτογράφηση ή η ανίχνευση εμποδίων σε υψηλής ταχύτητας αυτόνομα οχήματα.

### 2.3.2. Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα LIDAR για μια εφαρμογή SLAM είναι ουσιαστική για την επίτευξη της καλύτερης απόδοσης και για την ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων. Ακολουθεί παρουσίαση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών των αισθητήρων:

- **Εμβέλεια και Ανάλυση (Range and Resolution):** Η εμβέλεια και η ανάλυση ενός αισθητήρα LIDAR επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια των παραγόμενων χαρτών και τον προσδιορισμό της θέσης εντός αυτών των χαρτών. Μια μεγαλύτερη εμβέλεια επιτρέπει στο σύστημα SLAM να ανιχνεύει και να χαρτογραφεί αντικείμενα σε μεγαλύτερες αποστάσεις, κάτι που μπορεί να είναι κρίσιμο όσον αφορά εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες. Οι αισθητήρες LIDAR υψηλής ανάλυσης μπορούν να παρέχουν πιο λεπτομερή νέφη σημείων, επιτρέποντας την αναγνώριση μικρότερων ή πιο περίπλοκων χαρακτηριστικών στο περιβάλλον.
- **Πεδίο Όρασης (Field of View):** Το πεδίο όρασης ενός αισθητήρα LIDAR καθορίζει τη χωρική έκταση του περιβάλλοντος που μπορεί να καταγραφεί από τον αισθητήρα σε μία μοναδική σάρωση. Ένα ευρύ πεδίο όρασης επιτρέπει στο σύστημα SLAM να χαρτογραφεί μεγαλύτερες περιοχές του περιβάλλοντος και να ανιχνεύει αντικείμενα σε διάφορες γωνίες σχετικά με τον αισθητήρα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν μια ολοκληρωμένη κατανόηση του περιβάλλοντος, όπως η αποφυγή συγκρούσεων σε αυτόνομα οχήματα ή η χαρτογράφηση μεγάλων και πολύπλοκων χώρων.
- **Ρυθμός δειγματοληψίας:** Ο ρυθμός δειγματοληψίας συλλογής δεδομένων ενός αισθητήρα LIDAR μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος SLAM, ιδιαίτερα σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου τα αντικείμενα και τα σημεία αναφοράς μπορεί να αλλάζουν γρήγορα. Ένας υψηλότερος ρυθμός δειγματοληψίας επιτρέπει στο σύστημα SLAM να αποτυπώνει συχνότερα στιγμιότυπα του περιβάλλοντος, παρέχοντας μία πιο ακριβή αναπαράσταση των μεταβαλλόμενων συνθηκών. Οι αισθητήρες με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας μπορούν να παρέχουν δεδομένα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο,

γεγονός κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη λήψη αποφάσεων, όπως η ανίχνευση και η αποφυγή εμποδίων σε γρήγορα κινούμενα αυτόνομα οχήματα.

Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα LIDAR για μια συγκεκριμένη εφαρμογή SLAM, είναι ουσιώδες να υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στις απαιτήσεις απόδοσης, το κόστος και την πολυπλοκότητά του. Οι αισθητήρες υψηλού επιπέδου με μεγάλες εμβέλειες, υψηλές αναλύσεις και ευρείες γωνίες οπτικού πεδίου είναι πιο ακριβοί και απαιτούν πιο πολύπλοκες διαδικασίες ενσωμάτωσης και βαθμονόμησης. Αντίθετα, οι φθηνότεροι αισθητήρες έχουν μειωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης αλλά είναι πιο προσιτοί και ευκολότεροι στην ενσωμάτωση σε ένα σύστημα SLAM.

## 2.4. Αλγόριθμοι SLAM

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πληθώρα διαφορετικών αλγορίθμων για την επίτευξη αξιόπιστης λύσης στο πρόβλημα SLAM. Οι πιο διαδεδομένοι από αυτούς αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω, ενώ στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική παρουσίαση του Αλγόριθμου Γραφήματος (graph based).

**Φίλτρο Kalman (KF):** Είναι ένας αλγόριθμος που λειτουργεί σε δύο βήματα: ένα βήμα πρόβλεψης και ένα βήμα ενημέρωσης. Ο αλγόριθμος αυτός υποθέτει ότι α) η επόμενη κατάσταση εξαρτάται γραμμικά από την προηγούμενη με προσθήκη Gaussian θορύβου, β) η πιθανότητα μέτρησης πρέπει να είναι γραμμική με προσθήκη Gaussian θορύβου και γ) η αρχική κατάσταση ακολουθεί κανονική κατανομή. Ωστόσο στην πράξη η διαδικασία της μετάβασης από την προηγούμενη κατάσταση στην επόμενη και η πιθανότητα μέτρησης είναι μη-γραμμικές. Το **Διευρυμένο Φίλτρο Kalman (EKF)** αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα υποθέτοντας ότι η μετάβασης κατάστασης και οι μετρήσεις είναι όλες μη-γραμμικές. Το φίλτρο Kalman έχει ένα πολύ σημαντικό περιορισμό. Εκτός ότι υποθέτει Gaussian θόρυβο και γενικότερα Gaussian κατανομές, υποστηρίζει μόνο κατανομές με ένα μόνο μέγιστο. Αυτός ο μαθηματικός περιορισμός που επιβάλλει το Φίλτρο Kalman είναι ιδιαίτερα αυστηρός, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου δύο διαφορετικά ορόσημα δεν μπορούν να διαχωριστούν (για παράδειγμα δύο ίδιες πόρτες σε διαφορετικά σημεία του χώρου). Μια τέτοια μέτρηση θα δημιουργήσει μια κατανομή η οποία θα έχει μέγιστα σε τουλάχιστον δύο σημεία του χώρου, οπότε η υπόθεση Kalman για απλή (με ένα μέγιστο) Gaussian κατανομή, καταρρέει. Συνεπώς το πρόβλημα της αντιστοίχισης (correspondence) δεν αντιμετωπίζεται από το φίλτρο Kalman.

**Μεγιστοποίηση Προσδοκίας (Expectation Maximization Algorithms):** Αυτή η οικογένεια αλγορίθμων, αναπτύχθηκε ως εναλλακτική του φίλτρου Kalman. Βασίζονται στην υπολογισμό της μεγιστοποίησης της πιθανοφάνειας με έμμεσες (latent) - όχι άμεσα παρατηρήσιμες μεταβλητές. Το πλεονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι ότι αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα αποτελεσματικά το πρόβλημα της αντιστοίχισης ακόμα και σε ιδιαίτερα δύσκολα περιβάλλοντα, όπου όλα σχεδόν τα χαρακτηριστικά είναι ίδια και δεν μπορούν να διαχωριστούν εύκολα. Οι αλγόριθμοι αυτοί δεν έχουν το στοιχείο της αβεβαιότητας στη μορφή του φίλτρου Kalman, δηλαδή χρησιμοποιώντας Gaussian πιθανότητες.



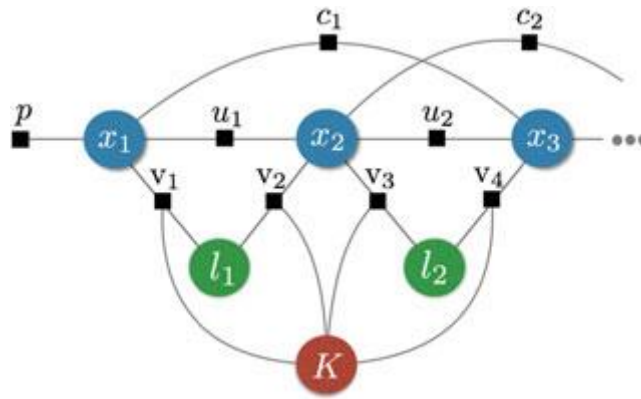
**Φίλτρο Σωματιδίων (Partical Filter):** Το Φίλτρο Σωματιδίων αναπαριστά την εκτίμηση του χάρτη ως σύνολο σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μια πιθανή κατάσταση. Τα σωματίδια με υψηλότερα βάρη θεωρούνται ότι αντανακλούν σε μεγαλύτερο βαθμό την πραγματική κατάσταση. Καθώς συλλέγεται περισσότερη πληροφορία, τα σωματίδια αναβαθμίζονται με βάση την αντιστοιχία τους με τις παρατηρούμενες μετρήσεις. Ένα βασικό πλεονέκτημα του Φίλτρου Σωματιδίων είναι ότι έχει πολύ λίγες υποθέσεις για το υπόβαθρο, επιτρέποντας να χειρίζεται μη-γραμμικά συστήματα και μη-Gaussian θορύβους (σε αντίθεση με το Φίλτρο Kalman).

**FastSLAM:** Είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος που συνδυάζει στοιχεία από το Διευρυμένο Φίλτρο Kalman και το Φίλτρο Σωματιδίων. Το FastSLAM διαχωρίζει το πρόβλημα SLAM σε ένα πρόβλημα τοποθέτησης σαρωτή και μια συλλογή από προβλήματα εκτίμησης της θέσης ορόσημων που εξαρτώνται από την εκτίμηση της θέσης του σαρωτή. Το FastSLAM χρησιμοποιεί ένα τροποποιημένο φίλτρο σωματιδίων για την εκτίμηση της τροχιάς του σαρωτή. Κάθε σωματίδιο διαθέτει  $K$  φίλτρα Kalman που εκτιμούν τις  $K$  θέσεις των ορόσημων που εξαρτώνται από την εκτίμηση της τροχιάς. Ο τελικός αλγόριθμος είναι ένα παράδειγμα του φίλτρου σωματιδίων Rao-Blackwellized.

### 2.4.1. Αλγόριθμος Γραφήματος (graph based)

Ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους είναι ο Αλγόριθμος Γραφήματος (*graph-based SLAM*) και η επικρατέστερη παραλλαγή του αναφέρεται ως Βελτιστοποίηση Γραφήματος Πόζας (*pose graph optimization*). Η βασική παραδοχή είναι ότι η θέση του σαρωτή και των ορόσημων μπορούν να θεωρηθούν ως σημεία σε ένα γράφημα. Κάθε διαδοχικό ζευγάρι θέσεων  $x_{t-1}, x_t$  συνδέεται από την πληροφορία της μεταξύ τους κίνησης  $u_t$ . Επιπλέον συνδέσεις υπάρχουν για κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε θέση  $x_t$  και σε ορόσημο  $l_i$ , υποθέτοντας ότι στη χρονική στιγμή  $t$  ο σαρωτής εντόπισε το ορόσημο  $i$ . Οι συνδέσεις αυτές αποτελούν περιορισμούς με βάση τους οποίους πραγματοποιείται η εκτίμηση του χάρτη του περιβάλλοντος και της τροχιάς του σαρωτή.

Το πρόβλημα περιγράφεται στο παρακάτω γράφημα όπου: σε μπλε κύκλο είναι η θέση του σαρωτή στα χρονικά διαστήματα  $(x_1, x_2, \dots)$ , σε πράσινο κύκλο είναι η θέση των ορόσημων  $(l_1, l_2, \dots)$ , με κόκκινο κύκλο δηλώνονται οι παράμετροι που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση των αισθητήρων. Οι μεταβλητές παρουσιάζονται με μαύρα τετράγωνα όπου: με ετικέτα  $(u_i)$  δηλώνονται οι παρατηρήσεις κίνησης από αδρανειακή μονάδα (IMU), που φέρουν τα συστήματα SLAM με ετικέτα  $(v_i)$  δηλώνονται οι παρατηρήσεις απόστασης (LIDAR), με ετικέτα  $(c_i)$  δηλώνονται κλειστοί βρόγχοι και με ετικέτα  $(p)$  δηλώνονται οι αρχικές συνθήκες.

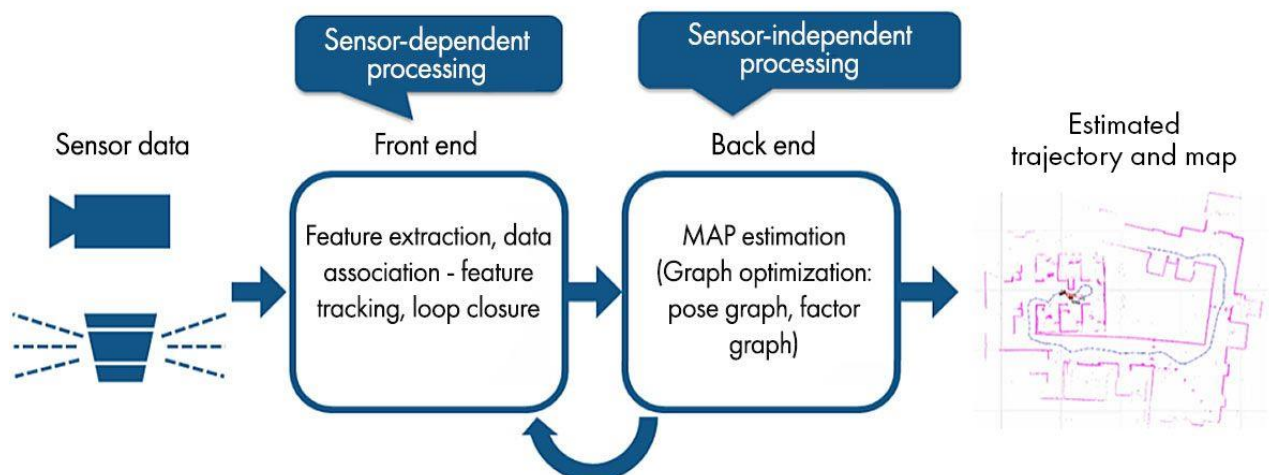


Εικόνα 2: Αλγόριθμος SLAM ως Βελτιστοποίηση Γραφήματος Πόζας (pose graph optimization).

Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Γραφήματος Πόζας (pose graph optimization) αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- Το βήμα πρόβλεψης, γνωστό επίσης ως *front end*, στο οποίο εκτιμάται η νέα θέση του συστήματος SLAM βάσει της προηγούμενης θέσης και των πληροφοριών κίνησης που παρέχονται από τους αισθητήρες.
- Το βήμα διόρθωσης, γνωστό επίσης ως *back end*, όπου βελτιώνει την προβλεπόμενη θέση χρησιμοποιώντας μετρήσεις από το περιβάλλον, όπως οι αποστάσεις σε τοπόσημα (τοίχοι, γωνίες ή άλλα διακριτά χαρακτηριστικά στο περιβάλλον) που ανιχνεύονται από τον αισθητήρα LIDAR.

Εκτελώντας επαναληπτικά βήματα πρόβλεψης και διόρθωσης, οι αλγόριθμοι SLAM μπορούν να ενημερώνουν συνεχώς τη θέση του σαρωτή και τον χάρτη του περιβάλλοντος αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ακρίβειά του. Ο παραγόμενος χάρτης μπορεί να αναπαρασταθεί με διάφορες μορφές, με συνηθέστερη αυτή του τρισδιάστατου νέφους σημείων.



Εικόνα 3: Διαδικασίες front-end και back-end αλγορίθμου SLAM (MathWorks).

### 2.4.1.1. Front-end

Το LIDAR SLAM, είναι μια διαδικασία που επιτρέπει στο σαρωτή να δημιουργήσει χάρτη ενός άγνωστου περιβάλλοντος καθώς ταυτόχρονα προσδιορίζεται η θέση τους μέσα σε αυτόν τον χάρτη. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται σε αισθητήρες LIDAR (Light detection and ranging), οι οποίοι εκπέμπουν παλμούς laser και μετρούν το χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψουν αφού χτυπήσουν αντικείμενα στο πέρασμά τους, προσδιορίζοντας έτσι την απόσταση. Οι τιμές εξόδου από τους αισθητήρες laser είναι γενικά δεδομένα νέφους σημείων 2D (x, y) ή 3D (x, y, z) υψηλής ακρίβειας. Ταυτόχρονα καταγράφονται και δεδομένα κίνησης μέσω αισθητήρα μέτρησης της αδράνειας (IMU) ή άλλο σύστημα οδομετρίας.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, σε κάθε «βήμα» δημιουργείται μια πόζα αναπαριστώντας τη θέση και τον προσανατολισμό του σαρωτή στο περιβάλλον, η οποία προέκυψε από την αναγνώριση τοπόσημων (χαρακτηριστικά σημεία) από τις μετρήσεις του αισθητήρα LIDAR και την καταγραφή δεδομένων κίνησης από την αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU). Καθώς κινείται ο σαρωτής στο περιβάλλον καταγράφονται διαδοχικές πόζες. Αρχικά ο αλγόριθμος, αντιπαραβάλλει την κάθε επόμενη πόζα με την προηγούμενη συγκρίνοντας τα μεταξύ τους παρατηρούμενα τοπόσημα λαμβάνοντας υπόψιν του και τα δεδομένα κίνησης, συσχετίζοντας τους μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο εκτιμάται το πόσο έχει μετακινηθεί ο σαρωτής από την μια πόζα στην άλλη.

Η συνένωσή τους ανά ζεύγος παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά μόνο για μικρές ή μεσαίες αποστάσεις, καθώς λάθη στην κατά ζεύγη ευθυγράμμιση προκαλούν την εκτιμώμενη πόζα να «διολισθαίνει» με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός λανθασμένου χάρτη. Το αθροιστικό σφάλμα στη στοίχιση, οδηγεί σε έναν χάρτη που έχει δύο αναπαραστάσεις της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές θέσεις στον χώρο. Αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα κλεισίματος βρόγχου. Το κλείσιμο βρόγχου ουσιαστικά αναφέρεται στο πέρασμα του σαρωτή από περιοχές που έχει ήδη επισκεφθεί προηγουμένως. Μόλις εντοπιστεί ένας βρόγχος, η νέα αντιστοιχία μεταξύ των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετος περιορισμός στη γραφική παράσταση. Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται στην εύρεση της σωστής σχετικής θέσης ανάμεσα σε δύο πόζες, βάσει των κοινών περιοχών που έχουν παρατηρηθεί από καθεμιά από αυτή.

Κάθε πόζα που επεξεργάζεται, προστίθεται στον υφιστάμενο χάρτη και έτσι με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ο ενιαίος χάρτης του περιβάλλοντος ταυτόχρονα με τη διενέργεια των μετρήσεων. Στο πλαίσιο αυτό επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση του περιβάλλοντος και η εκτίμηση της θέσης του σαρωτή εντός του.

Το στάδιο αυτό ονομάζεται front-end και αφορά την άμεση επεξεργασία δεδομένων από τους αισθητήρες. Ο κύριος στόχος είναι η εξαγωγή τοπόσημων από τα αρχικά δεδομένα και η εκτίμηση της σχετικής κίνησης μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων των αισθητήρων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

- **Πρόσκτηση Δεδομένων:** Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων από διάφορους αισθητήρες, όπως LiDAR, κάμερες, IMUs κ.λπ.
- **Εντοπισμός Χαρακτηριστικών:** Από τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί, ανιχνεύονται τα τοπόσημα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την ταυτοποίηση γεωμετρικών δομών όπως γραμμές, επίπεδα ή πιο πολύπλοκα σχήματα.

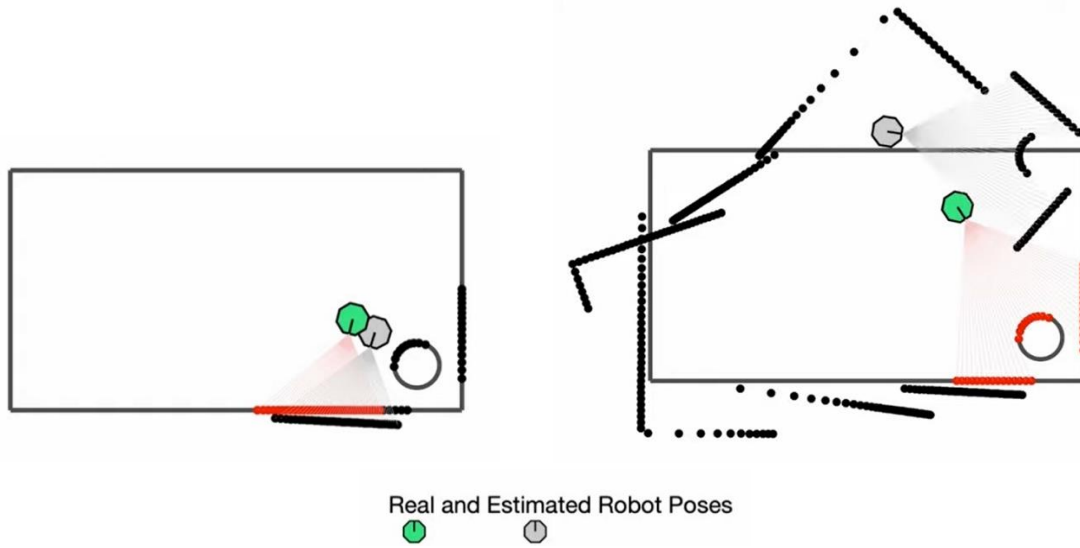
- **Αντιστοίχιση Χαρακτηριστικών και Συσχέτιση Δεδομένων:** Αυτό περιλαμβάνει την ταυτοποίηση αντιστοιχιών μεταξύ χαρακτηριστικών που παρατηρούνται σε διαδοχικές μετρήσεις αισθητήρων. Αυτό είναι κρίσιμο για την παρακολούθηση των θέσεων των χαρακτηριστικών με την πάροδο του χρόνου και για την εκτίμηση της κίνησης.
- **Αρχική Εκτίμηση Κίνησης:** Χρησιμοποιώντας τα αντιστοιχισμένα χαρακτηριστικά, το σύστημα υπολογίζει τη σχετική κίνηση (δηλαδή, πόσο έχει μετακινηθεί ο αισθητήρας μεταξύ των παρατηρήσεων). Αυτό γίνεται συνήθως με αλγόριθμους όπως είναι οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι μετασχηματισμού πλησιέστερου σημείου (ICP) και κανονικής κατανομής (NDT).
- **Ολοκλήρωση Αισθητήρων:** Εάν χρησιμοποιούνται πολλαπλές μορφές αισθητήρων, αυτό το βήμα περιλαμβάνει την σύντηξη των δεδομένων από τις διαφορετικές πηγές για να παραχθεί μια ενοποιημένη εκτίμηση κίνησης και θέσεων χαρακτηριστικών.

#### 2.4.1.2. Back-end

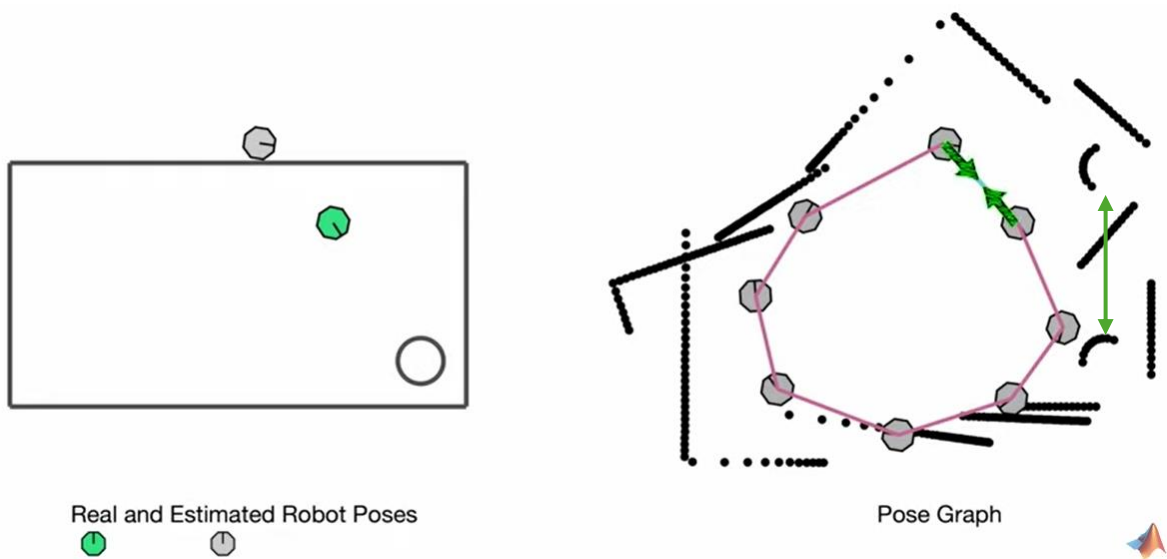
Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του χάρτη και της τροχιάς με βάση όλα τα συλλεγόμενα δεδομένα, βελτιώνοντας και διορθώνοντας τις αρχικές εκτιμήσεις που έχουν παραχθεί κατά το στάδιο του front-end. Τα κύρια σημεία της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- **Βελτιστοποίηση Χάρτη:** Εδώ, ο στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί ο ενιαίος χάρτης χρησιμοποιώντας τους τοπικούς χάρτες που δημιουργούνται κατά το στάδιο του front-end. Τεχνικές όπως το κλείσιμο βρόχου (ανίχνευση όταν ο αισθητήρας επιστρέψει σε μια προηγουμένως χαρτογραφημένη περιοχή) και η Βελτιστοποίηση Γραφήματος Πόζας χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των αποκλίσεων που έχουν συσσωρευτεί από τις εκτιμήσεις κατά το στάδιο front-end.
- **Διαχείριση Αποκλίσεων και Αβεβαιότητας:** Στο στάδιο αυτό γίνεται διαχείριση των δεδομένων, αποφασίζοντας ποια πρέπει να διατηρηθούν, να ενημερωθούν ή να απορριφθούν, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αβεβαιότητες και οι αποκλίσεις στον χάρτη και στον προσδιορισμό της τροχιάς.
- **Κλιμάκωση και Ανθεκτικότητα:** Ο αλγόριθμος κατά το στάδιο αυτό θα πρέπει να είναι ικανός να διαχειριστεί την κλιμάκωση της πολυπλοκότητας του χάρτη στην πάροδο του χρόνου, ιδιαίτερα όταν αφορά μεγάλα ή πολύπλοκα περιβάλλοντα.

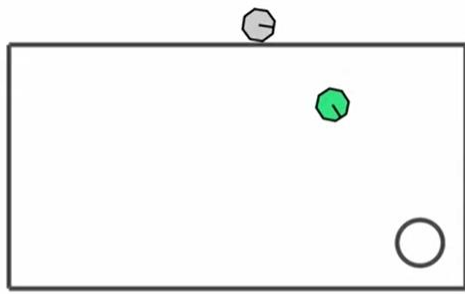
Στη συνέχεια παρουσιάζεται γραφικά ο αλγόριθμος Βελτιστοποίηση Γραφήματος Πόζας (*pose graph optimization*) με τα στάδια front-end και back-end



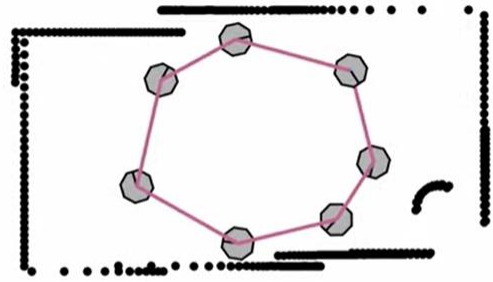
*Εικόνα 4: Στάδιο front-end - Ένδειξη μετατόπισης σαρωτή σε σχέση με την πραγματική θέση (Matlab)*



*Εικόνα 5: Στάδιο front-end - Ένδειξη αθροιστικού σφάλματος μετατόπισης, όπου με πράσινα βέλη επισημαίνονται η θέση του ρομπότ και του τοπόσημου που θα έπρεπε να ταυτίζονται κατά την επαναληπτική μέτρηση (Matlab).*

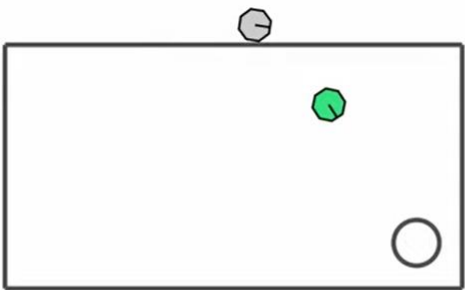


Real and Estimated Robot Poses

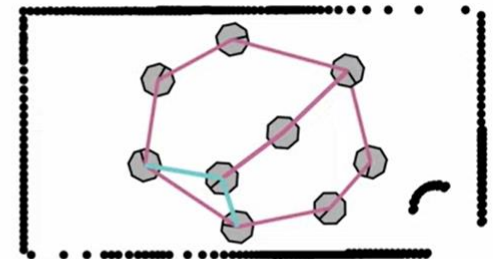


Pose Graph  
Optimization

Εικόνα 6: Στάδιο *front-end* – Επίλυση κλειστού βρόγχου κατά την οποία ταυτίζονται η θέση του ρομπότ και του τοπόσημου κατά την επαναληπτική μέτρηση (Matlab).



Real and Estimated Robot Poses



Pose Graph  
Optimization

Εικόνα 7: Στάδιο *back-end* – Βελτιστοποίηση Γραφήματος Πόζας (*pose graph optimization*) (Matlab).

## 2.4. Σφάλματα τεχνολογίας SLAM

Το θέμα των σφαλμάτων SLAM (Ταυτόχρονη Τοποθέτηση και Χαρτογράφηση) αφορά στην δυσκολία καθορισμού της θέσης ενός σαρωτή μέσα σε ένα άγνωστο περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα χαρτογραφεί το περιβάλλον αυτό. Οι πιο κοινές πηγές σφαλμάτων είναι οι ακόλουθες:

- **Θόρυβος και Δυσλειτουργίες Αισθητήρων:** Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο SLAM, όπως τα LIDAR, οι κάμερες, τα IMUs και το GNSS, συχνά έχουν εγγενή θόρυβο και μπορεί να εμφανίσουν δυσλειτουργίες υπό ορισμένες συνθήκες (π.χ. χαμηλό φωτισμό, ανακλαστικές επιφάνειες). Ο θόρυβος των αισθητήρων εισάγει αβεβαιότητα στα δεδομένα, επηρεάζοντας την ακρίβεια της χαρτογράφησης και την ακρίβεια προσδιορισμού της τοποθεσίας.
- **Σφάλματα Εξαγωγής και Σύνδεσης Τοπόσημων:** Τα τοπόσημα (διακριτά σημεία ή αντικείμενα του περιβάλλοντος) μπορεί να εξαχθούν ή να αντιστοιχιστούν εσφαλμένα μεταξύ διαφορετικών καταγραφών των αισθητήρων λόγω διαφορετικών συνθηκών φωτισμού ή αλλαγών στο περιβάλλον.

- **Δυναμικά Περιβάλλοντα:** Οι αλλαγές στο περιβάλλον (όπως κινούμενοι άνθρωποι, οχήματα ή αλλαγές στη διάταξη) αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για το SLAM. Το σύστημα πρέπει να διακρίνει μεταξύ στατικών και δυναμικών στοιχείων και να ενημερώσει ανάλογα τον χάρτη και τις εκτιμήσεις τοποθεσίας. Τα δυναμικά αντικείμενα μπορεί να ενσωματωθούν εσφαλμένα στον στατικό χάρτη ή να προκαλέσουν λανθασμένη εκτίμηση της θέσης όταν χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς.
- **Περιορισμοί Αλγόριθμων:** Πολλοί αλγόριθμοι SLAM βασίζονται σε προσεγγίσεις ή συγκεκριμένες υποθέσεις για το γεωμετρικό περιβάλλον (π.χ. επιπεδότητα, κτλ.). Επίσης μη γραμμικά σφάλματα, θέματα σύγκλισης και αύξηση του μεγέθους του χάρτη μπορούν να οδηγήσουν σε επιδείνωση της απόδοσης καθώς η πολυπλοκότητα του γεωμετρικού περιβάλλοντος ή το μέγεθος του χάρτη αυξάνεται.
- **Θέματα Αρχικοποίησης και Σύγκλισης:** Οι αρχικές εκτιμήσεις για τη θέση κατά την έναρξη χαρτογράφησης σε ένα άγνωστο περιβάλλον μπορεί να είναι ανακριβείς, οδηγώντας στη δημιουργία κακής ποιότητας χάρτη, έως ότου συγκεντρωθούν επαρκή δεδομένα ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις. Τα συστήματα SLAM μπορεί να εμφανίσουν θέματα σύγκλισης, όπου το σφάλμα μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής κατάστασης είναι μεγάλο, με αποτέλεσμα την αδυναμία επίτευξης επίλυσης και δημιουργίας χάρτη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## 3.1. Σαρωτής laser ZEB HORIZON

Το ZEB Horizon της εταιρείας Geoslam είναι ένας φορητός σαρωτής laser που παρέχει έναν γρήγορο και απλό τρόπο συλλογής τρισδιάστατων δεδομένων σε μορφή νέφους σημείων. Τα δεδομένα συλλέγονται καθώς ο χρήστης περπατά μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το ZEB Horizon εξαλείφει την ανάγκη για τις χρονοβόρες ρυθμίσεις των στατικών σαρωτών και την εγγραφή δεδομένων που σχετίζονται με τις παραδοσιακές μεθόδους laser σάρωσης.

Αποτελείται από έναν laser αισθητήρα απόστασης μέτρησης του χρόνου πτήσης «time-of-flight» (LIDAR) σε συνδυασμό με μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU). Ο αισθητήρας LIDAR είναι τοποθετημένος σε έναν κινητήρα που περιστρέφει τον αισθητήρα κατά 360 μοίρες για να ενισχύσει το τρισδιάστατο πεδίο θέασής του. Ένας καινοτόμος 3D αλγόριθμος ταυτόχρονης τοποθέτησης και χαρτογράφησης (SLAM) χρησιμοποιείται για να συνδυάσει τα δεδομένα του LIDAR και του IMU προκειμένου να παραχθούν ακριβή τρισδιάστατα νέφη σημείων.

Αρχικά καταγράφονται δεδομένα μέτρησης απόστασης laser και αδρανειακά δεδομένα. Προκειμένου τα εν λόγω δεδομένα να μετατραπούν σε τρισδιάστατο νέφος σημείων πρέπει να υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία με τη χρήση του αλγορίθμου SLAM της GeoSLAM. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με τη χρήση της εφαρμογής επεξεργασίας GeoSLAM Hub.

Με τον φορητό laser σαρωτή ZEB HORIZON και τον αλγόριθμο SLAM της GeoSLAM μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα νέφη σημείων σε ένα κλάσμα του χρόνου που απαιτείται με τις παραδοσιακές μεθόδους και τους στατικούς laser σαρωτές.





*Εικόνα 8: Φορητός laser σαρωτής ZEB HORIZON*

## 3.2. Τεχνικές προδιαγραφές

Στη συνέχεια παρατίθενται οι τεχνικές προδιαγραφές του φορητού laser σαρωτή ZEB HORIZON από το εγχειρίδιο χρήσης του κατασκευαστή.

Maximum range	100m
Points per scan line	1800
Field of view	360° x 270°
Scan rate	300,000 points/s
Scan range noise	±30mm
Frequency	10Hz
Laser wavelength	903nm
Horizontal angular resolution	0.20°
Protection Class	IP 54
Power supply	14.8VDC ~ 1.5A
Weight	Scanning head 1.45 kg Datalogger (inc. battery) 1.40 kg

*Εικόνα 9: Τεχνικές προδιαγραφές ZEB HORIZON*

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα επικεντρωθούμε στον έλεγχο της ονομαστικής ακρίβειας μέτρησης, η οποία αναγράφεται ως «θόρυβος σάρωσης απόστασης» (scan range noise) και έχει μέγεθος  $\pm 30\text{mm}$ .

### 3.3. Κανόνες ορθής χρήσης

Στο εγχειρίδιο χρήσης του ZEB Horizon παρέχονται οδηγίες, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό των μετρήσεων, για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Η διαδρομή μέτρησης θα πρέπει να αποφεύγει προβληματικές περιοχές και να προβλέπει την δημιουργία κλειστών βρόγχων έτσι ώστε να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Ακολούθως, επιχειρείται μια συνοπτική παρουσίαση των οδηγιών.

#### 3.3.1. Το γεωμετρικό περιβάλλον

Ο αλγόριθμος SLAM, ο οποίος αναλύει τα πρωτογενή δεδομένα από τη σάρωση laser για δημιουργία 3D νέφους σημείων, βασίζεται στην παρουσία χαρακτηριστικών λεπτομερειών στο μετρούμενο περιβάλλον που σαρώνονται επανειλημμένως. Ωστόσο, περιβάλλοντα με λίγα χαρακτηριστικά, όπως ανοικτοί χώροι ή λείοι διάδρομοι, μπορεί να δυσκολέψουν την λειτουργία του αλγορίθμου. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, για να βελτιωθεί η απόδοση του SLAM, θα πρέπει:

- Αν είναι δυνατόν, να εμπλουτιστούν οι λεπτομέρειες στο χώρο με επιπλέον χαρακτηριστικά. όπως π.χ. κιβώτια σε ένα διάδρομο ή ένα παρκαρισμένο όχημα σε ένα ανοικτό πεδίο.
- Όσα περιορισμένα χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα θα πρέπει να σαρώνονται επανειλημμένως. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται περισσότερες μετρήσεις σημείων ενός χαρακτηριστικού, αυξάνοντας τις πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο SLAM. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν το χαρακτηριστικό βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση (>10μ). π.χ. κατά τη σάρωση ενός λείου διαδρόμου με τοίχους όπου το μόνο χαρακτηριστικό στην κατεύθυνση του ταξιδιού της δέσμης laser είναι ο τοίχος στο τέλος ενός διαδρόμου ή η πόρτα.
- Θα πρέπει να αποφεύγεται η σάρωση κινούμενων αντικειμένων (π.χ. πεζοί ή οχήματα) καθώς ο αλγόριθμος SLAM ενδέχεται να θεωρήσει αυτά τα αντικείμενα ως στατικά χαρακτηριστικά.

#### 3.3.2. Κλείσιμο Βρόγχου

Ο αλγόριθμος SLAM αναλύει τα πρωτογενή δεδομένα από τη σάρωση laser για δημιουργία 3D νέφους σημείων χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ανάλογη με την τεχνική επίλυση όδευσης, σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιείται μια προηγούμενη γνωστή θέση για τον καθορισμό της τρέχουσας. Η μέθοδος αυτή επιδρά στη συσσώρευση σφαλμάτων, προκαλώντας δυνητικές "ολισθήσεις" στον προσδιορισμό της θέσης. Για την αποφυγή αυτών των σφαλμάτων και για την ελαχιστοποίησή τους, είναι καλή πρακτική να κλείνει ο βρόγχος, επιστρέφοντας κατά την διάρκεια των μετρήσεων σε πρότερες γνωστές θέσεις, ώστε να μπορέσει να επιμεριστεί το σφάλμα μέτρησης. Συνεπώς, ως ελάχιστη απαίτηση, ο χειριστής πρέπει να ξεκινήσει και να ολοκληρώσει τη μέτρηση από την ίδια θέση για να διασφαλιστεί τουλάχιστον ένα κλείσιμο βρόγχου. Επιπλέον, συστήνεται η εκτέλεση κυκλικών βρόγχων, όπου είναι εφικτό και η χρήση διαφορετικών οδεύσεων για τη μετάβαση ανάμεσα σε ορόφους. Τέλος, είναι σημαντικό να σαρώνονται προσεκτικά οι περιοχές του κλειστού βρόγχου ώστε να διασφαλίζεται ότι τα βασικά χαρακτηριστικά σαρώνονται από μια παρόμοια οπτική γωνία.

### **3.3.3. Μετάβαση μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικών περιβαλλόντων**

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικών περιβαλλόντων μέσω δύσκολων σημείων πρόσβασης, όπως το πέρασμα μέσα από μια πόρτα ή η στενή στροφή, προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων. Κατά τη μετάβαση ανάμεσα σε διαφορετικά γεωμετρικά περιβάλλοντα, η τοπική προβολή μπορεί να αλλάξει απότομα και ο αλγόριθμος SLAM μπορεί να αντιμετωπίσει δυσκολία στο να τοποθετήσει το νέο περιβάλλον σε σχέση με το προηγούμενο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει για παράδειγμα, στο να υπάρχουν δωμάτια από τις δύο πλευρές μιας πόρτας τα οποία να είναι ελαφρώς μη ευθυγραμμισμένα. Θα πρέπει η μετάβαση μέσα από τις πόρτες και στενές στροφές να γίνεται αργά και να υπάρχει ένα διάστημα όπου ο σαρωτής σκανάρει χαρακτηριστικά και στις δύο πλευρές της πόρτας (δηλαδή και στα δύο δωμάτια) και της στροφής αντίστοιχα. Συνιστάται να είναι ανοιχτές όλες οι πόρτες πριν ξεκινήσει η μέτρηση και να αποφεύγεται η μετακίνησή τους κατά τη σάρωση.

Επίσης, χρειάζεται προσοχή κατά τη μετάβαση από ένα κλειστό περιβάλλον με πλούσια χαρακτηριστικά σε ένα ανοιχτό περιβάλλον με φτωχά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα κατά την έξοδο από ένα κτήριο. Στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται ο σαρωτής κατά τη μετάβαση, να σκανάρει ταυτόχρονα χαρακτηριστικά και στα δύο περιβάλλοντα για να μπορέσει να γίνει η μεταξύ τους σύνδεση, στρεφόμενος προς τον εξωτερικό χώρο του κτηρίου.. Τέλος θα πρέπει να αποφεύγεται η σάρωση κινούμενων αντικείμενων (π.χ. πεζοί) κατά την μετάβαση μεταξύ περιβαλλόντων μέσω δύσκολων σημείων πρόσβασης.

### **3.3.4. Ταχύτητα Περπατήματος**

Συστήνεται η καταγραφή των δεδομένων να γίνεται σε κατάλληλη ταχύτητα περπατήματος, ώστε να επιτευχθεί καλή κάλυψη και συλλογή δεδομένων επαρκούς πυκνότητας. Εάν η ταχύτητα είναι υπερβολικά γρήγορη, ενδέχεται να μην υπάρχουν αρκετές επαναλαμβανόμενες σαρώσεις των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος, ώστε ο αλγόριθμος SLAM να μπορέσει να επεξεργασθεί τα πρωτογενή δεδομένα σάρωσης και να τα μετατρέψει σε ένα νέφος σημείων.

### **3.3.5. Ελάχιστη και Μέγιστη Εμβέλεια**

Η μέγιστη εμβέλεια του σαρωτή είναι 100μ, η οποία όμως επιτυγχάνεται μόνο σε βέλτιστες συνθήκες, σε εσωτερικούς χώρους με καλή ανάκλαση στόχου. Στις περισσότερες συνθήκες η τυπική μέγιστη εμβέλεια θα είναι 60-80μ, ενώ συνιστάται να περιορίζεται η εμβέλεια μέτρησης κάτω από 50μ όπου είναι δυνατόν, για να διασφαλιστεί καλή πυκνότητα σημείων και να διευκολυνθεί ο αλγόριθμος SLAM. Τέλος, θα πρέπει να αποφεύγεται η σάρωση τοίχων και οροφών από πολύ κοντινή απόσταση.

### **3.3.6. Διάρκεια Σάρωσης**

Για πολύ μεγάλες αποτυπώσεις, το έργο θα πρέπει να χωριστεί σε περισσότερες από μία σαρώσεις. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν πολύ μεγάλα μεγέθη αρχείων καθώς και να μειωθεί η οποιαδήποτε απόκλιση που ενδέχεται να δημιουργηθεί στα δεδομένα. Συνιστάται η κάθε περίοδος σάρωσης να περιορίζεται σε 30 λεπτά.

### **3.3.7. Μελέτη Περιοχών Έρευνας με Περιορισμένη ή Δύσκολη Πρόσβαση**

Κατά τη μετακίνηση σε δύσκολα σημεία πρόσβασης (π.χ. στενοί διάδρομοι σε σπήλαια), η κεφαλή σάρωσης μπορεί να παραμείνει ακίνητη για μικρά χρονικά διαστήματα, έως ότου ολοκληρωθεί η μετάβαση. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί ο χειριστής να μετακινεί την κεφαλή σάρωσης πάνω και κάτω για να μιμηθεί κίνηση, για μικρά χρονικά διαστήματα, έως ότου ολοκληρωθεί η μετάβαση μέσα από τα δύσκολα σημεία πρόσβασης.

### **3.3.8. Κίνηση Αντικειμένων στο γεωμετρικό περιβάλλον**

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο αλγόριθμος SLAM μπορεί να χειριστεί κινούμενα αντικείμενα στο περιβάλλον. Για να εκτιμηθεί η τροχιά του αισθητήρα, ο αλγόριθμος υποθέτει ότι μια μεγάλη μερίδα του περιβάλλοντος είναι στατική. Ωστόσο, σε ορισμένα περιβάλλοντα με φτωχά τρισδιάστατα χαρακτηριστικά, τα κινούμενα αντικείμενα μπορούν να έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στη λύση. Ειδικότερα, τα κινούμενα αντικείμενα θα πρέπει να αποφεύγονται σε μακρόστενα περιβάλλοντα (π.χ. διαδρόμους), σχετικά ανοικτούς χώρους και κατά τη μετάβαση μέσω πυλών. Είναι καλή πρακτική, κατά τη διάρκεια της σάρωσης, τα άλλα άτομα να κρατούν απόσταση από τον χειριστή τουλάχιστον 20μ..

## **3.4. Μέθοδος μέτρησης με τοποσταθερά (reference points)**

Με το ZEB HORIZON δίνεται η δυνατότητα χρήσης τοποσταθερών (control points), τα οποία είναι σημεία εντός της περιοχής σάρωσης που έχουν γνωστές συντεταγμένες και είναι σταθερά τοποθετημένα σε οριζόντιες ή κατακόρυφες επιφάνειες (π.χ. καρφιά, στάσεις, κτλ.) Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την γεωαναφορά μιας σάρωσης σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, όπως επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη συνένωση επιμέρους σαρώσεων μιας ευρύτερης περιοχής με σκοπό την δημιουργία ενός ενιαίου τρισδιάστατου νέφους σημείων ενταγμένου σε κάποιο σύστημα αναφοράς.

Για να μπορέσει να γίνει μέτρηση των τοποσταθερών με το ZEB HORIZON θα πρέπει να είναι τοποθετημένη η ειδική βάση που παρέχεται στον εξοπλισμό, η οποία βιδώνεται στο κάτω μέρος της λαβής όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Για την καταγραφή ενός τοποσταθερού κατά τη διάρκεια της σάρωσης, θα πρέπει το ZEB HORIZON να τοποθετηθεί έτσι ώστε το σημείο να βρίσκεται στο κέντρο του ανοίγματος της βάσης που έχει σχήμα αστεριού και να παραμείνει σταθερό για τουλάχιστον 10sec.



*Εικόνα 10: Βάση μέτρησης, όπου με κόκκινο βέλος σημειώνεται το σημείο τοποθέτησης του σαρωτή επί των τοποσταθερών για την καταγραφή τους.*

Η χρήση σημείων ελέγχου με το ZEB HORIZON έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Είναι σταθερά σημεία, σε αντίθεση με τους κινητούς στόχους (π.χ. σφαίρες) όπου υπεισέρχεται το σφάλμα κέντρωσης κατά την τοποθέτησή τους.
- Η χρήση ως τοποσταθερών γνωστών σημείων τοπογραφικών εργασιών σημαίνει ότι δεν υπάρχει ανάγκη για χειροκίνητη τοποθέτηση επιμέρους στόχων πριν από κάθε σάρωση. Η συλλογή δεδομένων μπορεί στη συνέχεια να επαναλαμβάνεται τακτικά, γρηγορότερα, ευκολότερα και χωρίς τον κίνδυνο να καταγραφούν τα σημεία σε διαφορετική κάθε φορά θέση.
- Η αναγνώριση των τοποσταθερών προκύπτει αυτόματα από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων μέσω του αλγόριθμου SLAM με την εφαρμογή GeoSLAM Hub. Ως σταθερά σημεία αναγνωρίζονται αυτά στα οποία το ZEB HORIZON έκανε καταγραφή δεδομένων ενώ ήταν σταθερό για τουλάχιστον 10sec. Με αυτό τον τρόπο παρακάμπτεται το σφάλμα εντοπισμού των στόχων (π.χ. σφαίρες) στο παραγόμενο νέφος σημείων που απαιτούν οι παραδοσιακές μέθοδοι.

### 3.5. Λογισμικό GeoSLAM Hub

Το GeoSLAM Hub είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό που έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται με τους laser σαρωτές της σειράς GeoSLAM ZEB, όπου ανήκει και ο σαρωτής ZEB HORIZON. Η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε είναι η 6.2.1. και στο παρόν κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των βασικών λειτουργιών που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, καθώς και των παραμέτρων με τις οποίες έγινε η επίλυση των δεδομένων.

### 3.5.1. Βασική ροή εργασιών

Η δομή λειτουργίας του λογισμικού είναι τέτοια ώστε ο χρήστης να περιορίζεται μόνο στην τήρηση της αλληλουχίας των ενεργειών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της επίλυσης. Οι παράμετροι επίλυσης του αλγορίθμου είναι ήδη ρυθμισμένες ώστε να καλύπτουν την πλειονότητα των περιπτώσεων, παρόλα αυτά δίνεται η δυνατότητα παρέμβασης εφόσον απαιτηθεί.

Ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της βασικής ροής εργασιών από την εισαγωγή των δεδομένων έως την παραγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων.



Εικόνα 11: Βασική ροή εργασιών λογισμικού GeoSLAM Hub.

### 3.5.2. Παράμετροι επεξεργασίας αλγόριθμου SLAM

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, οι παράμετροι του αλγορίθμου είναι ήδη προεπιλεγμένες ώστε να καλύπτουν την πλειονότητα των περιπτώσεων και δίνουν την δυνατότητα για άμεση και αυτόματη έναρξη της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων, με την εισαγωγή τους στο λογισμικό.

Στην περίπτωση όμως που προκύψουν σφάλματα κατά την επίλυση που μπορεί να οφείλονται σε μη συνεπή εφαρμογή των μεθόδων σάρωσης ή στο ότι η περιοχή σάρωσης δεν περιέχει επαρκή χαρακτηριστικά, κ.τ.λ., δίνεται η δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων του αλγόριθμου ώστε να επιτευχθεί επίλυση ή βελτίωση της ακρίβειας της.

Οι παράμετροι επεξεργασίας διακρίνονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες:

- **Τοπικές παράμετροι (local)**, οι οποίες αφορούν κυρίως σε επιλογές επεξεργασίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων συνοχής των δεδομένων.
- **Γενικές παράμετροι (global)**, οι οποίες αφορούν κυρίως σε επιλογές επεξεργασίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων από μη συνεπή εφαρμογή των μεθόδων σάρωσης.

## 3.6. Λογισμικό PointCab

Το PointCab είναι ένα λογισμικό που παρέχει λύσεις για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από 3D σαρώσεις. Επιτρέπει τη γρήγορη και αποδοτική επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων από 3D σαρώσεις, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για τη μετατροπή τους σε μορφή που μπορεί να εξαχθεί μετρητική πληροφορία. Το μεγάλο πλεονέκτημα του λογισμικού αυτού είναι ότι διαχειρίζεται τα τρισδιάστατα νέφη σημείων σαν να είναι δισδιάστατα, παράγοντας με αυτό τον τρόπο γρήγορα και αξιόπιστα υπόβαθρα από την περιοχή σάρωσης με τη μορφή κατόψεων, όψεων και τομών.

Με το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκαν οι γεωαναφορές των τρισδιάστατων νεφών σημείων μέσω της επιλογής «υπολογιστής μετασχηματισμού (transform calculator)» και παρήχθησαν όλα τα απαραίτητα υπόβαθρα που απαιτήθηκαν ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 4.1. Περιγραφή μεθοδολογίας

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να προσδιοριστεί η πραγματική ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON σε διάφορα σενάρια σαρώσεων και θα συγκριθεί με την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του κατασκευαστή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα διάφορα σενάρια στα οποία ελέγχθηκε η ακρίβεια μέτρησης και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του σαρωτή:

- Μέτρηση των βάθρων του εργαστηριακού χώρου Μετρολογίας.
- Μέτρηση του κεντρικού κλιμακοστασίου του κτηρίου Λαμπαδαρίου, όπου παρουσιάζεται η μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά.
- Πλήρης σάρωση του κτηρίου Λαμπαδαρίου, ακολουθώντας τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή του σαρωτή.
- Εξωτερική σάρωση του κτηρίου Λαμπαδαρίου με διάφορες παραλλαγές, ώστε να ελεγχθεί η επίπτωση της εφαρμογής ή μη ορισμένων οδηγιών χρήσης του κατασκευαστή στην ακρίβεια των μετρήσεων.
- Κατά μήκος σάρωση του κτηρίου Λαμπαδαρίου με διάφορες παραλλαγές, ώστε να ελεγχθεί η επίπτωση της εφαρμογής ή μη ορισμένων οδηγιών χρήσης του κατασκευαστή στην ακρίβεια των μετρήσεων.

Ως βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων των σαρώσεων είναι τα γεωμετρικά μεγέθη του κτηρίου Λαμπαδαρίου, όπως αυτά προέκυψαν από επίγεια τοπογραφική αποτύπωση που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Εξαιρέση αποτελούν τα γεωμετρικά μεγέθη των βάθρων στον εργαστηριακό χώρο Μετρολογίας, τα οποία παρουσιάζονται στο άρθρο *ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. – Ε.Μ.Π. ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER TRACKER* (Ο.Αραμπατζή-Γ.Πηνιώτης-Μ.Τσακίρη-Ν.Κουβάς, 7<sup>ο</sup> Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας 2018).

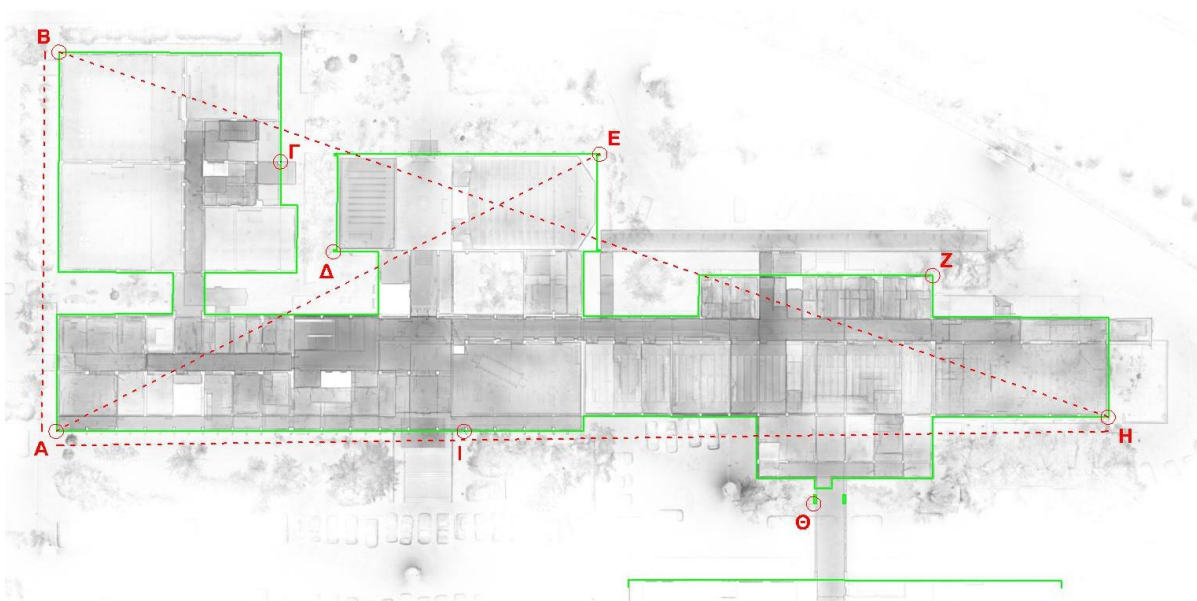
Ως σημεία ελέγχου επιλέχθηκαν χαρακτηριστικές εξωτερικές γωνίες του κτηρίου των οποίων ο εντοπισμός ήταν όσο το δυνατόν μονοσήμαντος, τόσο κατά την επίγεια τοπογραφική αποτύπωση, όσο και στο τρισδιάστατο νέφος σημείων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα εντοπισμού της θέσης κατά τη μέτρησή τους. Ως αποστάσεις ελέγχου επιλέχθηκαν οι δύο μεγαλύτερες διαστάσεις του κτηρίου και δύο διαγώνιοι του.

Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας και σκαρίφημα με την περιγραφή και τη θέση των σημείων και των αποστάσεων που θα ελεγχθούν στα διάφορα σενάρια σάρωσης.



	Σημεία	Περιγραφή
Σημεία ελέγχου	A	γωνία κολόνας
	B	γωνία κτηρίου
	Γ οριζοντιογραφικά	συμβολή κολόνας-δοκού
	Γ υψομετρικά	συμβολή κολόνας-δοκού
	Δ	γωνία κολόνας
	E	γωνία κολόνας
	Z	γωνία κτηρίου
	H	γωνία κτηρίου
	Θ	γωνία κολόνας
	I οριζοντιογραφικά	συμβολή κολόνας-δοκού
	I υψομετρικά	συμβολή κολόνας-δοκού
Αποστάσεις ελέγχου	A-B	γωνίες κολόνας-κτηρίου
	A-E	γωνίες κολόνας
	A-H	γωνίες κολόνας-κτηρίου
	B-H	γωνίες κτηρίου

Πίνακας 1: Περιγραφή σημείων και αποστάσεων ελέγχου.



Εικόνα 12: Σκαρίφημα ένδειξης θέσης σημείων και αποστάσεων ελέγχου.

Μέσω των παραπάνω σεναρίων, θα προσδιοριστεί τόσο η εσωτερική/σχετική ακρίβεια μέτρησης, όσο και η εξωτερική ακρίβεια (θέση στο χώρο) μέτρησης του σαρωτή.

Η εσωτερική/σχετική ακρίβεια μέτρησης θα προκύψει:

- Μέσω της σύγκρισης των διαστάσεων του κτηρίου, όπως αυτές προκύπτουν από το τρισδιάστατο νέφος σημείων σε σχέση με την επίγεια τοπογραφική αποτύπωση.
- Από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) της γεωαναφοράς των σαρώσεων στο σύστημα αναφοράς, που αποτελεί τον δείκτη προσαρμογής της θέσης των τοποσταθερών όπως αναγνωρίστηκαν από τον σαρωτή σε σχέση με τη γνωστή θέση τους από την επίγεια τοπογραφική αποτύπωση.

Η εξωτερική ακρίβεια μέτρησης θα προκύψει από την σύγκριση της θέσης των σημείων ελέγχου όπως αυτές προκύπτουν από το γεωαναφερμένο τρισδιάστατο νέφος σημείων σε σχέση με την τοπογραφική αποτύπωση. Για κάθε σενάριο σάρωσης εφαρμόστηκε η ακόλουθη διαδικασία:

- Συγκέντρωση των πρωτογενών δεδομένων με τον φορητό laser σαρωτή ZEB HORIZON.
- Επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων στο λογισμικό GeoSLAM Hub, για την εξαγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων και των τοποσταθερών, σε ένα τοπικό ανεξάρτητο σύστημα συντεταγμένων της σάρωσης.
- Γεωαναφορά του τρισδιάστατου νέφους σημείων με το λογισμικό PointCab, στο σύστημα αναφοράς που έχει δημιουργηθεί για το κτήριο κατά την επίγεια τοπογραφική αποτύπωση, δίνοντας με αυτό τον τρόπο την δυνατότητα να γίνει απευθείας σύγκριση των μεταξύ τους μεγεθών και ακολούθως να προκύψει η ακρίβεια μέτρησης.
- Προσδιορισμός της ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή ελέγχοντας τις αποκλίσεις στα σημεία και στις αποστάσεις ελέγχου, ανάμεσα στα μεγέθη του νέφους σημείων και της τοπογραφικής αποτύπωσης καθώς και μέσω του δείκτη RMS γεωαναφοράς.
- Εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τονίζεται ότι το σημείο μέτρησης επί των υποβάθρων που έχουν προκύψει από το τρισδιάστατο νέφος σημείων, ορίζεται το μέσο της έντονης μαύρης γραμμής που καθορίζει κάθε φορά την παρειά του δομικού στοιχείου που αποτυπώνεται. Με πράσινη γραμμή συμβολίζεται το περίγραμμα του κτηρίου που έχει προκύψει από την τοπογραφική αποτύπωση.

## 4.2. Τοπογραφικές μετρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, με σκοπό τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν ως τοποσταθερά για τη γεωαναφορά των μετρήσεων με το laser scanner, καθώς και τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των ταχυμετρικών σημείων από τα οποία θα προσδιοριστεί το εξωτερικό περίγραμμα του κτηρίου και τα χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου, ώστε να γίνει σύγκριση με τη γεωμετρία του κτηρίου που θα προκύψει από το laser scanner.

Η αποτύπωση χωροθετήθηκε και προσανατολίστηκε ορθά μέσω της ένταξης δύο στάσεων (S0, S1) στο Ε.Γ.Σ.Α. 87', από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον δέκτη Trimble R12i, ονομαστικής ακρίβειας H: 8mm+1ppm / V: 15mm+1ppm, με τη μέθοδο RTK. Τονίζεται ότι κατά την επίλυση δεν έγινε χρήση του συντελεστή παραμόρφωσης m του Ε.Γ.Σ.Α. 87'. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον γεωδαιτικό σταθμό Leica TS10, ονομαστικής ακρίβειας 3<sup>cc</sup> / 1mm+1.5ppm.

Αρχικά δημιουργήθηκε η κύρια όδευση (κλειστή εξαρτημένη) περιμετρικά του κτηρίου, της οποίας οι στάσεις είναι κατανομημένες με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να αποτυπωθεί το εξωτερικό περίγραμμα του κτηρίου και τα χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου και αφετέρου οι κορυφές να χρησιμοποιηθούν ως τοποσταθερά κατά την διάρκεια των μετρήσεων με το σύστημα SLAM. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τρεις δευτερεύουσες οδεύσεις (ανοιχτές πλήρως εξαρτημένες) εσωτερικά του κτηρίου, με σκοπό οι κορυφές τους να χρησιμοποιηθούν επίσης ως τοποσταθερά κατά την διάρκεια των μετρήσεων με το σύστημα SLAM. Τέλος, δημιουργήθηκαν κάποια τοποσταθερά σημεία, επιπλέον των κορυφών των οδεύσεων, με σκοπό την πύκνωση τους για να υπάρξει πλήρης κάλυψη των χώρων του κτηρίου.

Η επίλυση των μετρήσεων έγινε με το λογισμικό DelSurvey Pro.

### 4.2.1. Επίλυση οδεύσεων

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των μετρήσεων, αρχικά έγινε επίλυση των τεσσάρων οδεύσεων (μίας κύριας και τριών δευτερευουσών) για να προσδιοριστεί το γωνιακό και γραμμικό τους σφάλμα. Οι οδεύσεις επιλύθηκαν ως εξαρτημένες από τα δύο άκρα τους. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των επιλύσεων είναι τα ακόλουθα:

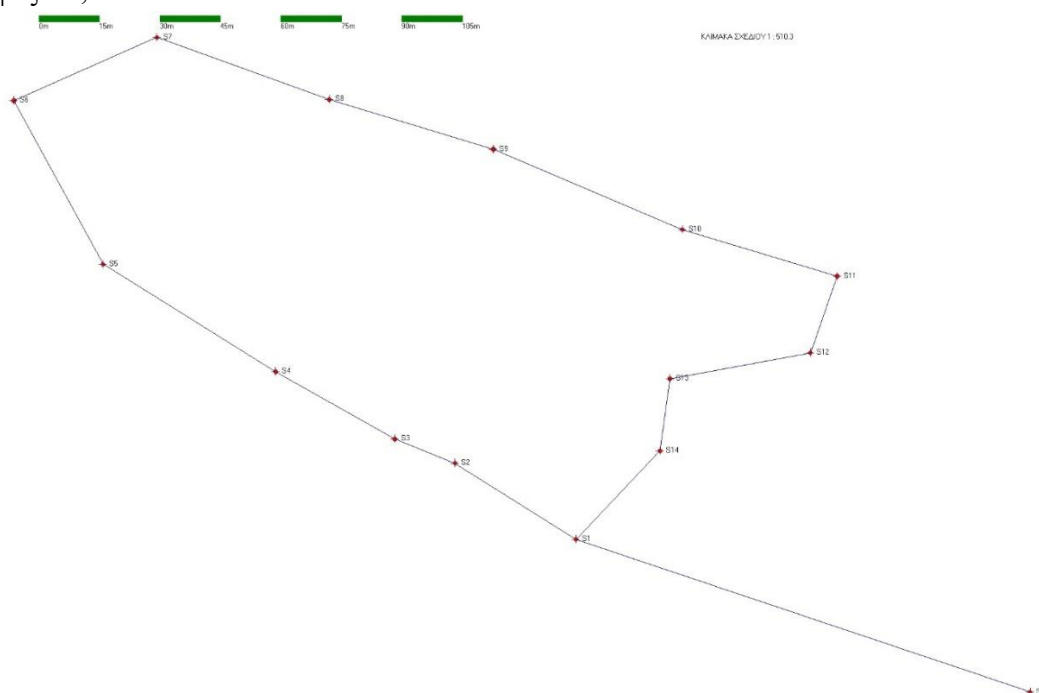
	Γωνιακό κλείσιμο όδευσης (c)	Γραμμικό κλείσιμο όδευσης (m)
<b>Κύρια εξωτερική όδευση</b>	0.7	0.0014
<b>1<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (υπόγειο)</b>	-0.32	0.0015
<b>2<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)</b>	-1.13	0.0037
<b>3<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)</b>	-0.45	0.0028

Πίνακας 2: Σφάλματα κλεισίματος οδεύσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σκαριφήματα των οδεύσεων.

### 4.2.1.1. Κύρια όδευση (εξωτερική)

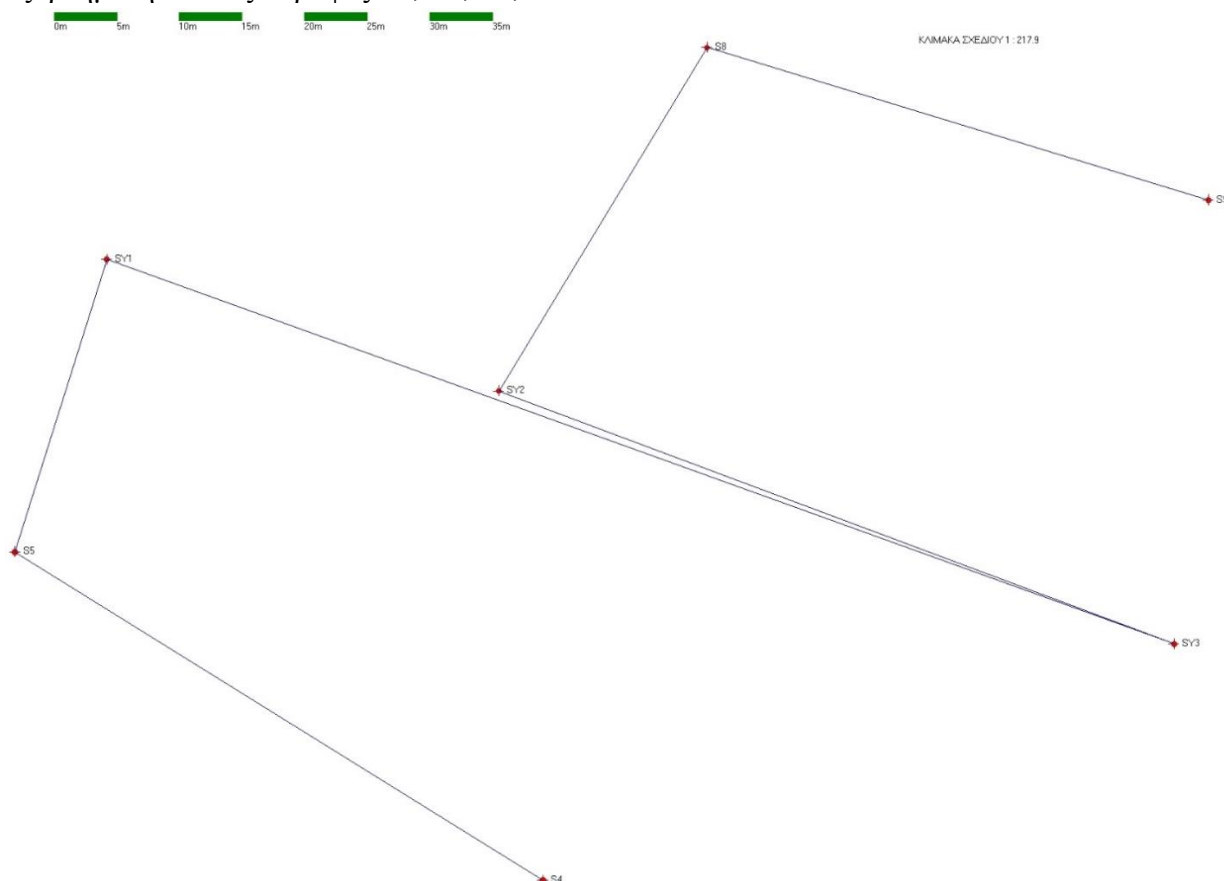
Παρακάτω παρατίθεται το σκαρίφημα της κύριας εξωτερική όδευσης εξαρτημένη από τις κορυφές S0, S1.



Εικόνα 13: Σκαρίφημα κύριας εξωτερικής όδευσης

### 4.2.1.2. 1<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (υπόγειο)

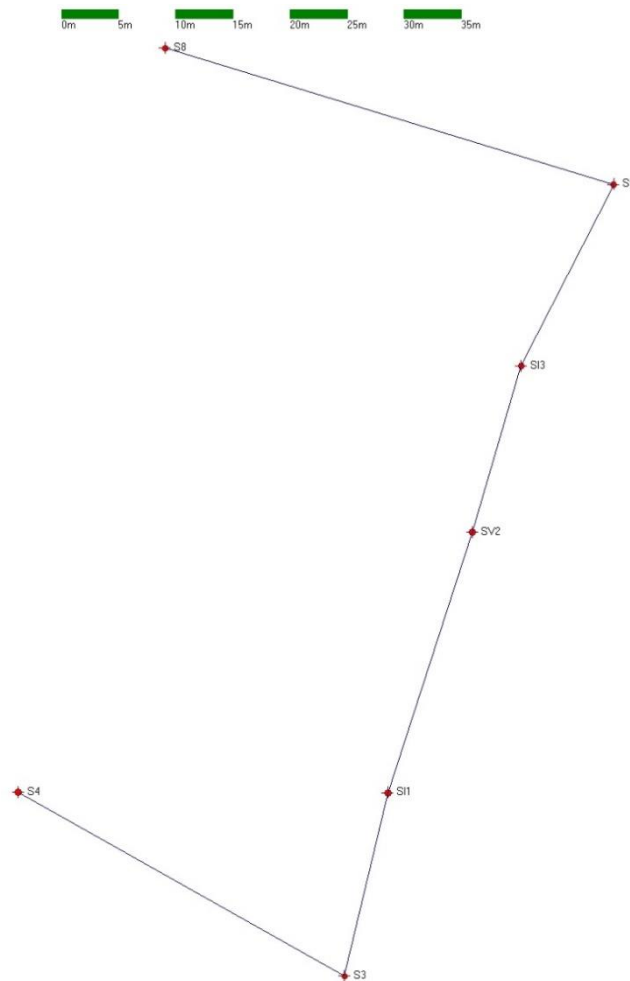
Παρακάτω παρατίθεται το σκαρίφημα της 1<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο υπόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S4, S5, S8, S9.



Εικόνα 14: Σκαρίφημα 1<sup>η</sup> δευτερεύουσας όδευσης (υπόγειο)

### 4.2.1.3. 2<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)

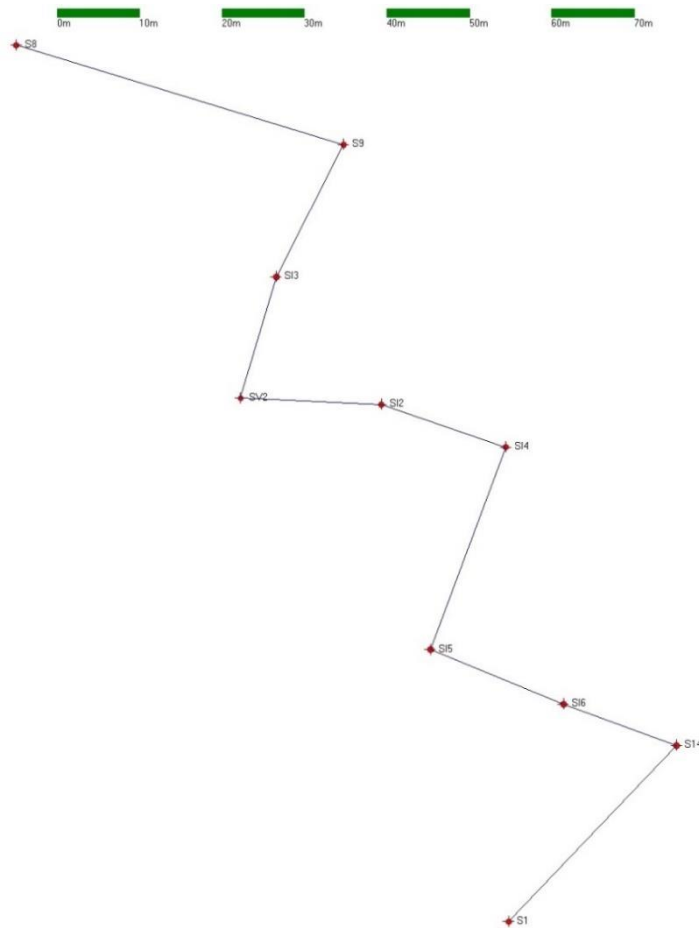
Παρακάτω παρατίθεται το σκαρίφημα της 2<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο ισόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S8, S9, S3, S4.



Εικόνα 15: Σκαρίφημα 2<sup>η</sup> δευτερεύουσας όδευσης (ισόγειο)

### 4.2.1.4. 3<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)

Παρακάτω παρατίθεται το σκαρίφημα της 3<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο ισόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S8, S9, S14, S1.



Εικόνα 16: Σκαρίφημα 3<sup>η</sup> δευτερεύουσας όδευσης (ισόγειο)

#### 4.2.2. Συνόρθωση δικτύου

Η τελική επίλυση έγινε για το σύνολο των μετρήσεων κάνοντας συνόρθωση του οριζοντιογραφικού και κατακόρυφου δικτύου με τη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων. Για την επίλυση θεωρήθηκε σταθερό σημείο η κορυφή S0 και σταθερή διεύθυνση η διεύθυνση S0 & S1. Ως ακρίβεια μέτρησης του γεωδαιτικού σταθμού δεν δηλώθηκε η ονομαστική του  $\pm 3''$  /  $\pm 1\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$  αλλά η ακόλουθη,  $\pm 10''$  /  $\pm 2\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$ , η οποία αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της πραγματικής ακρίβειας μέτρησης. Ακολουθεί πίνακας με τα μέγιστα τυπικά σφάλματα που προέκυψαν από την συνόρθωση:

Μέγιστα τυπικά σφάλματα συνόρθωσης		
$\sigma_x$ (m)	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
0.005	0.004	0.002

Πίνακας 3: Μέγιστα τυπικά σφάλματα συνόρθωσης οριζοντιογραφικού-υψομετρικού δικτύου

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των επιλύσεων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ακρίβεια των μετρήσεων είναι επαρκής για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και σε κάθε περίπτωση είναι αρκετές τάξεις ανώτερη της θεωρητικής ακρίβειας του συστήματος SLAM ( $\pm 30\text{mm}$ ). Συνεπώς τα μεγέθη του κτηρίου (διαστάσεις, υψόμετρα) που θα προκύψουν από την τοπογραφική αποτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως η βάση με την οποία θα ελεγχθεί η ακρίβεια των μετρήσεων του συστήματος SLAM.

Τέλος, για την διευκόλυνση της επεξεργασίας των μετρήσεων και των παραγόμενων σχεδίων, μεταφέρθηκε η αποτύπωση σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων, μέσω ενός μετασχηματισμού ομοιότητας. Στο τοπικό αυτό σύστημα η κύρια όψη του κτηρίου είναι παράλληλη με τον άξονα x-x και ως υψομετρική αφετηρία 0.00μ. τέθηκε η στάθμη του ισογείου της κεντρικής εισόδου του κτηρίου. Οι τελικές συντεταγμένες των στάσεων και τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία/γεωαναφορά των μετρήσεων του laser scanner παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>A/A</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>A/A</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>S0</b>	-18.393	162.855	-1.058	<b>SI1</b>	150.423	138.384	1.308
<b>S1</b>	98.830	163.863	0.768	<b>SI2</b>	134.340	108.972	-0.002
<b>S2</b>	132.878	155.945	0.690	<b>SI3</b>	151.640	98.398	-0.068
<b>S2A</b>	133.860	119.783	0.054	<b>SI4</b>	118.201	108.945	-0.018
<b>S3</b>	148.707	155.155	0.543	<b>SI5</b>	118.826	135.460	0.061
<b>S4</b>	181.670	149.141	-0.368	<b>SI6</b>	101.204	136.440	0.049
<b>S5</b>	230.169	138.135	-2.166	<b>SK21</b>	197.560	114.280	-0.015
<b>S6</b>	263.893	107.420	-4.735	<b>SK21A</b>	222.706	114.392	-0.018
<b>S7</b>	235.822	81.371	-4.398	<b>SV2</b>	150.890	113.884	0.000
<b>S8</b>	191.028	81.935	-2.901	<b>SY1</b>	230.875	113.636	-3.289
<b>S9</b>	149.134	80.344	-1.984	<b>SY2</b>	197.804	113.326	-3.285
<b>S10</b>	98.975	83.755	-1.839	<b>SY3</b>	140.132	114.768	-3.288
<b>S11</b>	59.428	82.183	-1.283	<b>F1</b>	193.083	92.126	-3.339
<b>S12</b>	59.524	101.974	-0.869	<b>F2</b>	223.726	90.068	-4.153
<b>S13</b>	89.911	119.222	-0.365	<b>F3</b>	245.131	108.718	-3.303
<b>S14</b>	86.466	136.700	0.065	<b>F4</b>	218.832	122.899	-1.720
				<b>F5</b>	101.119	100.668	-0.007

*Πίνακας 4: Τελικές συντεταγμένες τοποσταθερών σε τοπικό σύστημα*

### 4.2.2.1. Συνόρθωση οριζοντιογραφικού δικτύου ελέγχου

\*\*\*\*\*

Σύνολο κορυφών = 28

Αριθμός αγνώστων κορυφών = 26

Αριθμός παρατηρήσεων = 80

a-priori τυπική απόκλιση = 1

a-posteriori τυπική απόκλιση = 1.1865

a-posteriori μεταβλητότητα = 1.4080

Βαθμοί ελευθερίας = 28

Κριτήριο Βελτιστοποίησης ( $X^2$ )= 39.4242

Τεστ  $X^2$  μονόπλευρα για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%= ΟΡΘΟ

\*\*\*\*\*

#### Συνορθωμένες Κορυφές

\*\*\*\*\*

Κωδ. Κορυφ.	Προσωρινές Συν-νες		Διορθώσεις		Συνορθωμένες Συν-νες		Τυπικά Σφάλματα	
	Xo(m)	Yo(m)	δχ(m)	δγ(m)	X(m)	Y(m)	σχ(m)	σγ(m)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
S1	480575.599	4202724.815			480575.599	4202724.815		
S0	480686.711	4202687.447			480686.711	4202687.447		
S2	480546.010	4202743.429	0.001	0	480546.0111	4202743.429	0.002	0.001
S3	480531.307	4202749.350	0.002	0	480531.309	4202749.35	0.003	0.002
S2A	480556.902	4202777.925	0.002	0	480556.9037	4202777.925	0.003	0.003
S4	480502.122	4202765.810	0.002	0	480502.124	4202765.81	0.003	0.002
SI1	480535.167	4202765.762	0.003	-0.001	480535.1696	4202765.761	0.003	0.002
S5	480459.887	4202792.066	0.000	0.000	480459.8871	4202792.066	0.003	0.004
S6	480438.057	4202832.119	0.000	-0.001	480438.0566	4202832.118	0.004	0.004
SY1	480467.230	4202815.450	-0.001	0.000	480467.2294	4202815.45	0.004	0.004
S7	480473.104	4202847.561	-0.002	-0.002	480473.1021	4202847.559	0.004	0.004
S8	480515.252	4202832.383	-0.002	-0.001	480515.2504	4202832.382	0.004	0.003
S9	480555.364	4202820.191	-0.002	-0.001	480555.3616	4202820.19	0.003	0.002
SY2	480498.585	4202804.932	-0.001	-0.001	480498.584	4202804.931	0.003	0.003
SI3	480547.094	4202803.950	-0.002	-0.002	480547.092	4202803.948	0.003	0.003
S10	480601.653	4202800.570	-0.003	-0.001	480601.6504	4202800.569	0.003	0.003
S11	480639.540	4202789.128	-0.002	-0.002	480639.5376	4202789.127	0.003	0.003
S12	480632.982	4202770.456	-0.004	-0.002	480632.9784	4202770.454	0.003	0.003
S13	480598.626	4202764.088	-0.004	0	480598.622	4202764.088	0.001	0.002
S14	480596.169	4202746.444	-0.005	0	480596.1638	4202746.444	0.001	0.001
SY3	480552.615	4202784.710	0.001	0.005	480552.6158	4202784.715	0.004	0.003
SV2	480542.736	4202789.071	0.002	-0.004	480542.7382	4202789.067	0.003	0.002
SI2	480559.984	4202788.298	0.001	0.001	480559.9853	4202788.299	0.003	0.002
SK21	480498.505	4202803.967	-0.002	-0.017	480498.5027	4202803.95	0.004	0.003
SK21A	480474.707	4202812.089	-0.005	-0.024	480474.7021	4202812.065	0.005	0.004
SI4	480575.242	4202783.042	0.004	0.006	480575.2458	4202783.048	0.003	0.002
SI5	480565.976	4202758.194	0.011	0.001	480565.9869	4202758.195	0.003	0.002
SI6	480582.308	4202751.502	0.013	0.006	480582.3211	4202751.508	0.003	0.002



#### 4.2.2.2. Συνόρθωση κατακορύφου δικτύου ελέγχου

\*\*\*\*\*

Αριθμός Αγνώστων Υψομέτρων = 27

Αριθμός Παρατηρήσεων = 77

a-priori τυπική απόκλιση = 1

a-posteriori τυπική απόκλιση = 7.36907102216967E-03 m/Km

a-posteriori μεταβλητότητα = 5.43032077297808E-05

Βαθμοί ελευθερίας = 50

Κριτήριο βελτιστοποίησης ( $X^2$ ) = 0.0027

Τεστ  $X^2$  μονόπλευρα για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% = ΟΡΘΟ

\*\*\*\*\*

Οι συνορθωμένες τιμές των κορυφών με τα τυπικά σφάλματα

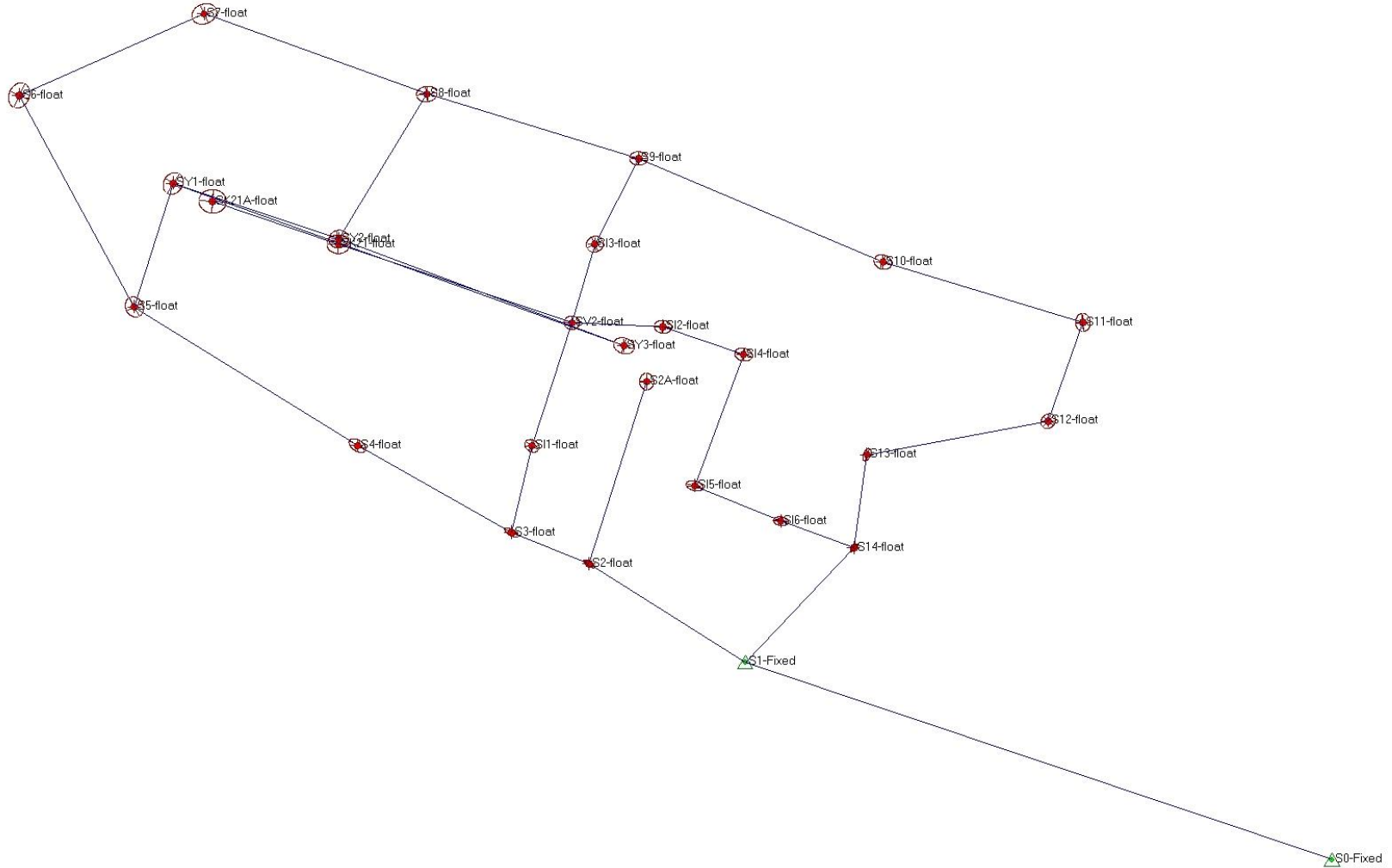
\*\*\*\*\*

Κωδικός Υψομέτρου	Αρχικό Υψόμετρο(m)	Διόρθωση(m)	Συνορθωμένο Υψόμετρο(m)	Τυπικό Σφάλμα(m)
-----	-----	-----	-----	-----
S1	196.046		196.046	
S0	194.221	-0.001	194.220	0.002
S2	195.969	-0.001	195.968	0.001
S3	195.821	0	195.821	0.001
S2A	195.334	-0.002	195.332	0.001
S4	194.910	0	194.910	0.001
SI1	196.587	-0.001	196.586	0.001
S5	193.110	0.002	193.112	0.001
S6	190.542	0.001	190.543	0.001
SY1	191.987	0.002	191.989	0.001
S7	190.880	0	190.880	0.001
S8	192.377	0	192.377	0.001
S9	193.293	0.001	193.294	0.001
SY2	191.992	0.001	191.993	0.001
SI3	195.209	0.001	195.210	0.001
S10	193.437	0.002	193.439	0.001
S11	193.994	0.001	193.995	0.001
S12	194.407	0.002	194.409	0.001
S13	194.910	0.003	194.913	0.001
S14	195.339	0.004	195.343	0.001
SY3	191.991	-0.001	191.990	0.002
SV2	195.276	0.002	195.278	0.001
SI2	195.275	0.001	195.276	0.001
SK21	195.262	0.001	195.263	0.002
SK21A	195.259	0.001	195.260	0.002
SI4	195.258	0.002	195.260	0.001
SI5	195.339	0	195.339	0.001
SI6	195.328	-0.001	195.327	0.001



ΚΑΙΜΑΚΑ ΣΧΕΔΙΟΥ 1 : 637.1

ΚΑΙΜΑΚΑ ΕΛΛΕΙΨΕΩΝ 1 : 1



Εικόνα 17: Σκαρίφημα συνόρθωσης οριζοντιογραφικού δικτύου

### 4.3. Σάρωση βάθρων εργαστηριακού χώρου Μετρολογίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στον εργαστηριακό χώρο Μετρολογίας της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης του laser scanner σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον όπου τα μετρούμενα μεγέθη είναι απόλυτα ορισμένα.

Στο εργαστήριο μετρολογίας υπάρχουν 26 βάθρα των οποίων η στέψη βρίσκεται στο ίδιο υψόμετρο με απόκλιση  $\pm 1\text{mm}$ , όπου για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα θεωρηθούν ισοϋψή. Οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι ορισμένες με ακρίβεια μικρότερη του χιλιοστού ( $<1\text{mm}$ ) η οποία είναι πολλές τάξεις ανώτερη της θεωρητικής ακρίβειας του laser scanner  $\pm 30\text{mm}$  (βλέπε άρθρο *ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. – Ε.Μ.Π. ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER TRACKER* Ο.Αραμπατζή-Γ.Πηνιώτης-Μ.Τσακίρη-Ν.Κουβάς, 7ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας 2018).

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις αποστάσεις των βάθρων με προσέγγιση χιλιοστού, όπως έχουν προσδιοριστεί από το εργαστήριο Μετρολογίας και οι οποίες θα θεωρηθούν ως οι ακριβείς τιμές στους ελέγχους που θα ακολουθήσουν.

Βάθρα	Αποστάσεις D (m)	Υψομετρική διαφορά ΔH (m)	Βάθρα	Αποστάσεις D (m)	Υψομετρική διαφορά ΔH (m)
1-2	2.000	0.000	14-15	1.004	0.000
2-3	3.015	0.000	15-16	4.002	0.000
3-4	0.983	0.000	16-17	0.999	0.000
4-5	4.002	0.000	17-18	3.000	0.000
5-6	3.999	0.000	18-19	2.002	0.000
6-7	1.020	0.000	19-20	1.998	0.000
7-8	2.978	0.000	20-21	3.002	0.000
8-9	2.000	0.000	21-22	1.003	0.000
9-10	2.000	0.000	22-23	0.998	0.000
10-11	1.000	0.000	23-24	0.999	0.000
11-12	1.998	0.000	24-25	0.999	0.000
12-13	1.000	0.000	25-26	1.002	0.000
13-14	2.997	0.000			

Πίνακας 5: Αποστάσεις και υψομετρικές διαφορές βάθρων με προσέγγιση χιλιοστού

Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών του laser scanner, μετρήθηκαν οι θέσεις κάποιων από τα βάρη σε τρεις σειρές μετρήσεων, τοποθετώντας στην στέψη τους μια σφαίρα εντοπισμού, διαμέτρου 145mm. Σε κάθε σειρά μετρήσεων υπήρχαν τέσσερις σφαίρες όπου, οι δύο ήταν τοποθετημένες στα ακραία βάρη ενώ οι υπόλοιπες δύο τοποθετούνταν σε διαφορετικά ενδιάμεσα βάρη ανά μέτρηση. Οι ακριβείς θέσεις των σφαιρών στα βάρη ανά σειρά μέτρησης παρουσιάζονται παρακάτω:

1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων: Βάρη 26-21-17-1

2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων: Βάρη 26-12-8-1

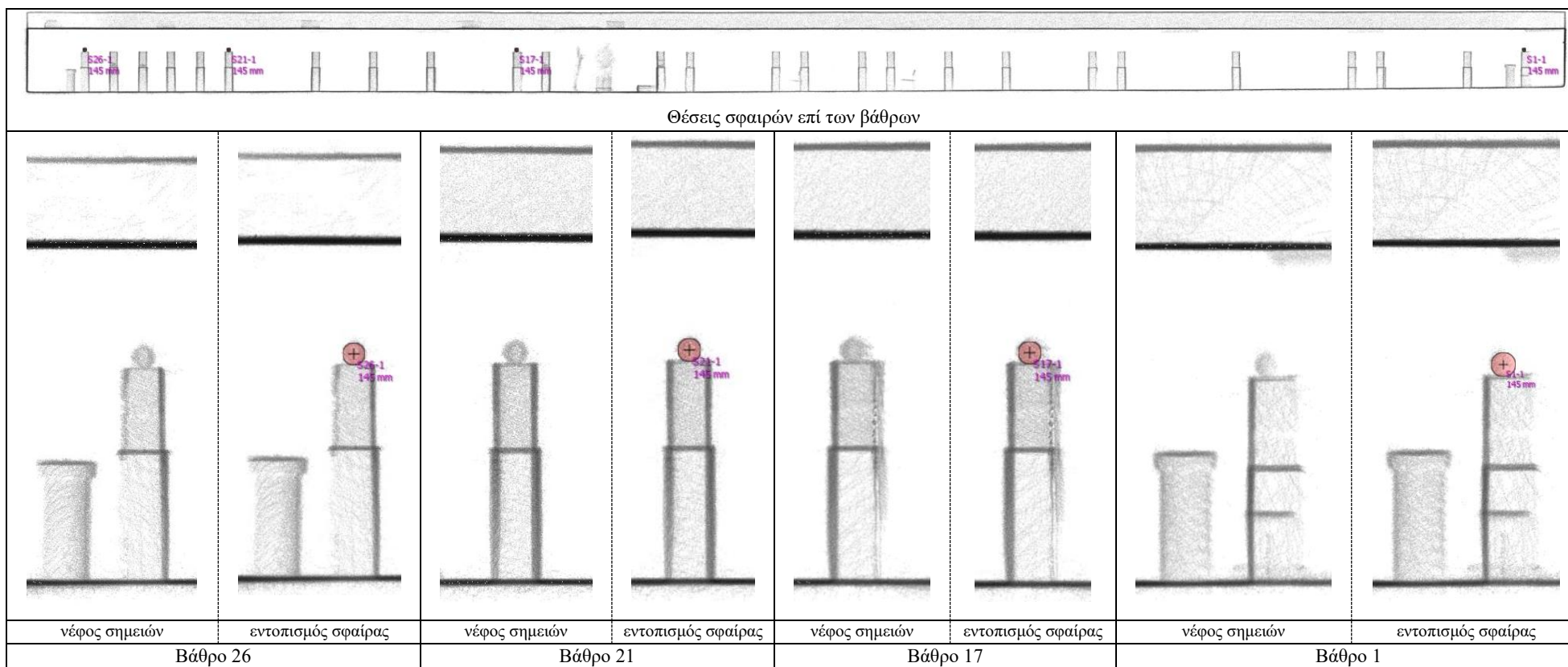
3<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων: Βάρη 26-5-3-1

Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων και από το παραγόμενο νέφος σημείων μέσω του λογισμικού PointCab, προσδιορίστηκε η θέση των σφαιρών σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

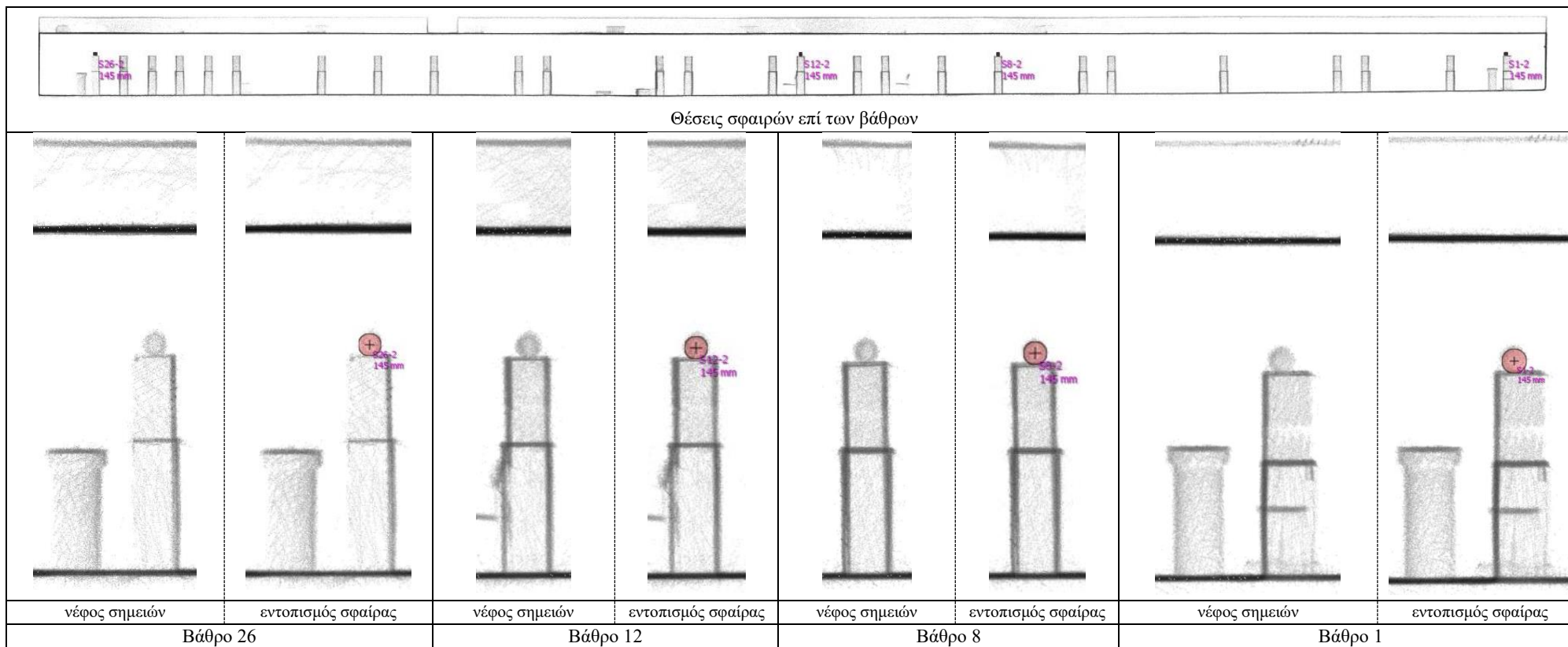
Σειρά μετρήσεων	Βάρο	X (m)	Y (m)	Z (m)
1 <sup>η</sup>	26	2.004	2.320	2.317
	21	7.008	2.310	2.316
	17	17.011	2.294	2.309
	1	52.019	2.240	2.319
2 <sup>η</sup>	26	2.004	2.332	2.307
	12	27.013	2.276	2.298
	8	34.011	2.262	2.298
	1	52.017	2.248	2.316
3 <sup>η</sup>	26	1.998	2.320	2.310
	5	42.008	2.248	2.318
	3	46.986	2.243	2.316
	1	52.012	2.238	2.320

*Πίνακας 6: Συντεταγμένες σφαιρών εντοπισμού σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων από το παραγόμενο νέφος σημείων*

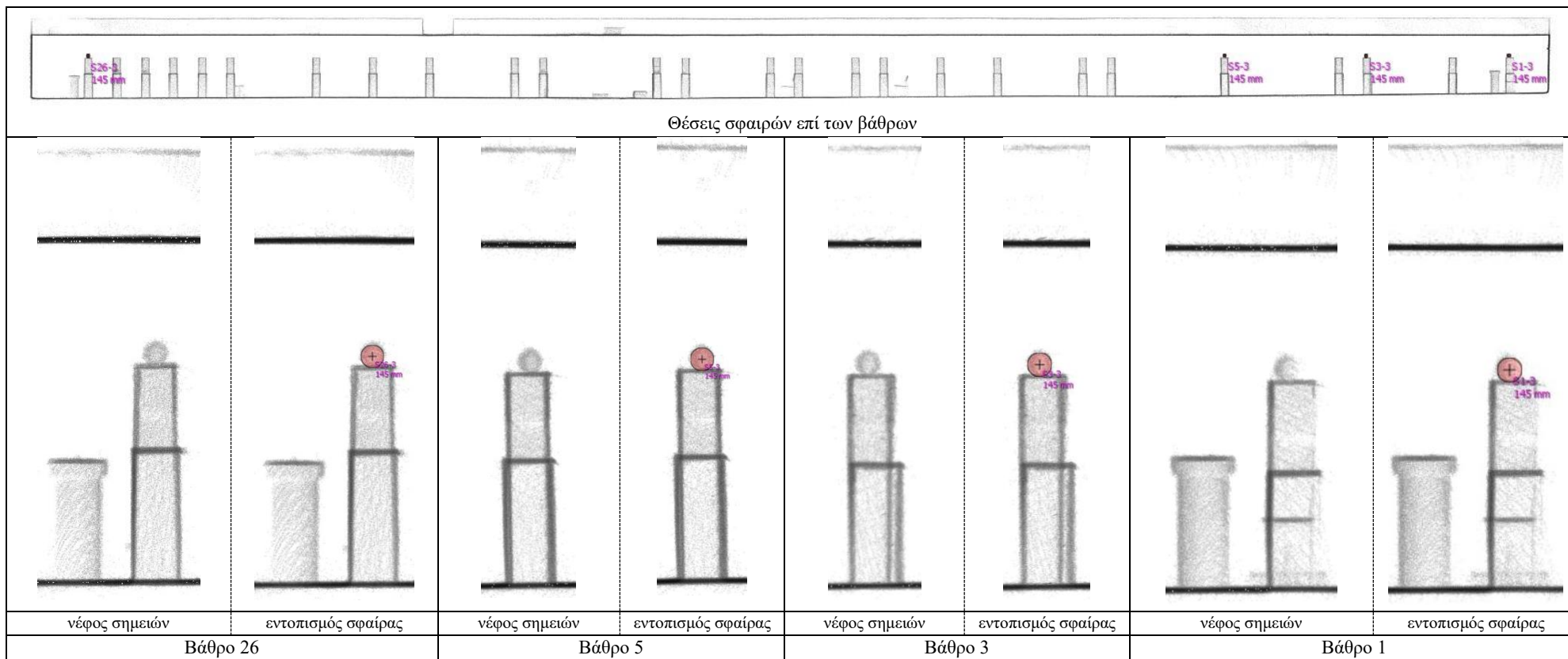
Παρακάτω παρουσιάζονται οι θέσεις των σφαιρών επί των βάρων του εργαστηριακού χώρου Μετρολογίας για κάθε σειρά μέτρησης, καθώς και εντοπισμός τους από το λογισμικό PointCab.



**Εικόνα 18:** 1<sup>η</sup> σειρά μέτρησης - παράθεση της εικόνας του κάθε βάθρου με σφαίρα από το νέφος σημείων και της εικόνας μετά τον εντοπισμό της σφαίρας από το λογισμικό PointCab.



**Εικόνα 19:** 2<sup>η</sup> σειρά μέτρησης - παράθεση της εικόνας του κάθε βάθρου με σφαίρα από το νέφος σημειών και της εικόνας μετά τον εντοπισμό της σφαίρας από το λογισμικό PointCab.



**Εικόνα 20:** 3<sup>η</sup> σειρά μέτρησης - παράθεση της εικόνας του κάθε βάθρου με σφαίρα από το νέφος σημειών και της εικόνας μετά τον εντοπισμό της σφαίρας από το λογισμικό PointCab.

### 4.3.1. Οριζοντιογραφική ακρίβεια μετρήσεων

Για τον προσδιορισμό της οριζοντιογραφικής ακρίβειας μέτρησης του laser scanner, υπολογίστηκαν οι οριζόντιες αποστάσεις των βάθρων μέσω των καρτεσιανών συντεταγμένων από το παραγόμενο νέφος σημείων από την εξίσωση  $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$  και έγινε η αντιπαραβολή τους με τις αποστάσεις D που έχουν προσδιοριστεί από παλαιότερες εργασίες μελών του εργαστηρίου Γεωδαισίας. Οι διαφορές μεταξύ των αποστάσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

		Εργ. Μετρολογίας	Laser scanner	Απόκλιση	Ποσοστιαία απόκλιση %
Σειρά μετρήσεων	Βάθρα	$\mu = D$ (m)	d (m)	$u_i^{xy} = d_i - \mu_i$ (mm)	$(u_i^{xy}/D) \times 100$
1 <sup>η</sup>	26-21	5.001	5.004	3	0.06
	21-17	10.002	10.002	0	0.00
	26-17	15.003	15.007	4	0.03
	17-1	34.997	35.008	11	0.03
	21-1	44.999	45.010	11	0.02
	26-1	50.000	50.015	15	0.03
2 <sup>η</sup>	12-8	6.998	6.998	0	0.00
	8-1	17.997	18.006	9	0.05
	12-1	24.995	25.004	9	0.04
	26-12	25.005	25.009	4	0.02
	26-8	32.003	32.007	4	0.01
	26-1	50.000	50.013	13	0.03
3 <sup>η</sup>	5-3	4.985	4.979	-6	-0.12
	3-1	5.015	5.025	10	0.20
	5-1	10.000	10.004	4	0.04
	26-5	40.000	40.010	10	0.02
	26-3	44.985	44.988	3	0.01
	26-1	50.000	50.014	14	0.03
		<b>Μέγιστη απόκλιση</b>		<b>15mm</b>	<b>0.20%</b>

Πίνακας 7: Οριζοντιογραφική ακρίβεια μετρήσεων (2D)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι:

- Ο απόλυτος Μ.Ο. της τιμής των αποκλίσεων είναι 7mm, με μέγιστο 15mm.
- Ο απόλυτος Μ.Ο. της ποσοστιαίας απόκλισης είναι 0.04%, με μέγιστο 0.20%.
- Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν είναι μικρότερες της ακρίβειας μέτρησης που αναγράφεται στις προδιαγραφές του laser scanner ( $\pm 30$ mm).



### 4.3.2. Υψομετρική ακρίβεια μετρήσεων

Για τον προσδιορισμό της υψομετρικής ακρίβειας μέτρησης του laser scanner, υπολογίστηκαν οι υψομετρικές διαφορές των βάθρων μέσω των καρτεσιανών συντεταγμένων από το παραγόμενο νέφος σημείων από την εξίσωση  $\Delta h = z_2 - z_1$  και έγινε η αντιπαραβολή τους με τις υψομετρικές διαφορές της στέψης των βάθρων όπως έχουν προσδιοριστεί από το εργαστήριο μετρολογίας, οι οποίες είναι μηδενικές  $\Delta H=0.000\text{m}$ . Οι διαφορές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

		Εργ. Μετρολογίας	Εργ. Μετρολογίας	Laser scanner	Απόκλιση	Ποσοστιαία απόκλιση %
Σειρά μετρήσεων	Βάθρα	D (m)	$\mu = \Delta H$ (m)	$\Delta h$ (m)	$u_i^z = \Delta h_i - \mu_i$ (mm)	$(u_i^z/D) \times 100$
1 <sup>η</sup>	26-21	5.001	0	0	0	0.00
	21-17	10.002	0	-0.007	-7	-0.07
	26-17	15.003	0	-0.008	-8	-0.05
	17-1	34.997	0	0.01	10	0.03
	21-1	44.999	0	0.002	2	0.00
	26-1	50.000	0	0.002	2	0.00
2 <sup>η</sup>	12-8	6.998	0	0	0	0.00
	8-1	17.997	0	0.018	18	0.10
	12-1	24.995	0	0.018	18	0.07
	26-12	25.005	0	0.009	9	0.04
	26-8	32.003	0	0.01	10	0.03
	26-1	50.000	0	0.008	8	0.02
3 <sup>η</sup>	5-3	4.985	0	0.002	2	0.04
	3-1	5.015	0	0.004	4	0.08
	5-1	10.000	0	0.002	2	0.02
	26-5	40.000	0	0.008	8	0.02
	26-3	44.985	0	0.006	6	0.01
	26-1	50.000	0	0.01	10	0.02
			<b>Μέγιστη απόκλιση</b>		<b>18mm</b>	<b>0.10%</b>

Πίνακας 8: Υψομετρική ακρίβεια μετρήσεων (1D)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι:

- Ο απόλυτος Μ.Ο. της τιμής των αποκλίσεων είναι 7mm, με μέγιστο 18mm.
- Ο απόλυτος Μ.Ο. της ποσοστιαίας απόκλισης είναι 0.03%, με μέγιστο 0.10%.
- Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν είναι μικρότερες της ακρίβειας μέτρησης που αναγράφεται στις προδιαγραφές του laser scanner ( $\pm 30\text{mm}$ ).

### 4.3.3. Τρισδιάστατη ακρίβεια μετρήσεων

Στις προδιαγραφές του laser scanner αναγράφει ότι η ακρίβεια μέτρησης του είναι  $\pm 30\text{mm}$ . Η διατύπωση που χρησιμοποιείται είναι «scan range noise», από την οποία προκύπτει το συμπέρασμα ότι αναφέρεται σε συνολική ακρίβεια στο χώρο (3D) και δεν διαχωρίζεται σε οριζοντιογραφική (2D) και υψομετρική (1D). Συνεπώς, για να γίνει ορθά ο έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης σε σχέση με την προδιαγραφή του κατασκευαστή, θα υπολογιστεί η τρισδιάστατη/κεκλιμένη απόκλιση των μετρήσεων μέσω της σχέσης  $u_i^{xyz} = \pm \sqrt{(u_i^{xy})^2 + (u_i^z)^2}$ , όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

		Εργ. Μετρολογίας	2D	1D	3D	Ποσοστιαία απόκλιση %
Σειρά Μετρήσεων	Βάθρα	D (m)	$u_i^{xy}$ (mm)	$u_i^z$ (mm)	$u_i^{xyz}$ (mm)	$(u_i^{xyz}/D)\times 100$
1 <sup>η</sup>	26-21	5.001	3	0	3	0.06
	21-17	10.002	0	-7	7	0.07
	26-17	15.003	4	-8	9	0.06
	17-1	34.997	11	10	15	0.04
	21-1	44.999	11	2	11	0.02
	26-1	50.000	15	2	15	0.03

2 <sup>η</sup>	12-8	6.998	0	0	0	0.00
	8-1	17.997	9	18	20	0.11
	12-1	24.995	9	18	20	0.08
	26-12	25.005	4	9	10	0.04
	26-8	32.003	4	10	11	0.03
	26-1	50.000	13	8	15	0.03

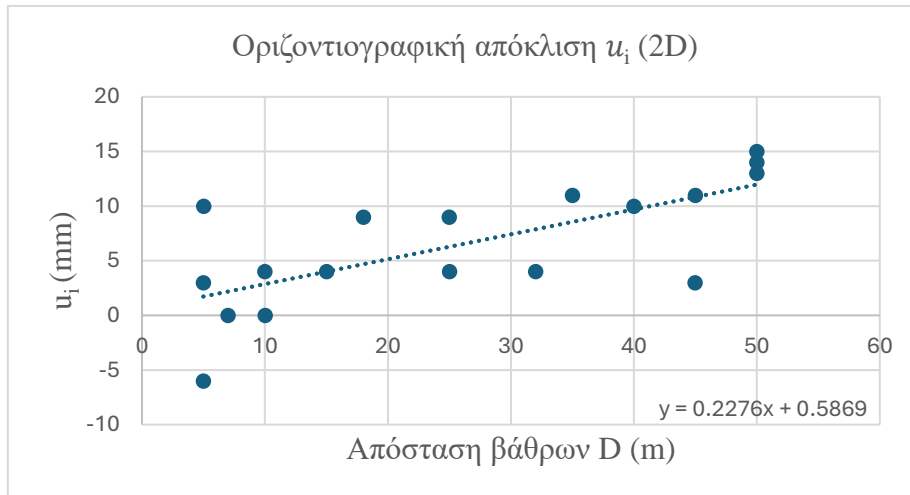
3 <sup>η</sup>	5-3	4.985	-6	2	6	0.13
	3-1	5.015	10	4	11	0.21
	5-1	10.000	4	2	4	0.04
	26-5	40.000	10	8	13	0.03
	26-3	44.985	3	6	7	0.01
	26-1	50.000	14	10	17	0.03
			<b>Μέγιστη απόκλιση</b>	<b>20mm</b>	<b>0.21%</b>	

Πίνακας 9: Τρισδιάστατη ακρίβεια μετρήσεων (3D)

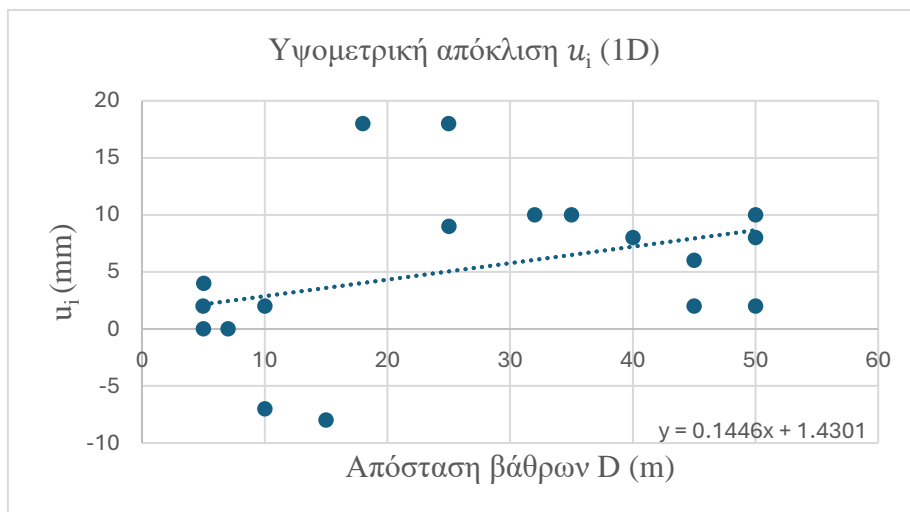
Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι:

- Ο απόλυτος Μ.Ο. της τιμής των αποκλίσεων είναι 11mm, με μέγιστο 20mm.
- Ο απόλυτος Μ.Ο. της ποσοστιαίας απόκλισης είναι 0.06%, με μέγιστο 0.21%.
- Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν είναι μικρότερες της ακρίβειας μέτρησης που αναγράφεται στις προδιαγραφές του laser scanner ( $\pm 30\text{mm}$ ), τόσο οριζοντιογραφικά, όσο υψομετρικά και τρισδιάστατα.

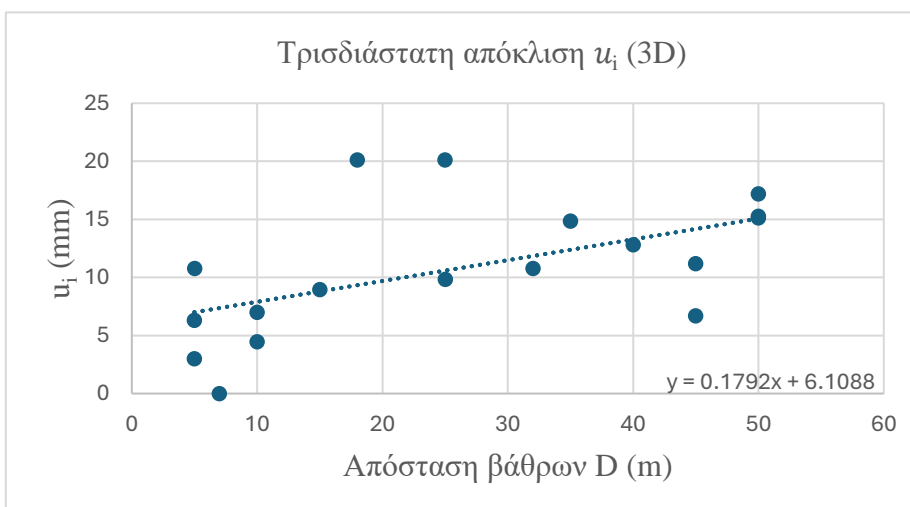
### 4.3.3.1. Διαγράμματα Απόκλισης ( $u_i$ ) - Οριζόντιας απόστασης (D)



Διάγραμμα 1: Σύνολο μετρήσεων – 2D



Διάγραμμα 2: Σύνολο μετρήσεων – 1D



Διάγραμμα 3: Σύνολο μετρήσεων – 3D

## 4.4. Σάρωση κεντρικού κλιμακοστασίου κτηρίου Λαμπαδαρίου

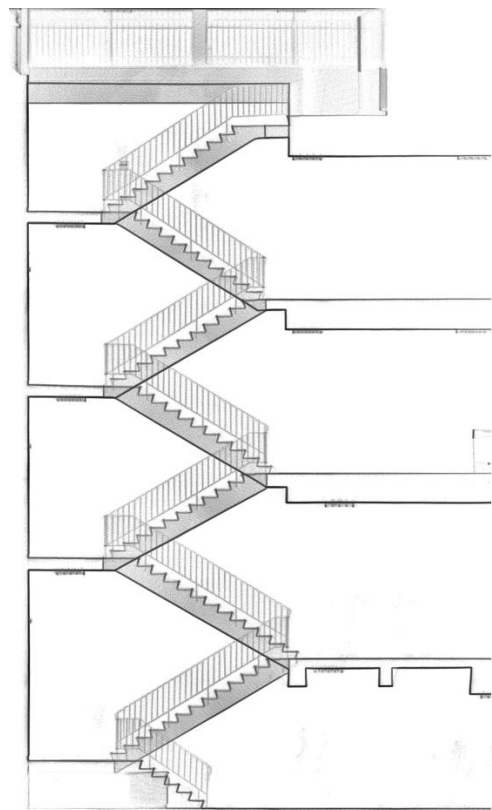
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης υψομετρικών διαφορών με το laser scanner.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο κεντρικό κλιμακοστάσιο του κτηρίου Λαμπαδαρίου από τη στάθμη του υπογείου έως και το δώμα. Αρχικά μετρήθηκαν τα υψόμετρα κάθε στάθμης ορόφου και κάθε πλατύσκαλου με τριγωνομετρική υψομετρία με χρήση γεωδαιτικού σταθμού, από όπου προέκυψαν οι υψομετρικές διαφορές με τις οποίες συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων του laser scanner.

Η μέτρηση με το laser scanner, ξεκίνησε από τη στάθμη του υπογείου με κατεύθυνση το δώμα και επιστροφή ξανά στο υπόγειο. Το σκαρίφημα της πορείας μέτρησης που ακολουθήθηκε καθώς και τομή του κλιμακοστασίου που προέκυψε από το παραγόμενο νέφος σημείων παρουσιάζονται παρακάτω.

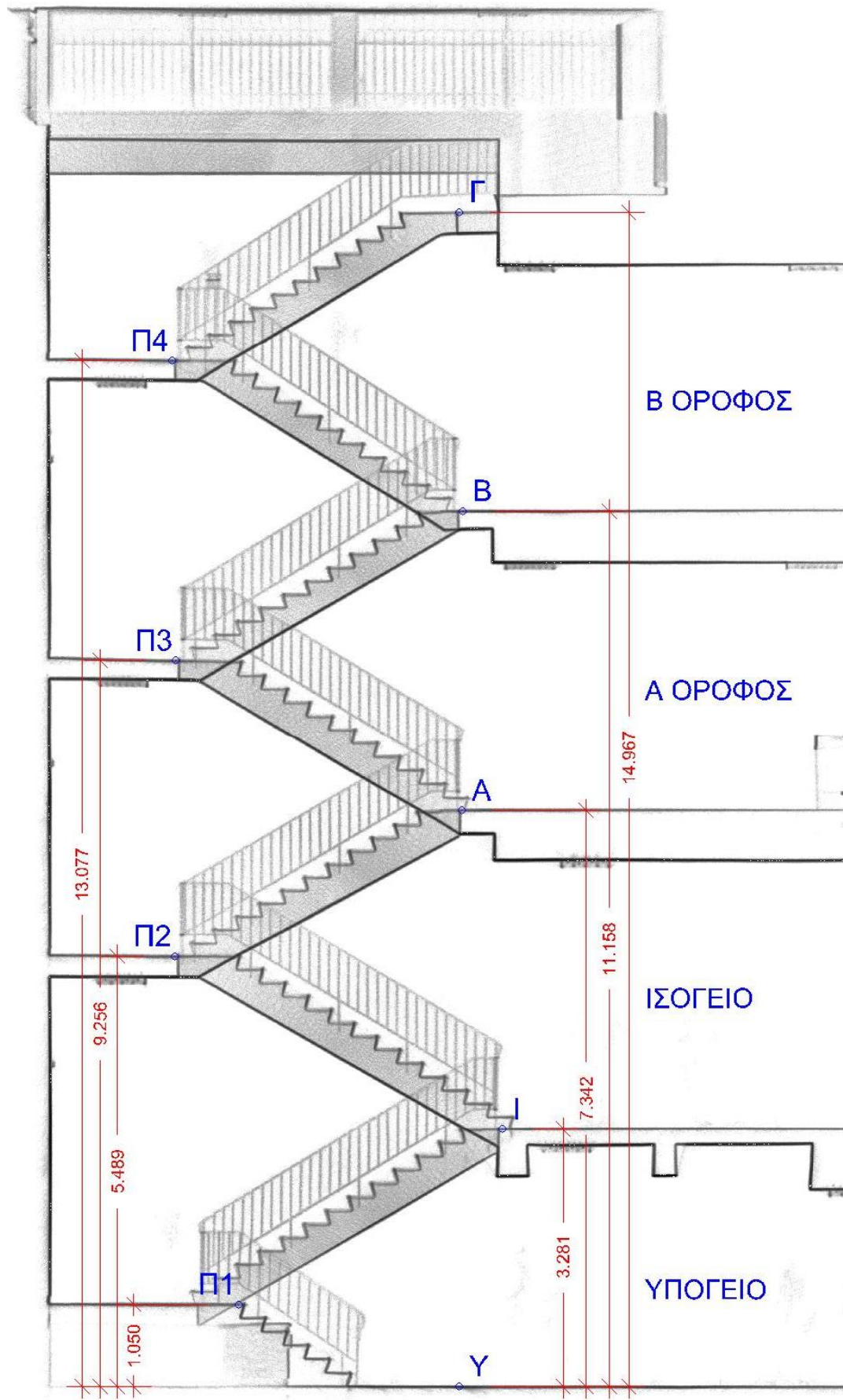


Εικόνα 21: Όδευση μέτρησης κλιμακοστασίου



Εικόνα 22: Τομή κλιμακοστασίου

Από το νέφος σημείων μετρήθηκαν οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ της στάθμης του υπογείου, των ορόφων και των πλατύσκαλων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε τομή στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23: Τομή κλιμακοστασίου με τις υψομετρικές διαφορές από το νέφος σημείων

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των μεγεθών των υψομετρικών διαφορών μεταξύ αυτών που προέκυψαν από τριγωνομετρική υψομετρία και αυτών που προέκυψαν από το laser scanner, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

A/A	Υψομετρικές διαφορές	Τριγωνομετρική υψομετρία (m)	Laser scanner (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta h$ (%)
1	Y-Π1	1.055	1.050	-0.005	-0.47
2	Y-I	3.285	3.281	-0.004	-0.12
3	Y-Π2	5.500	5.489	-0.011	-0.20
4	Y-A	7.340	7.342	0.002	0.03
5	Y-Π3	9.265	9.256	-0.009	-0.10
6	Y-B	11.155	11.158	0.003	0.03
7	Y-Π4	13.085	13.077	-0.008	-0.06
8	Y-Γ	14.960	14.967	0.007	0.05
			<b>Μέγιστη απόκλιση</b>	<b>-0.011m</b>	<b>-0.20%</b>

*Πίνακας 10: Αποτελέσματα μετρήσεων στο κεντρικό κλιμακοστάσιο*

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι:

- Ο απόλυτος Μ.Ο. της τιμής των αποκλίσεων είναι 6mm, με μέγιστο 11mm.
- Ο απόλυτος Μ.Ο. της ποσοστιαίας απόκλισης είναι 0.13%, με μέγιστο 0.47%.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι αποκλίσεις των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών είναι εντός των προδιαγραφών του laser scanner ( $\pm 30\text{mm}$ ).

## 4.5. Πλήρης σάρωση κτηρίου Λαμπαδαρίου

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να ελεγχθεί η ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON σε σχέση με την προδιαγραφή του, εφαρμόζοντας τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή κατά τη διάρκεια της σάρωσης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.

Για να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω έλεγχος, επιλέχθηκε να γίνει πλήρης σάρωση του υπόγειου και του ισόγειου ορόφου του κτηρίου Λαμπαδαρίου καθώς και του περιβάλλοντα χώρου του. Το κτήριο αυτό έχει μέγιστο μήκος περίπου 145m, μέγιστο πλάτος περίπου 52m και παρουσιάζει έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τόσο εξωτερικά με πολλές εσοχές-εξοχές όσο και εσωτερικά με πυκνή διαμερισμάτωση και την ύπαρξη χώρων πολλαπλών χρήσεων (γραφεία, αίθουσες διδασκαλίας, αμφιθέατρα, εργαστήρια, Η/Μ χώροι, κτλ). Η συνολική επιφάνεια των παραπάνω χώρων είναι περίπου 7500m<sup>2</sup>.

Λόγω του μεγέθους του κτηρίου η αποτύπωσή του δεν ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί με μία σάρωση. Για το λόγο αυτό, χωρίστηκε σε έξι τομείς, με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει επαρκής επικάλυψη μεταξύ τους και εντός του κάθε τομέα να υπάρχουν κατ' ελάχιστον τέσσερα τοποσταθερά σημεία, ομοιόμορφα κατενεμημένα, ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί στη συνέχεια ένα ενιαίο υπόβαθρο όλων των χώρων, μέσω της γεωαναφοράς των σαρώσεων.

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Κάθε σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο ίδιο σημείο ώστε να διασφαλιστεί τουλάχιστον ένας κλειστός βρόγχος.
- Όπου ήταν δυνατό, επιδιώχθηκε να δημιουργηθούν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.
- Πριν την έναρξη κάθε σάρωσης, όλες οι πόρτες ήταν ήδη ανοιχτές, ώστε να επιτευχθεί η ομαλότερη δυνατή μετάβαση μεταξύ των χώρων.
- Η ταχύτητα σάρωσης πραγματοποιήθηκε σε ρυθμό αργού περπατήματος.
- Όλοι οι χώροι και τα αντικείμενα προς σάρωση βρίσκονταν σε απόσταση μικρότερη των 50m από τον χειριστή.
- Καμία σάρωση δεν υπερέβη την προτεινόμενη χρονική διάρκεια των 30min.

Συνολικά η όλη διαδικασία για την προετοιμασία των χώρων και την σάρωση των έξι τομέων διήρκεσε περίπου πέντε ώρες.

Οι έλεγχοι για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης θα πραγματοποιηθούν για δύο σενάρια:

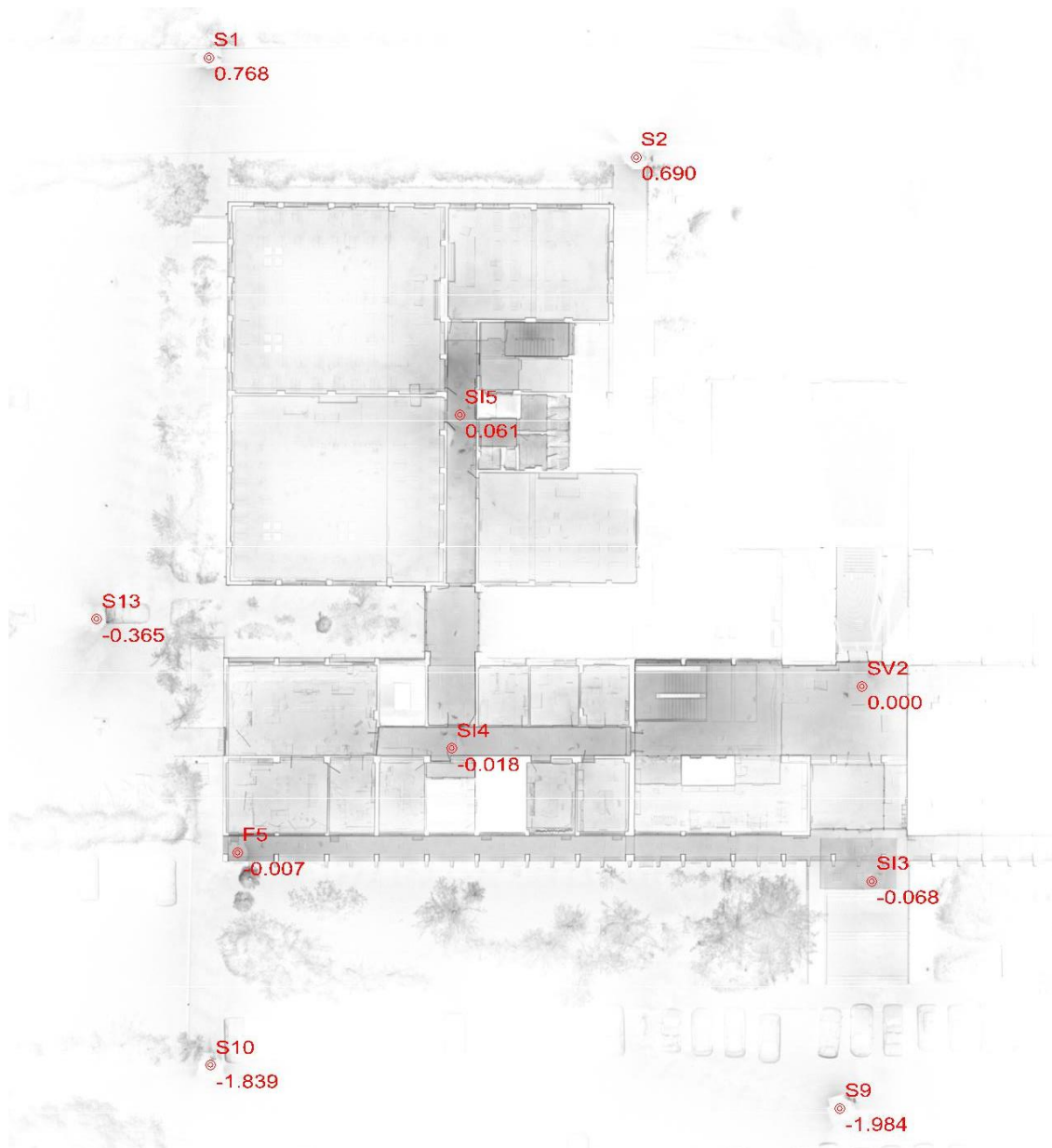
- **Σενάριο 1**, για την γεωαναφορά των σαρώσεων θα χρησιμοποιηθούν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά σημεία για κάθε τομέα.
- **Σενάριο 2**, για την γεωαναφορά των σαρώσεων θα χρησιμοποιηθούν όσα τοποσταθερά είναι απαραίτητα για να επιτευχθεί RMS περίπου  $\pm 0.020m$  ώστε να είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή που είναι  $\pm 0.030m$

### 4.5.1. Σενάριο 1: Επίλυση με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς των τρισδιάστατων νεφών σημείων των έξι τομέων σάρωσης, στο σύστημα αναφοράς της τοπογραφικής αποτύπωσης, κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων τοποσταθερών.

#### 4.5.1.1. Τομέας 1

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 1 ήταν 30min και μετρήθηκαν συνολικά δέκα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό F5. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 24: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 1.*

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των δέκα τοποσταθερών στον Τομέα 1, όπου φαίνεται ότι καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.





*Εικόνα 25: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 1.*

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι, κυρίως στο εσωτερικό του κτηρίου.

A/A	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	S13	89.911	119.222	-0.365	-18.582	-10.682	-0.5	-0.046	0.010	0.004	0.047
2	S9	149.134	80.344	-1.984	20.763	48.33	-2.089	0.035	-0.015	0.016	0.042
3	S1	98.83	163.863	0.768	-63.184	-1.372	0.635	0.011	0.039	0.011	0.042
4	S2	132.878	155.945	0.690	-54.971	32.643	0.558	0.039	-0.002	0.004	0.039
5	SI5	118.826	135.46	0.061	-34.596	18.394	-0.085	-0.006	0.003	-0.010	0.012
6	SI4	118.201	108.945	-0.018	-8.082	17.56	-0.159	-0.016	-0.002	-0.009	0.019
7	F5	101.119	100.668	-0.007	0.086	0.409	-0.147	-0.024	-0.021	-0.006	0.032
8	SI3	151.64	98.398	-0.068	2.696	50.946	-0.193	0.011	0.017	-0.002	0.020
9	S10	98.975	83.755	-1.839	17.009	-1.84	-1.971	-0.002	-0.047	0.000	0.047
10	SV2	150.89	113.884	0	-12.797	50.299	-0.134	-0.002	0.019	-0.008	0.021
											<b>RMS [m]=0.034</b>

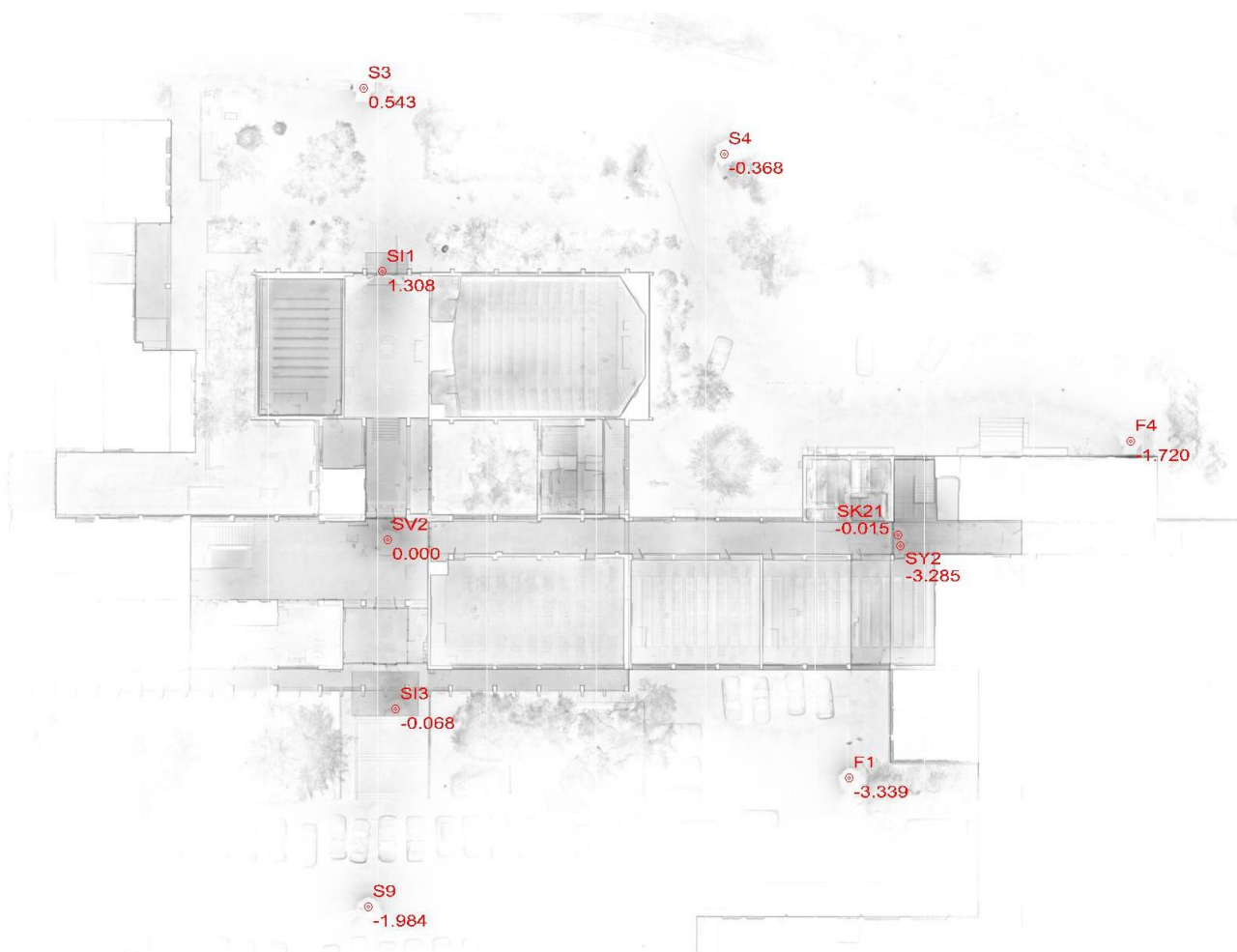
Πίνακας 11: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 1 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 1 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.034m, που είναι οριακά μεγαλύτερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι τα S13, S9, S1, S2, S10, τα οποία αξίζει να επισημανθεί ότι είναι εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο.

#### 4.5.1.2. Τομέας 2

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 2 ήταν 30min και μετρήθηκαν συνολικά δέκα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά της σάρωσης. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό SV2. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 26: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 2.*

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των δέκα τοποσταθερών στον Τομέα 2, όπου φαίνεται ότι καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 27: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 2.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι, κυρίως στο εσωτερικό του κτηρίου.

	Reference system:				Pointcloud system:			Residuals:			
A/ A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	46.465	-5.776	-3.403	0.003	0.012	-0.006	0.014
2	F1	193.083	92.126	-3.339	39.466	-26.356	-3.458	0.020	-0.011	-0.003	0.023
3	F4	218.832	122.899	-1.72	68.426	1.4	-1.812	0.019	-0.024	0.010	0.031
4	S3	148.707	155.155	0.543	2.214	41.198	0.422	-0.027	0.030	0.009	0.041
5	SV2	150.89	113.884	0	-0.113	-0.105	-0.145	-0.001	-0.008	-0.012	0.014
6	SK21	197.56	114.28	-0.015	46.329	-4.825	-0.132	0.009	-0.011	-0.005	0.015
7	S9	149.134	80.344	-1.984	-5.54	-33.27	-2.107	-0.009	-0.028	0.015	0.033
8	SI3	151.64	98.398	-0.068	-1.074	-15.585	-0.21	-0.011	-0.015	-0.007	0.020
9	S4	181.67	149.141	-0.368	34.36	31.617	-0.487	0.012	0.040	-0.003	0.042
10	SI1	150.423	138.384	1.308	2.095	24.322	1.179	-0.013	0.014	0.002	0.019
											<b>RMS [m]=0.027</b>

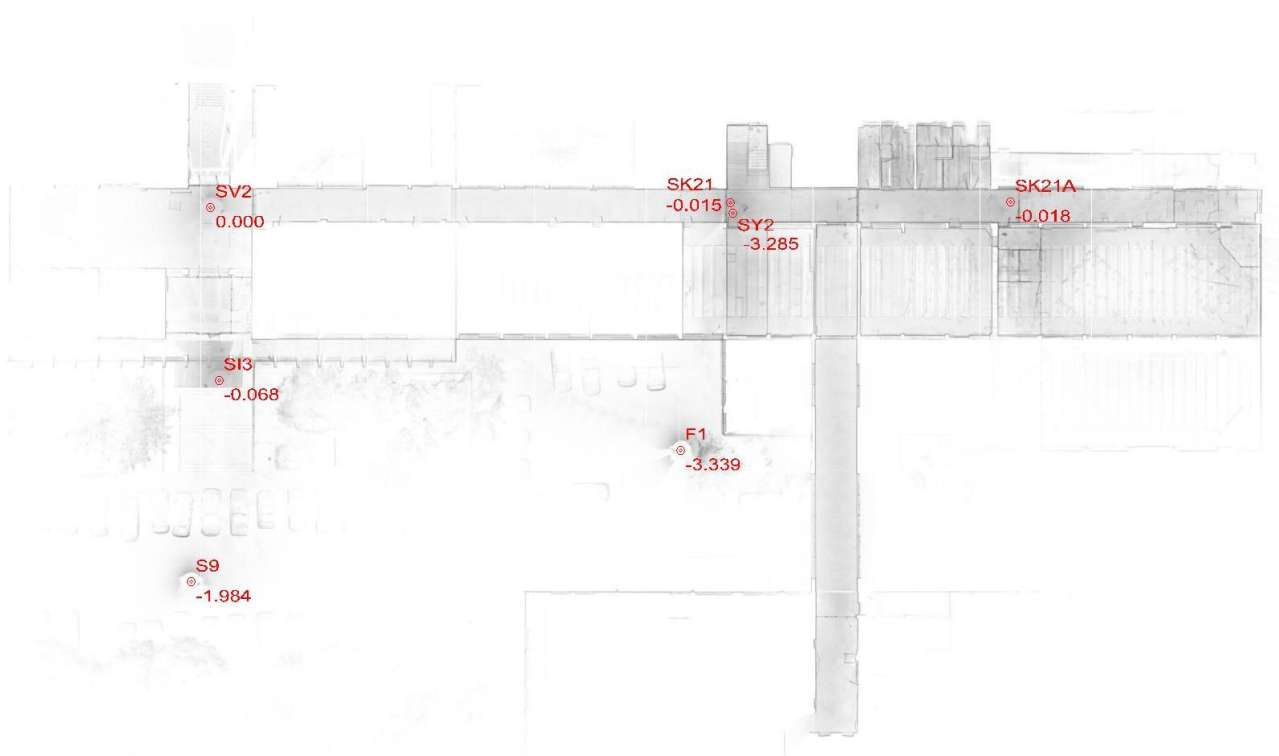
Πίνακας 12: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 2 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 2 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.027m, που είναι οριακά μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι τα S3, S4, τα οποία αξίζει να επισημανθεί ότι είναι εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο.

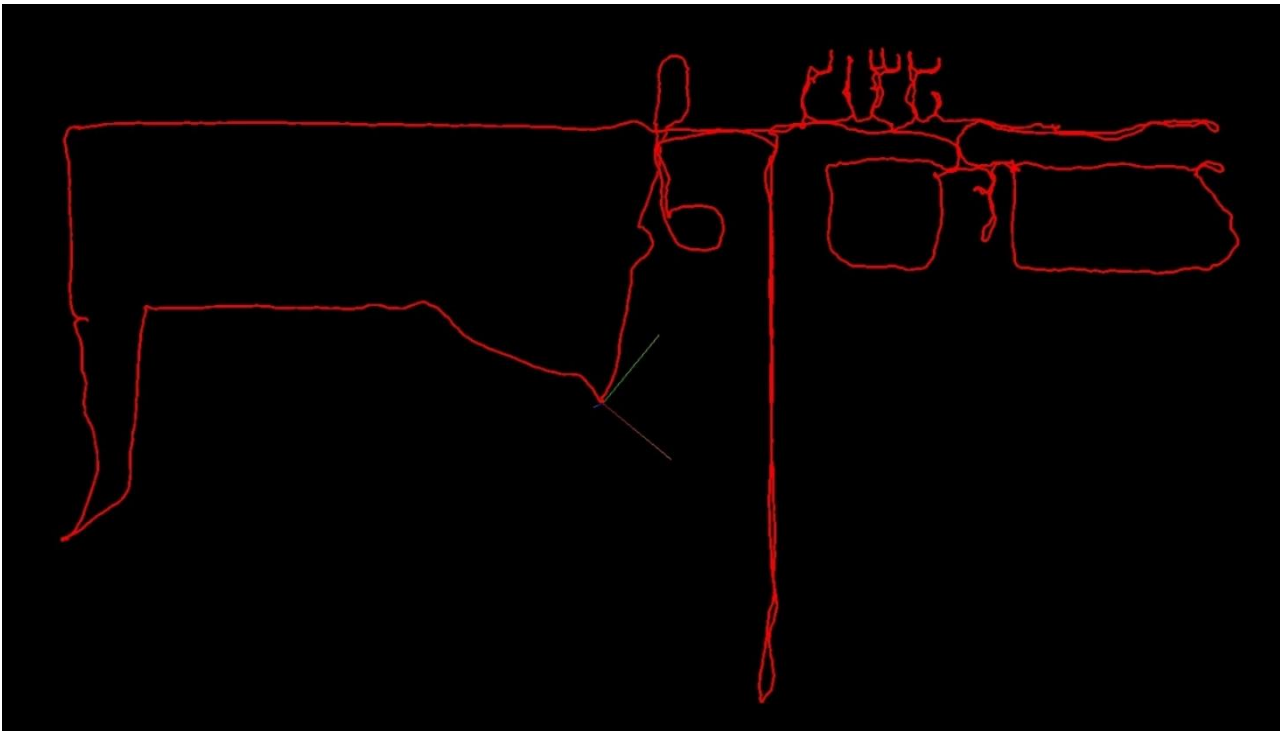
### 4.5.1.3. Τομέας 3

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 3 ήταν 18min και μετρήθηκαν συνολικά επτά τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά της σάρωσης. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό F1. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 28: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 3.*

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ότι το πλήθος και η θέση των επτά τοποσταθερών καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 29: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 3.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι, κυρίως στο εσωτερικό του κτηρίου.

A/A	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SV2	150.89	113.884	0	-46.876	-8.889	3.209	0.006	0.013	0.000	0.014
2	SY2	197.804	113.326	-3.285	-9.741	19.789	-0.089	0.009	0.001	-0.003	0.009
3	SI3	151.64	98.398	-0.068	-36.672	-20.585	3.143	-0.005	-0.005	0.001	0.007
4	F1	193.083	92.126	-3.339	-0.271	0.216	-0.151	0.003	-0.023	-0.014	0.027
5	S9	149.134	80.344	-1.984	-27.435	-36.306	1.234	-0.017	-0.010	0.006	0.020
6	SK21A	222.706	114.392	-0.018	9.107	36.093	3.186	0.004	0.016	0.010	0.019
7	SK21	197.56	114.28	-0.015	-10.533	20.386	3.185	0.002	0.007	0.001	0.007
										<b>RMS [m]=0.016</b>	

Πίνακας 13: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 3 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 3 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.016m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030$ m).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλισή τους είναι μικρότερη της ονομαστικής ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030$ m).

#### 4.5.1.4. Τομέας 4

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 4 ήταν 29min και μετρήθηκαν συνολικά οκτώ τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά της σάρωσης. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό F1. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 30: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 4.*

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ότι το πλήθος και η θέση των οκτώ τοποσταθερών καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 31: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 4.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του κτηρίου.

A/A	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	F2	223.726	90.068	-4.153	29.226	-5.577	-0.958	0.001	-0.006	-0.010	0.011
2	SY1	230.875	113.636	-3.289	38.791	17.13	-0.098	0.006	0.004	-0.010	0.012
3	F1	193.083	92.126	-3.339	-1.063	-0.328	-0.143	-0.026	0.008	0.009	0.029
4	S5	230.169	138.135	-2.166	40.602	41.582	1.029	-0.029	0.012	0.002	0.031
5	F3	245.131	108.718	-3.303	52.471	10.749	-0.101	0.019	-0.003	-0.009	0.021
6	SY2	197.804	113.326	-3.285	5.87	20.272	-0.094	0.007	0.017	0.008	0.020
7	S6	263.893	107.42	-4.735	71.014	7.505	-1.499	0.036	-0.003	0.015	0.039
8	F4	218.832	122.899	-1.72	27.753	27.565	1.467	-0.014	-0.029	-0.005	0.032
										<b>RMS [m]=0.026</b>	

Πίνακας 14: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 4 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

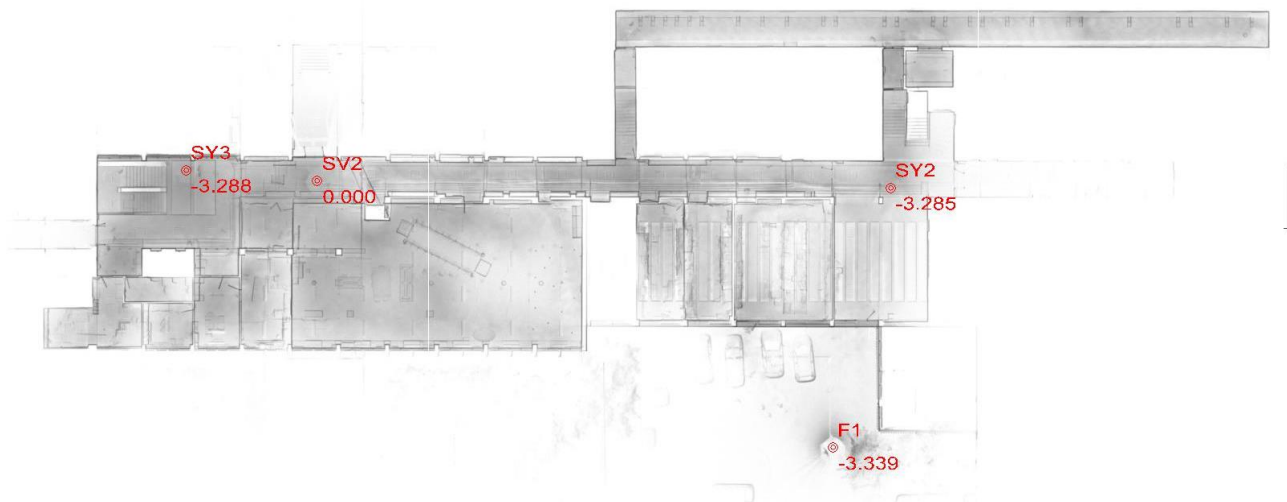


Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 4 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.026m, που είναι οριακά μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι αυτό με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι το S6, το οποίο αξίζει να επισημανθεί ότι είναι εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο.

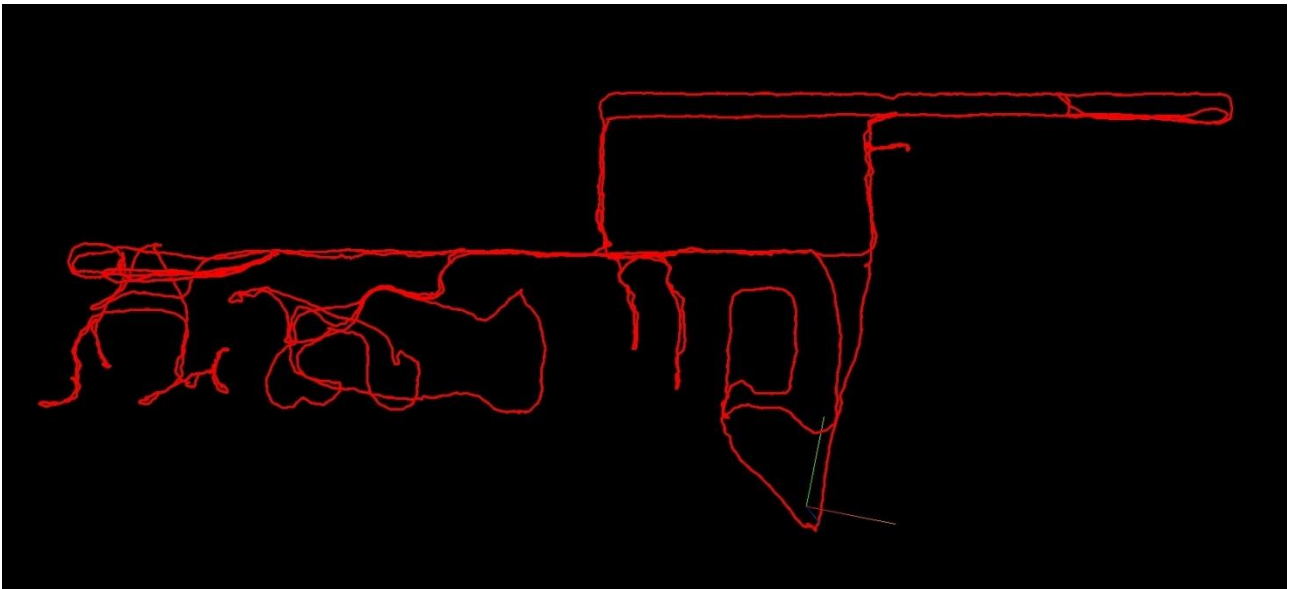
#### 4.5.1.5. Τομέας 5

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 5 ήταν 25min και μετρήθηκαν συνολικά τέσσερα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά της σάρωσης. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό F1. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 32: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 5.*

Στον συγκεκριμένο τομέα υπήρξε τεχνική δυσκολία στην επίτευξη περαιτέρω πύκνωσης των τοποσταθερών λόγω του ότι αφορά υπόγειους αδιέξοδους χώρους. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, τα τέσσερα τοποσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν προσφέρουν επαρκή κάλυψη της περιοχής σάρωσης.



Εικόνα 33: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 5.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι στο εσωτερικό του κτηρίου.

	Reference system:				Pointcloud system:			Residuals:			
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	0.920	20.393	-0.121	-0.003	0.006	0.000	0.007
2	F1	193.083	92.126	-3.339	0.396	-1.334	-0.167	0.014	-0.013	0.000	0.019
3	SV2	150.89	113.884	0	-45.214	11.893	3.174	0.003	0.002	0.001	0.004
4	SY3	140.132	114.768	-3.288	-55.958	10.684	-0.114	-0.014	0.005	-0.001	0.015
											<b>RMS [m]=0.013</b>

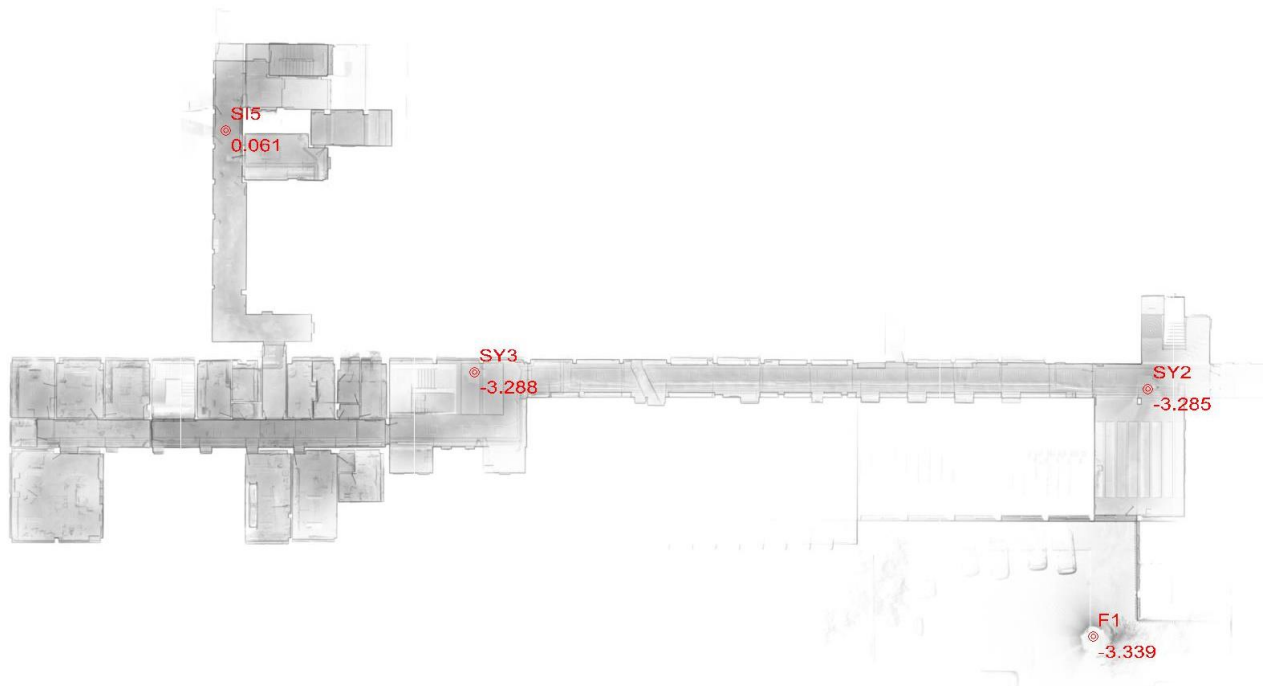
Πίνακας 15: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 5 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 5 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.013m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλισή τους είναι μικρότερη της ονομαστικής ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

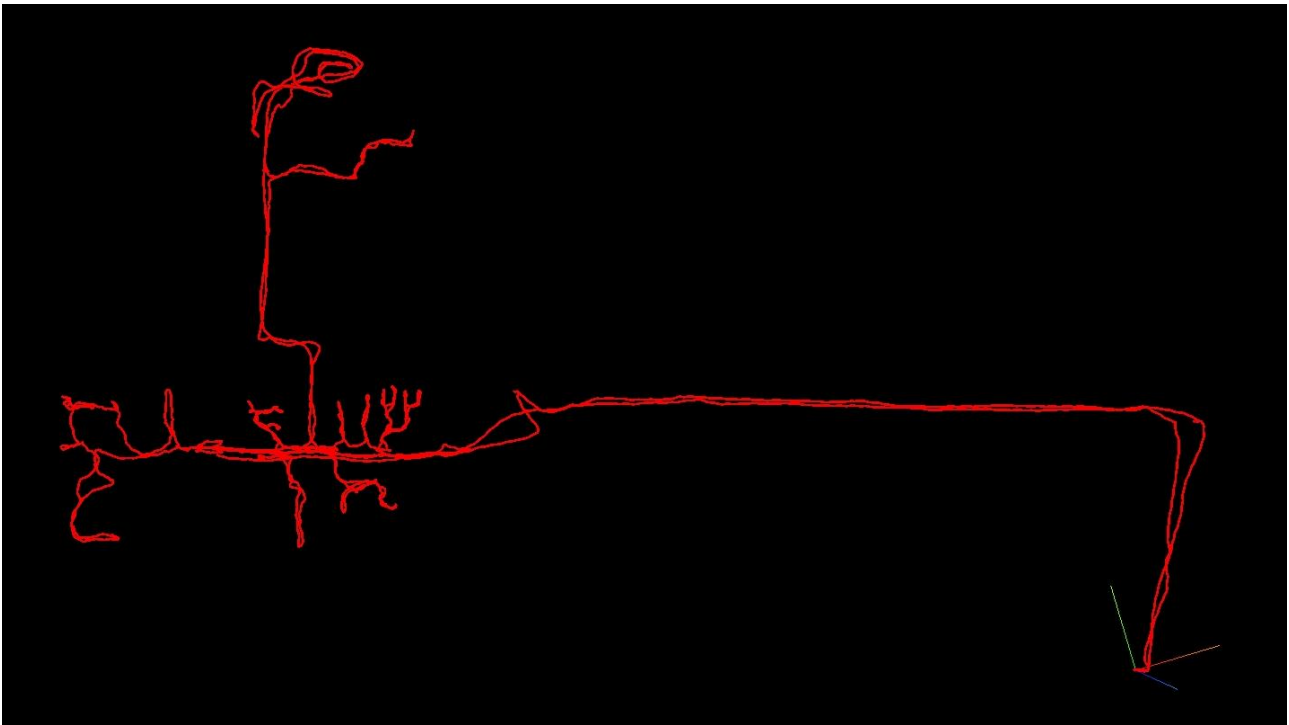
#### 4.5.1.6. Τομέας 6

Η διάρκεια σάρωσης του Τομέα 6 ήταν 22min και μετρήθηκαν συνολικά τέσσερα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά της σάρωσης. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό F1. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 34: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 6.*

Στον συγκεκριμένο τομέα υπήρξε τεχνική δυσκολία στην επίτευξη περαιτέρω πύκνωσης των τοποσταθερών λόγω του ότι αφορά υπόγειους αδιέξοδους χώρους. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, τα τέσσερα τοποσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν προσφέρουν επαρκή κάλυψη της περιοχής σάρωσης.



Εικόνα 35: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης του Τομέα 6.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δημιουργήθηκαν πολλοί επιπλέον κλειστοί βρόγχοι στο εσωτερικό του κτηρίου.

		Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:			
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	10.691	18.955	-0.072	0.009	0.006	0.000	0.011
2	SI5	118.826	135.46	0.061	-58.344	63.24	3.289	0.005	-0.016	-0.005	0.017
3	F1	193.083	92.126	-3.339	-0.06	0.064	-0.152	-0.013	-0.006	-0.002	0.014
4	SY3	140.132	114.768	-3.288	-44.033	37.247	-0.071	-0.001	0.015	0.006	0.016
										<b>RMS [m]=0.015</b>	

Πίνακας 16: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 6 με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 6 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.015m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλισή τους είναι μικρότερη της ονομαστικής ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

#### 4.5.1.7. Σύνοψη συμπερασμάτων επίλυσης πρωτογενών δεδομένων σάρωσης και γεωαναφοράς Σεναρίου 1

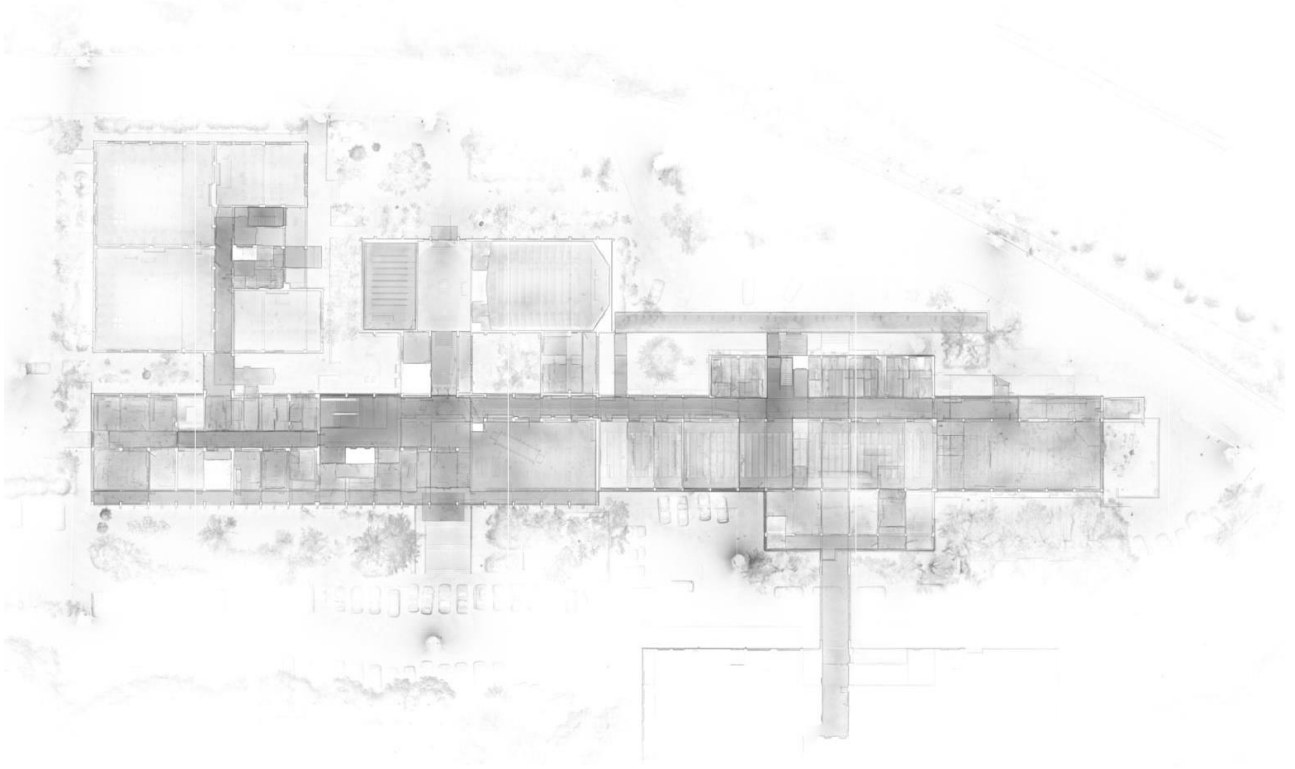
Βάσει των έως τώρα αποτελεσμάτων των επιλύσεων των πρωτογενών δεδομένων και των γεωαναφορών τους, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **Αξιοπιστία και Ακρίβεια των Μετρήσεων:** Το τρισδιάστατο νέφος σημείων και οι συντεταγμένες των τοποσταθερών στο τοπικό ανεξάρτητο σύστημα της σάρωσης, προκύπτουν αυτόματα από τον αλγόριθμο SLAM με την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων από το λογισμικό GeoSLAM Hub, χωρίς την δυνατότητα επέμβασης από το χρήστη. Στη συνέχεια μέσω της διαδικασίας της γεωαναφοράς, γίνεται προσαρμογή της θέσης των τοποσταθερών από το τοπικό σύστημα της σάρωσης σε αυτό της τοπογραφικής αποτύπωσης. Η απόκλιση με την οποία επιτυγχάνεται η παραπάνω προσαρμογή δίνεται από το μέγεθος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS) και αποτελεί κριτήριο ελέγχου της ακρίβειας μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON. Τα έως τώρα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μετρήσεις βρίσκονται γενικά εντός των ορίων ακρίβειας που δηλώνει ο κατασκευαστής ( $\pm 0.030\text{m}$ ). Το RMS σε όλους τους τομείς δείχνει ότι το σύστημα σάρωσης είναι αξιόπιστο.
- **Κατανομή Σφαλμάτων Ανά Άξονες:** Από τα έως τώρα αποτελέσματα φαίνεται ότι η υψομετρική ακρίβεια (άξονας Z) είναι γενικά καλύτερη σε σχέση με την οριζοντιογραφική (άξονες X και Y). Αυτό καταδεικνύει ότι ο σαρωτής είναι περισσότερο ακριβής στον καθορισμό του ύψους.
- **Επίπτωση του Αριθμού και της Θέσης των Τοποσταθερών:** Από τα έως τώρα αποτελέσματα δεν παρατηρείται συσχέτιση του μεγέθους της απόκλισης RMS με τον αριθμό των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την γεωαναφορά. Αντίθετα παρατηρείται συσχέτιση ανάμεσα στο μέγεθος της απόκλισης που εμφανίζει ένα τοποσταθερό σε σχέση με το γεωμετρικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται σε αυτά που βρίσκονται εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο, σε περιβάλλον φτωχό σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάρκινγκ, δρόμος), ενώ αντίθετα σε όλα όσα βρίσκονται εντός ή κοντά στο κτήριο, άρα σε περιβάλλον με έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από το όριο ακρίβειας του κατασκευαστή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).

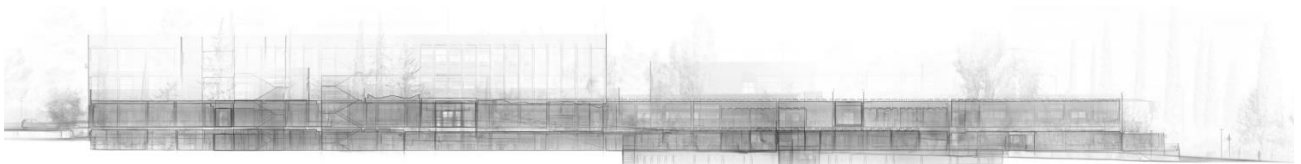
Τομείς σάρωσης	Διάρκεια σάρωσης (min)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)	Τοποσταθερά με $\text{RMS} \geq 0.035\text{m}$
1	30	10	0.034	0.047	S13, S9, S1, S2, S10
2	30	10	0.027	0.042	S3, S4
3	18	7	0.016	0.027	-
4	29	8	0.026	0.039	S6
5	25	4	0.013	0.019	-
6	22	4	0.015	0.017	-

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γεωαναφορών.

Με την ολοκλήρωση των γεωαναφορών των επιμέρους σαρώσεων, δημιουργήθηκε το συνολικό τρισδιάστατο νέφος σημείων του κτηρίου Λαμπαδαρίου, από το οποίο θα προσδιοριστεί η πραγματική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή, μέσω των σημείων ελέγχου. Στη συνέχεια παρατίθεται μια κάτοψη, μια διαμήκης και μια εγκάρσια τομή του.



*Εικόνα 36: Προεπισκόπηση κάτοψης συνολικού τρισδιάστατου μοντέλου.*



*Εικόνα 37: Προεπισκόπηση διαμήκους τομής συνολικού τρισδιάστατου μοντέλου.*



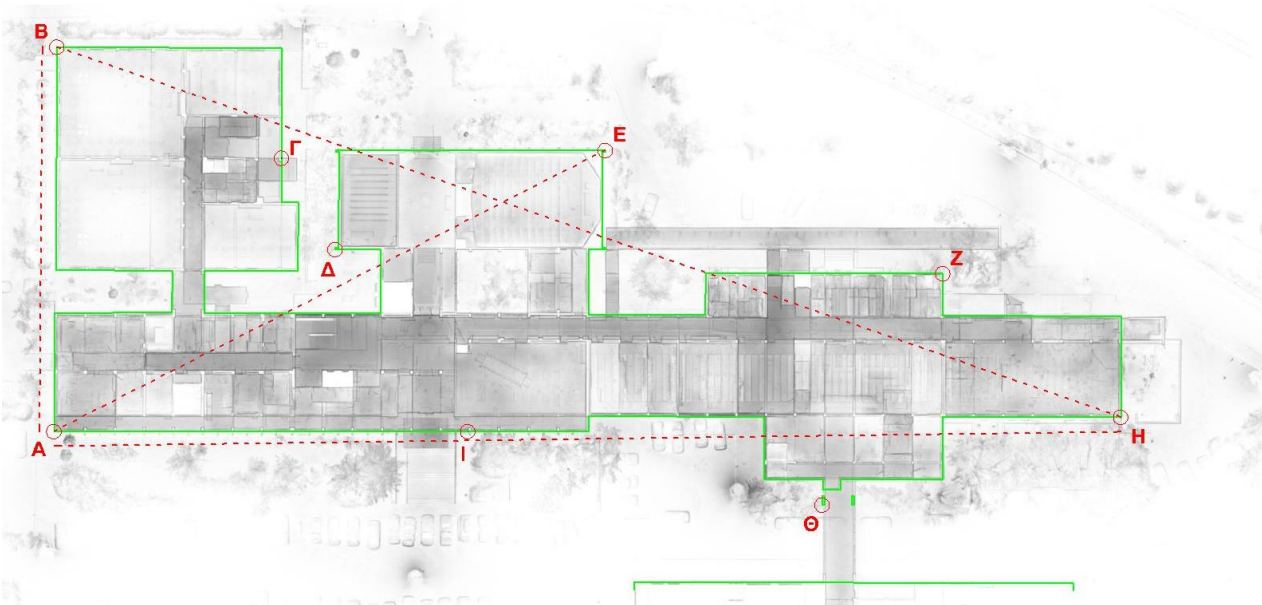
*Εικόνα 38: Προεπισκόπηση εγκάρσιας τομής συνολικού τρισδιάστατου μοντέλου.*

#### 4.5.1.8. Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ένδειξη των αποκλίσεων στα σημεία και στις αποστάσεις ελέγχου.

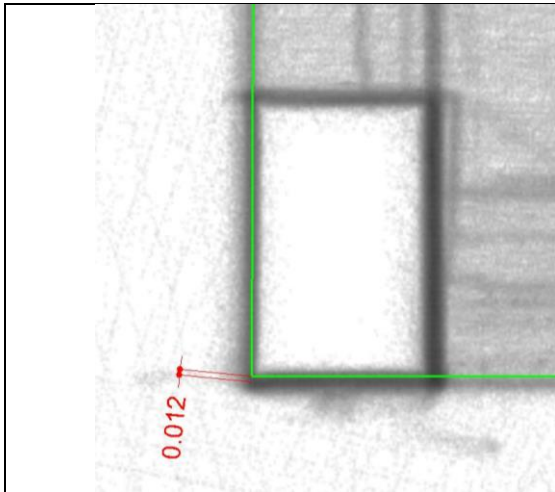
	Σημεία	Περιγραφή	Τομέας σάρωσης
Σημεία ελέγχου	A	γωνία κολόνας	1
	B	γωνία κτηρίου	1
	Γ οριζοντιογραφικά	συμβολή κολόνας-δοκού	2
	Γ υψομετρικά	συμβολή κολόνας-δοκού	2
	Δ	γωνία κολόνας	2
	E	γωνία κολόνας	2
	Z	γωνία κτηρίου	2,4
	H	γωνία κτηρίου	4
	Θ	γωνία κολόνας	4
	Ι οριζοντιογραφικά	συμβολή κολόνας-δοκού	1,3
	Ι υψομετρικά	συμβολή κολόνας-δοκού	1,3
Αποστάσεις ελέγχου	A-B	γωνίες κολόνας-κτηρίου	1
	A-E	γωνίες κολόνας	1,2
	A-H	γωνίες κολόνας-κτηρίου	1,4
	B-H	γωνίες κτηρίου	1,4

Πίνακας 18: Περιγραφή σημείων και αποστάσεων ελέγχου.



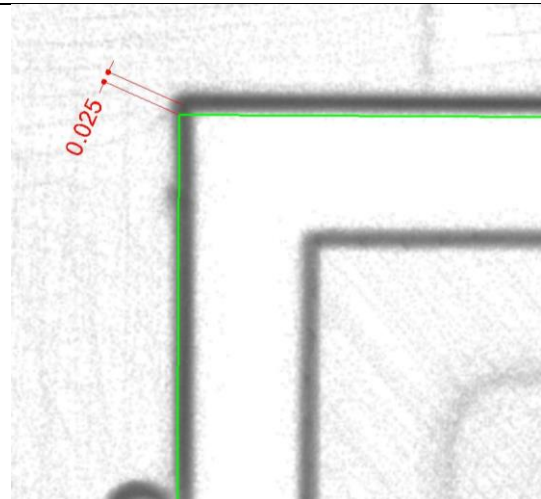
Εικόνα 39: Σκαρίφημα ένδειξης θέσης σημείων και αποστάσεων ελέγχου.

#### 4.5.1.8.1. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου για το Σενάριο 1



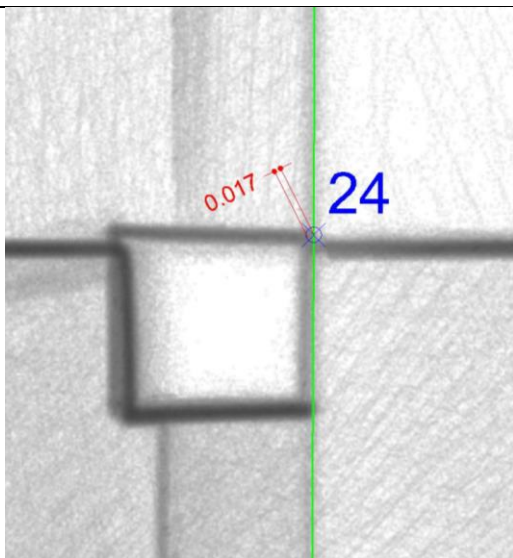
Εικόνα 40

Σημείο Ελέγχου Α



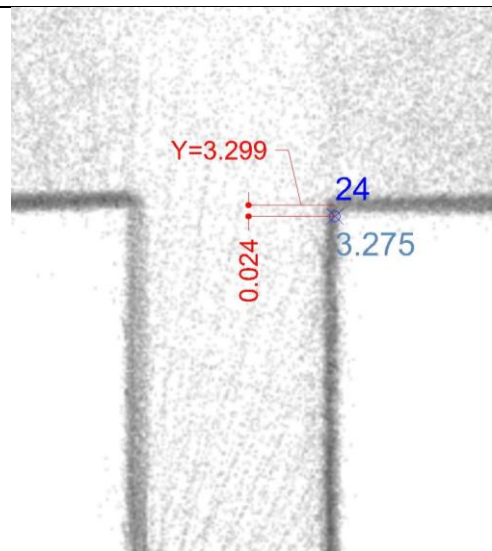
Εικόνα 41

Σημείο Ελέγχου Β



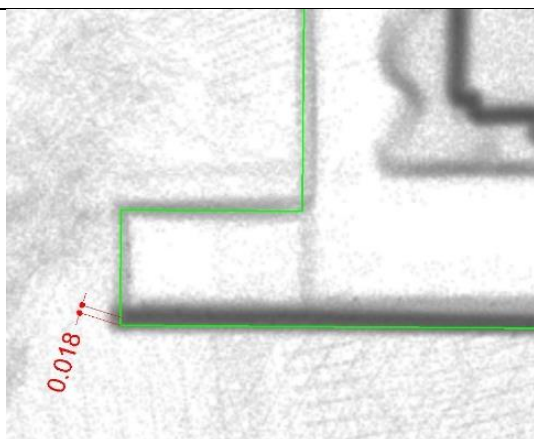
Εικόνα 42

Σημείο Ελέγχου Γ (οριζοντιογραφικά)



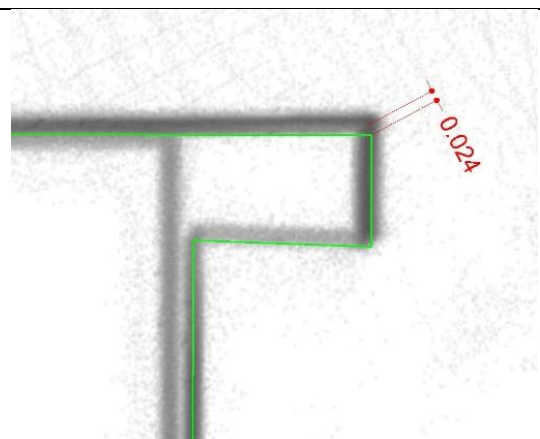
Εικόνα 43

Σημείο Ελέγχου Γ (υψομετρικά)



Εικόνα 44

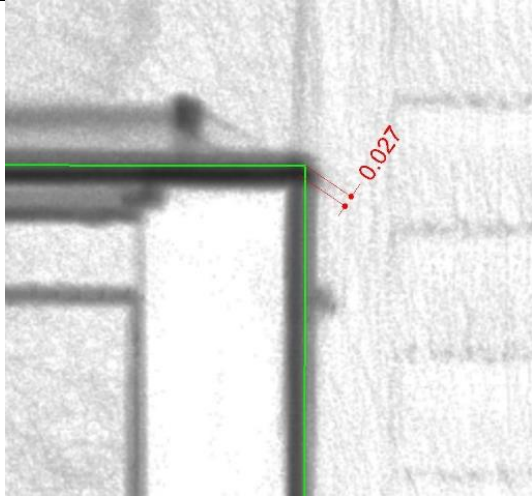
Σημείο Ελέγχου Δ



Εικόνα 45

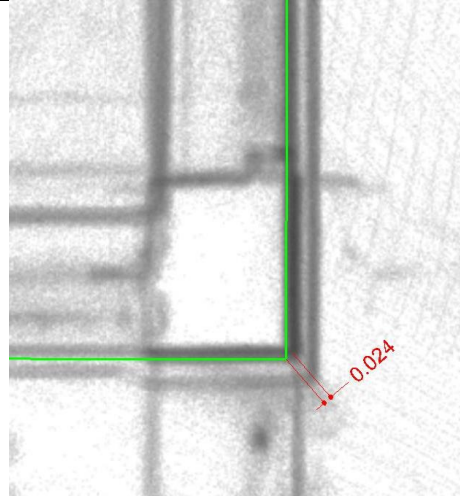
Σημείο Ελέγχου Ε





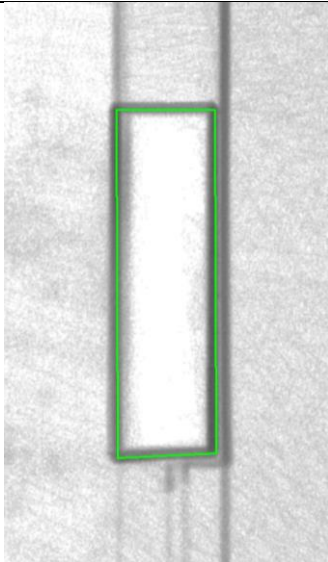
Εικόνα 46

Σημείο Ελέγχου Z



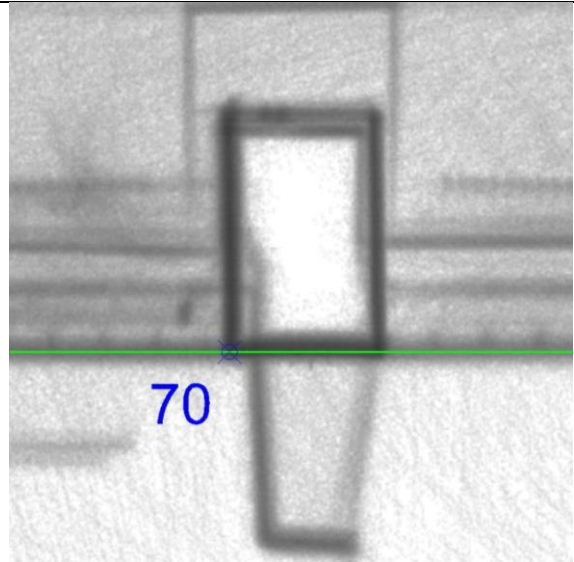
Εικόνα 47

Σημείο Ελέγχου Η



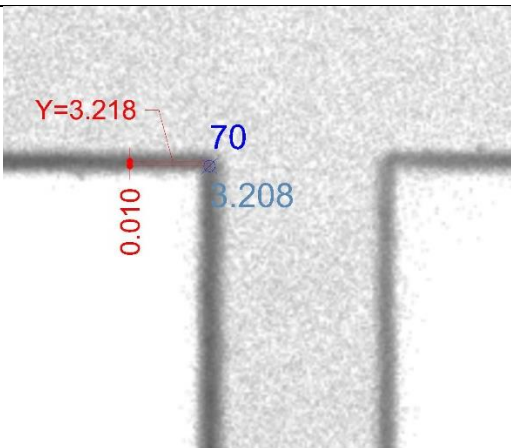
Εικόνα 48

Σημείο Ελέγχου Θ



Εικόνα 49

Σημείο Ελέγχου Ι (οριζοντιογραφικά)



Εικόνα 50

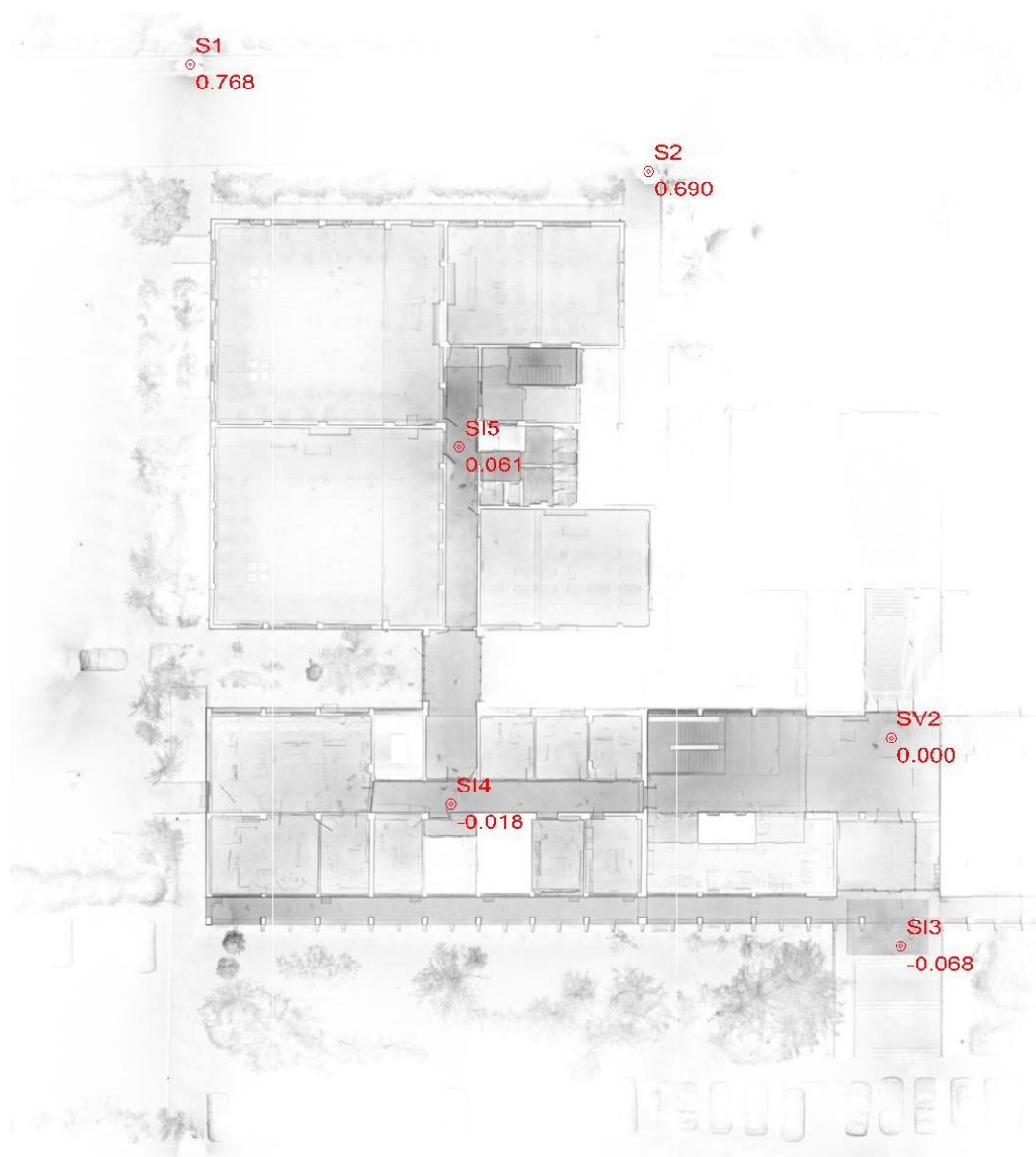
Σημείο Ελέγχου Ι (υψομετρικά)

## 4.5.2. Σενάριο 2: Επίλυση γεωαναφοράς με σκοπό να επιτευχθεί $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς των τρισδιάστατων νεφών σημείων των έξι τομέων σάρωσης, στο σύστημα αναφοράς της τοπογραφικής αποτύπωσης, κάνοντας χρήση όσων τοποσταθερών απαιτείται ώστε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) να προκύψει περίπου 0.020m, μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

### 4.5.2.1. Τομέας 1

Για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ , χρησιμοποιήθηκαν έξι από τα διαθέσιμα δέκα τοποσταθερά εντός του τομέα. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαρίφημα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



Εικόνα 51: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 1 για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η θέση των έξι τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, όπου παρατηρείται έλλειψη κάλυψης στο κάτω αριστερά μέρος της περιοχής σάρωσης. Από τα συνολικά δέκα διαθέσιμα, δεν χρησιμοποιήθηκαν τα S13, S10, S9, F5, εκ των οποίων τα S13, S10, S9 είναι εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο, ενώ εμφάνιζαν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στην γεωαναφορά που χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

A/A	Reference system:				Pointcloud system:			Residuals:			
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SV2	150.890	113.884	0.000	-12.797	50.299	-0.134	-0.004	0.014	-0.003	0.014
2	SI5	118.826	135.460	0.061	-34.596	18.394	-0.085	-0.014	-0.013	-0.009	0.021
3	S2	132.878	155.945	0.690	-54.971	32.643	0.558	0.024	-0.012	0.000	0.027
4	SI3	151.640	98.398	-0.068	2.696	50.946	-0.193	0.014	0.012	0.007	0.020
5	S1	98.830	163.863	0.768	-63.184	-1.372	0.635	-0.006	0.017	0.006	0.019
6	SI4	118.201	108.945	-0.018	-8.082	17.560	-0.159	-0.016	-0.018	-0.001	0.024
										<b>RMS [m]=0.021</b>	

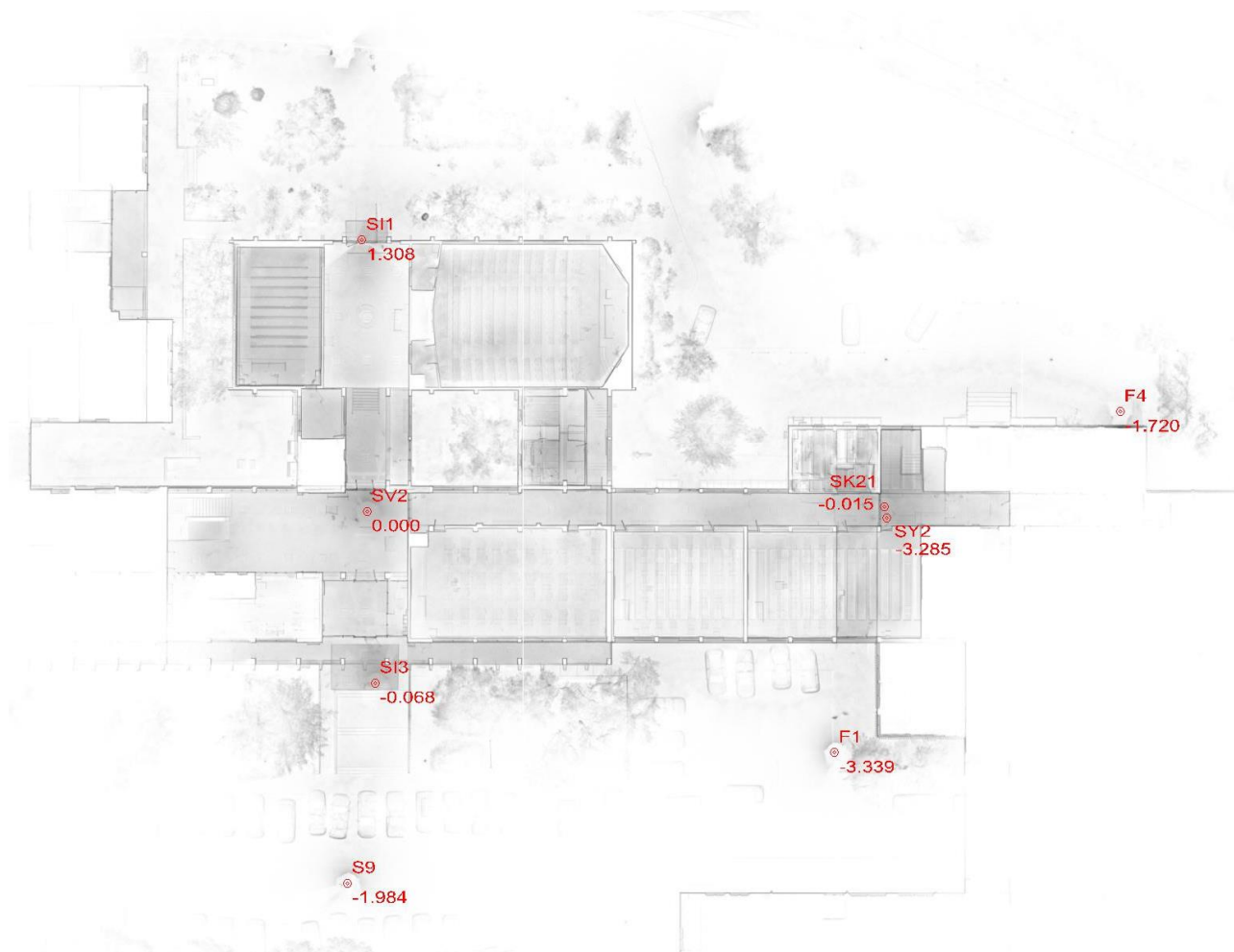
**Πίνακας 19:** Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 1 για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 1 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.021m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλιση είναι μικρότερη από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

### 4.5.2.2. Τομέας 2

Για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ , χρησιμοποιήθηκαν οκτώ από τα διαθέσιμα δέκα τοποσταθερά εντός του τομέα. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαρίφημα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 52: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 2 για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$*

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η θέση των οκτώ τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, όπου φαίνεται ότι εξακολουθούν να καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης. Από τα συνολικά δέκα διαθέσιμα, δεν χρησιμοποιήθηκαν τα S3, S4 που είναι εξωτερικά και απομακρυσμένα από το κτήριο και εμφάνιζαν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στην γεωαναφορά που χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

A/A	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	46.465	-5.776	-3.403	0.001	0.021	-0.006	0.022
2	F4	218.832	122.899	-1.720	68.426	1.400	-1.812	0.016	-0.014	0.010	0.024
3	F1	193.083	92.126	-3.339	39.466	-26.356	-3.458	0.019	-0.002	-0.005	0.019
4	SV2	150.890	113.884	0.000	-0.114	-0.099	-0.142	-0.004	0.005	-0.007	0.009
5	SH	150.423	138.384	1.308	2.095	24.322	1.179	-0.016	0.021	0.007	0.027
6	S9	149.134	80.344	-1.984	-5.540	-33.270	-2.107	-0.010	-0.021	0.013	0.027
7	SK21	197.560	114.280	-0.015	46.329	-4.825	-0.132	0.007	-0.003	-0.005	0.009
8	SI3	151.640	98.398	-0.068	-1.074	-15.585	-0.210	-0.013	-0.007	-0.007	0.016
											<b>RMS [m]=0.020</b>

Πίνακας 20: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 2 για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 2 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε  $0.020m$ , που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλιση είναι μικρότερη από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

#### 4.5.2.3. Τομέας 3

Στον συγκεκριμένο τομέα έχει ήδη επιτευχθεί  $RMS=0.016m < 0.020m$  κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων τοποσταθερών (βλέπε κεφάλαιο 4.5.1.3).

#### 5.5.2.4. Τομέας 4

Για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ , χρησιμοποιήθηκαν έξι από τα διαθέσιμα οκτώ τοποσταθερά εντός του τομέα. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαρίφημα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



Εικόνα 53: Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του Τομέα 4 για επίτευξη  $RMS=0.020m$

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η θέση των έξι τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, όπου φαίνεται ότι εξακολουθούν να καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης. Από τα συνολικά οκτώ διαθέσιμα, δεν χρησιμοποιήθηκαν τα S6, F4, εκ των οποίων το S6 είναι εξωτερικά και απομακρυσμένο από το κτήριο και εμφάνιζε την μεγαλύτερη απόκλιση στην γεωαναφορά που χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

A/A	Reference system:				Pointcloud system:			Residuals:			
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY1	230.875	113.636	-3.289	38.790	17.134	-0.098	0.007	0.001	-0.005	0.009
2	F1	193.083	92.126	-3.339	-1.056	-0.324	-0.141	-0.016	0.005	0.004	0.017
3	SY2	197.804	113.326	-3.285	5.870	20.272	-0.094	0.010	0.009	-0.001	0.014
4	F2	223.726	90.068	-4.153	29.226	-5.577	-0.958	0.005	-0.013	-0.003	0.014
5	S5	230.169	138.135	-2.166	40.602	41.582	1.029	-0.027	0.006	0.002	0.028
6	F3	245.131	108.718	-3.303	52.471	10.749	-0.101	0.022	-0.009	0.004	0.023
										<b>RMS [m]=0.019</b>	

Πίνακας 21: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς Τομέα 4 για επίτευξη  $RMS=0.020m$

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς στον Τομέα 4 και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.019m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλιση είναι μικρότερη από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).

#### 4.5.2.5. Τομέας 5

Στον συγκεκριμένο τομέα έχει ήδη επιτευχθεί  $\text{RMS}=0.013\text{m}<0.020\text{m}$  κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων τοποσταθερών (βλέπε κεφάλαιο 4.5.1.5).

#### 4.5.2.6. Τομέας 6

Στον συγκεκριμένο τομέα έχει ήδη επιτευχθεί  $\text{RMS}=0.015\text{m}<0.020\text{m}$  κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων τοποσταθερών (βλέπε κεφάλαιο 4.5.1.6).

#### 4.5.2.7. Σύνοψη συμπερασμάτων επίλυσης γεωαναφοράς ώστε $\text{RMS}\approx 0.020\text{m} \leq 0.030\text{m}$

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε γεωαναφορά των επί μέρους σαρώσεων με σκοπό να επιτευχθεί  $\text{RMS}\approx 0.020\text{m}\leq 0.030\text{m}$ , ήτοι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή, με σκοπό να διαπιστωθεί εάν αυτό επηρεάζει την πραγματική ακρίβεια μέτρησης. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των επιλύσεων, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **Αξιοπιστία και Ακρίβεια των Μετρήσεων:** Στο παρόν κεφάλαιο η ακρίβεια προσαρμογής έχει καθοριστεί από εμάς, επιλέγοντας τον κατάλληλο συνδυασμό τοποσταθερών ώστε να προκύψει  $\text{RMS}\approx 0.020\text{m}\leq 0.030\text{m}$ , ήτοι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή. Παρατηρήθηκε ότι η επιδιωκόμενη ακρίβεια επιτεύχθηκε λαμβάνοντας υπόψιν αρκετά μεγάλο πλήθος τοποσταθερών που παρείχαν πλήρη και ομοιόμορφη κάλυψη στις περιοχές σάρωσης, εκτός από ένα σημείο του Τομέα 1. Το παραπάνω αποτελεί μια ένδειξη ότι οι μετρήσεις βρίσκονται γενικά εντός των ορίων ακρίβειας που δηλώνει ο κατασκευαστής ( $\pm 0.030\text{m}$ ) και ότι το σύστημα σάρωσης είναι αξιόπιστο.
- **Κατανομή Σφαλμάτων Ανά Άξονες:** Από τα έως τώρα αποτελέσματα φαίνεται ότι η υψομετρική ακρίβεια (άξονας Z) εξακολουθεί να είναι γενικά καλύτερη σε σχέση με την οριζοντιογραφική (άξονες X και Y). Αυτό καταδεικνύει ότι ο σαρωτής είναι περισσότερο ακριβής στον καθορισμό του ύψους.
- **Επίπτωση του Αριθμού και της Θέσης των Τοποσταθερών:** Από τα έως τώρα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι για την επίτευξη της επιδιωκόμενης ακρίβειας  $\text{RMS}\approx 0.020\text{m}\leq 0.030\text{m}$ , έπρεπε να μην ληφθούν υπόψιν τα τοποσταθερά τα οποία βρίσκονται εξωτερικά και σε απόσταση από κτήριο, ενώ παρέμεναν όλα τα εσωτερικά. Γεγονός που υποδεικνύει ότι υπάρχει συσχέτιση

ανάμεσα στο μέγεθος της απόκλισης που εμφανίζει ένα τοποσταθερό σε σχέση με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται σε αυτά που βρίσκονται εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο, σε περιβάλλον φτωχό από γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάρκινγκ, δρόμος), ενώ αντίθετα σε όλα όσα βρίσκονται εντός ή κοντά στο κτήριο, άρα σε περιβάλλον με έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από το όριο ακρίβειας του κατασκευαστή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).

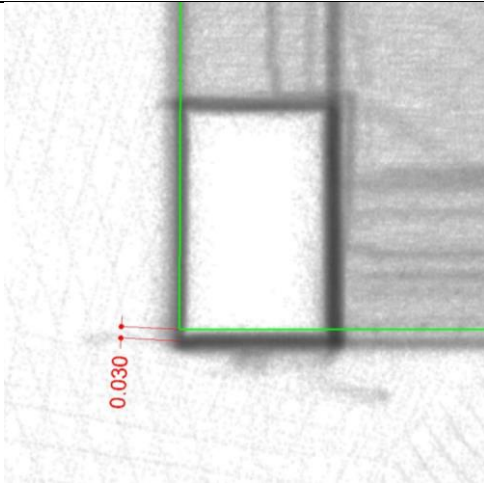
Τομείς σάρωσης	Διάρκεια σάρωσης (min)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)	Τοποσταθερά με RMS $\geq$ 0.035m
1	30	6	0.021	0.027	-
2	30	8	0.020	0.027	-
3	18	7	0.016	0.027	-
4	29	6	0.026	0.028	-
5	25	4	0.013	0.019	-
6	22	4	0.015	0.017	-

*Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γεωαναφορών.*

Με την ολοκλήρωση των γεωαναφορών των επιμέρους σαρώσεων, δημιουργήθηκε το συνολικό τρισδιάστατο νέφος σημείων του κτηρίου Λαμπαδαρίου, από το οποίο θα προσδιοριστεί η πραγματική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή, μέσω των σημείων ελέγχου.

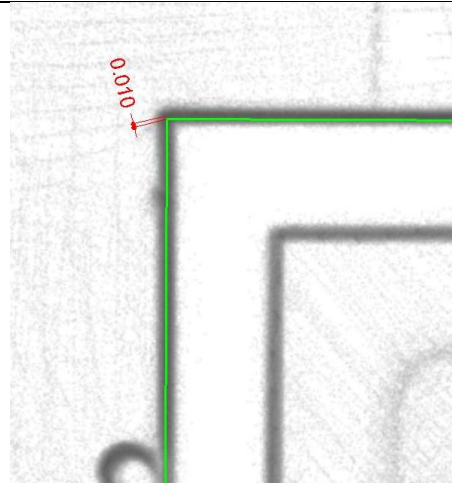


#### 4.5.2.7.1. Ένδειξη μεγέθους αποκλίσεων στα σημεία ελέγχου για το Σενάριο 2



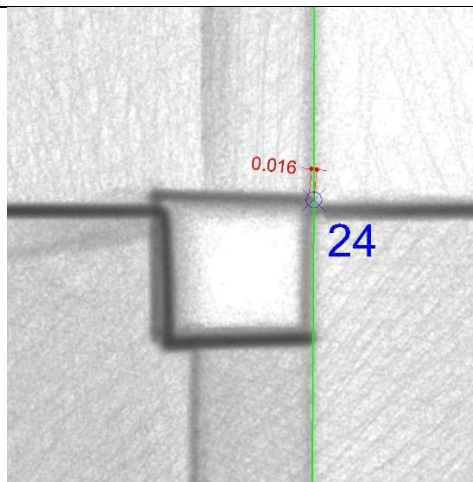
Εικόνα 54

Σημείο Ελέγχου Α



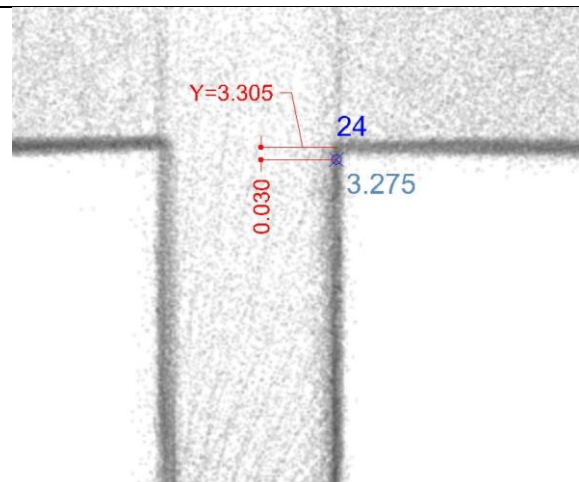
Εικόνα 55

Σημείο Ελέγχου Β



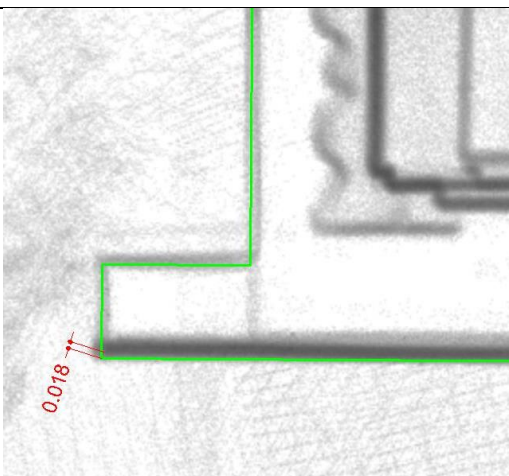
Εικόνα 56

Σημείο Ελέγχου Γ (οριζοντιογραφικά)



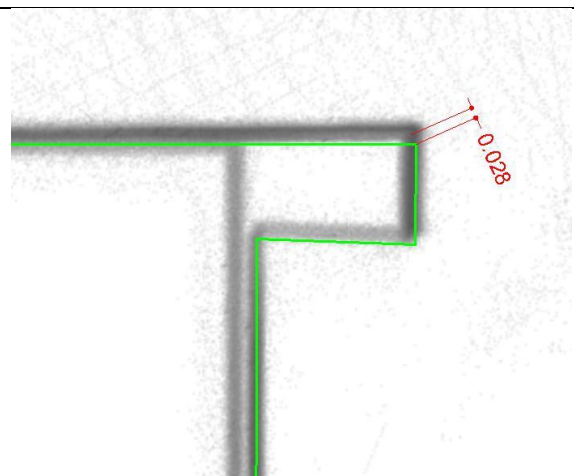
Εικόνα 57

Σημείο Ελέγχου Γ (υψομετρικά)



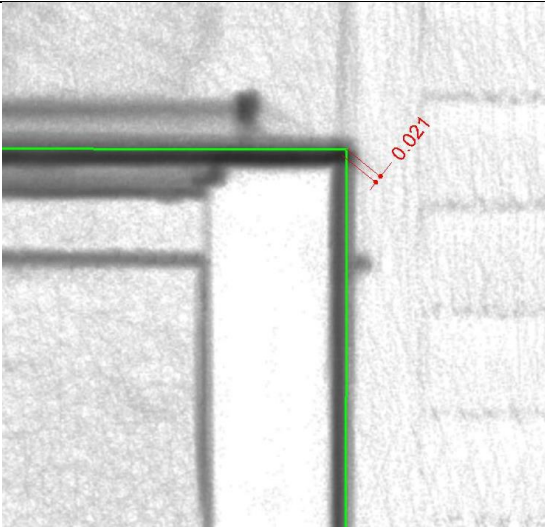
Εικόνα 58

Σημείο Ελέγχου Δ



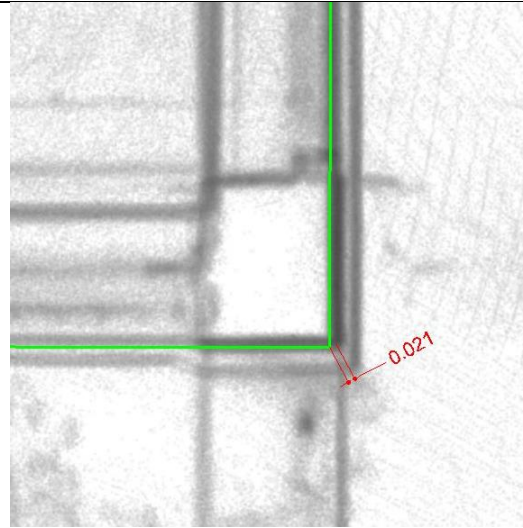
Εικόνα 59

Σημείο Ελέγχου Ε



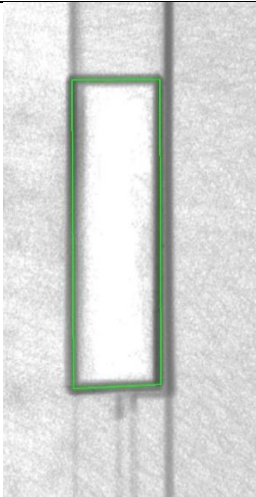
Εικόνα 60

Σημείο Ελέγχου Ζ



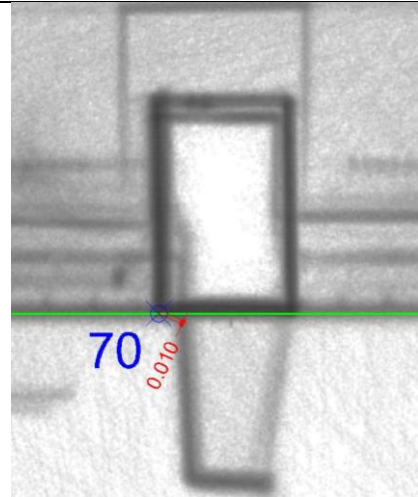
Εικόνα 61

Σημείο Ελέγχου Η



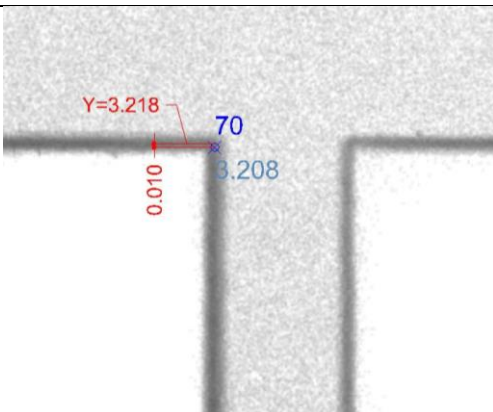
Εικόνα 62

Σημείο Ελέγχου Θ



Εικόνα 63

Σημείο Ελέγχου Ι (οριζοντιογραφικά)



Εικόνα 64

Σημείο Ελέγχου Ι (υψομετρικά)

### 4.5.3. Σύνοψη συμπερασμάτων

Το παρόν κεφάλαιο είχε ως κύριο στόχο να εξακριβώσει την πραγματική ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON, συγκρίνοντάς τη με την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης που δίνει ο κατασκευαστής, ακολουθώντας τις οδηγίες χρήσης του. Η σάρωση είχε ως αντικείμενο το κτήριο Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ-ΜΓ, καλύπτοντας έκταση περίπου 7500m<sup>2</sup> σε δύο ορόφους (υπόγειο, ισόγειο) και στον περιβάλλοντα χώρο.

Για να πραγματοποιηθεί η σάρωση, χωρίστηκε το κτήριο σε έξι τομείς με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει επαρκής επικάλυψη μεταξύ τους και εντός του κάθε τομέα να υπάρχουν κατ' ελάχιστον τέσσερα τοποσταθερά σημεία, ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί στη συνέχεια ένα ενιαίο υπόβαθρο όλων των χώρων μέσω της γεωαναφοράς των επί μέρους σαρώσεων.

Στην συνέχεια εξετάστηκαν τα ακόλουθα δύο σενάρια:

- **Σενάριο 1:** Γεωαναφορά των επιμέρους σαρώσεων λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά
- **Σενάριο 2:** Γεωαναφορά των επιμέρους σαρώσεων λαμβάνοντας υπόψιν όσα τοποσταθερά είναι απαραίτητα για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$

Σκοπός των παραπάνω δύο σεναρίων είναι αφενός να προσδιοριστεί η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης των τοποσταθερών από τον σαρωτή μέσω του δείκτη RMS της γεωαναφοράς, ο οποίος δείχνει τον βαθμό προσαρμογής της σάρωσης με τις τοπογραφικές μετρήσεις και αφετέρου να προσδιοριστεί η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή συγκρίνοντας τη θέση και την απόσταση χαρακτηριστικών σημείων (σημεία ελέγχου) επί του περιγράμματος του κτηρίου όπως προέκυψαν από το συνολικό τρισδιάστατο νέφος σημείων σε σχέση με την τοπογραφική αποτύπωση.

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραπάνω δύο σεναρίων:

Τομείς σάρωσης	Διάρκεια σάρωσης (min)	Σενάριο 1			Σενάριο 2		
		Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)
1	30	10	0.034	0.047	6	0.021	0.027
2	30	10	0.027	0.042	8	0.020	0.027
3	18	7	0.016	0.027	7	0.016	0.027
4	29	8	0.026	0.039	6	0.026	0.028
5	25	4	0.013	0.019	4	0.013	0.019
6	22	4	0.015	0.017	4	0.015	0.017
		<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.034</b>	<b>0.047</b>	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.021</b>	<b>0.027</b>

Πίνακας 23: Αποτελέσματα γεωαναφοράς

Α/Α	Σημεία Ελέγχου	Απόκλιση (m)	
		Σενάριο 1	Σενάριο 2
1	A	0.012	0.030
2	B	0.025	0.010
3	Γ (οριζ.)	0.017	0.016
4	Γ (υψομ.)	0.024	0.030
5	Δ	0.018	0.018
6	E	0.024	0.028
7	Z	0.027	0.021
8	H	0.024	0.021
9	Θ	0	0
10	I (οριζ.)	0	0.010
11	I (υψομ.)	0.010	0.010
	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.027</b>	<b>0.030</b>

Πίνακας 24: Μέτρηση απόκλισης θέσης στα σημεία ελέγχου

Αποστάσεις	Τοπογραφική αποτύπωση D (m)	Σενάριο 1		Σενάριο 2	
		Laser σαρωτής d <sub>1</sub> (m)	Δd <sub>1</sub> =d <sub>1</sub> -D (m)	Laser σαρωτής d <sub>2</sub> (m)	Δd <sub>2</sub> =d <sub>2</sub> -D (m)
A-B	52.364	52.399	0.035	52.403	0.039
A-E	84.360	84.366	0.006	84.376	0.016
A-H	145.498	145.517	0.019	145.518	0.020
B-H	153.617	153.627	0.010	153.637	0.020
		<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.035</b>	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.039</b>

Πίνακας 25: Μέτρηση απόκλισης αποστάσεων στα σημείων ελέγχου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα παραπάνω σενάρια καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συμπεραίνονται τα εξής:

- **Ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή:** Οι αποκλίσεις των μετρήσεων στα σημεία ελέγχου μεταξύ του τρισδιάστατου νέφους σημείων και των τοπογραφικών μετρήσεων και στα δύο σενάρια είναι σχετικά μικρές και εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή για την ονομαστική ακρίβεια του συστήματος ( $\pm 0.030$  m). Εξάιρεση αποτελεί η απόσταση A-B η οποία είναι οριακά εκτός προδιαγραφών. Επίσης η διαφορά της ακρίβειας των μετρήσεων μεταξύ των δύο σεναρίων είναι της τάξεως των 0.003-0.004m, η οποία είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή και στα όρια του στατιστικού λάθους.
- **Επίπτωση των τοποσταθερών στην ακρίβεια μέτρησης:** Το Σενάριο 1, το οποίο χρησιμοποιεί τα περισσότερα τοποσταθερά σημεία για τη γεωαναφορά, δείχνει γενικά μεγαλύτερες τιμές RMS συγκριτικά με το Σενάριο 2, το οποίο λαμβάνει υπόψιν μόνο τα απαραίτητα τοποσταθερά σημεία για την επίτευξη επιπέδου ακρίβειας  $RMS \approx 0.020$  m. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται σε αυτά που βρίσκονται εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο, σε περιβάλλον φτωχό από γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάρκινγκ, δρόμος), ενώ αντίθετα σε όλα όσα βρίσκονται εντός ή κοντά στο κτήριο, άρα σε περιβάλλον με έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι αποκλίσεις ήταν μικρότερες από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Προς επίρρωση αυτού είναι το γεγονός ότι στο Σενάριο 2 τα τοποσταθερά που δεν λήφθηκαν υπόψιν

ήταν εξωτερικά και σε απόσταση από το κτήριο. Συνδυάζοντας τα προηγούμενα με το γεγονός ότι μεταξύ των δύο σεναρίων δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική διαφορά στην ακρίβεια μέτρησης, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο πλήθος τοποσταθερών δεν οδηγεί απαραίτητα σε καλύτερα αποτελέσματα, υπογραμμίζοντας με αυτό τον τρόπο τη σημασία της ακριβούς και στοχευμένης επιλογής των θέσεων τοποσταθερών, που μπορεί να καταστήσει τη χρήση τους πιο αποδοτική για την βελτιστοποίηση των πόρων και του χρόνου στις τοπογραφικές εργασίες.

Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι εφόσον τηρηθούν πιστά οι οδηγίες χρήσης που έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή και γίνει μια στοχευμένη επιλογή της θέσης των τοποσταθερών, ο laser σαρωτής ZEB HORIZON δίνει αποτελέσματα εντός της ονομαστικής του ακρίβειας

## 4.6. Επίπτωση μη εφαρμογής οδηγιών ορθής χρήσης

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να ελεγχθεί η επίπτωση της μη εφαρμογής όλων των οδηγιών χρήσης του κατασκευαστή, στην πραγματική ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON.

Για να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω έλεγχος, επιλέχθηκε να γίνει πλήρης εξωτερική σάρωση του κτηρίου Λαμπαδαρίου. Αυτό το περιβάλλον σάρωσης δεν έχει παντού πλήθος χαρακτηριστικών και πιο συγκεκριμένα, από την μια μεριά υπάρχει το κτήριο που παρουσιάζει έντονα χαρακτηριστικά λόγω γεωμετρίας, ενώ από την άλλη υπάρχει πάρκινγκ και δρόμος που έχουν λιγότερο έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η αποτύπωση κάθε φορά της περιμέτρου πραγματοποιήθηκε με μία σάρωση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σαρώσεων που πραγματοποιήθηκαν, αφαιρώντας κάθε φορά και κάποια από τις οδηγίες του κατασκευαστή.

### 4.6.1. Εξωτερική σάρωση με κλειστή όδευση

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο ίδιο σημείο ώστε να διασφαλιστεί τουλάχιστον ένας κλειστός βρόγχος.
- Η ταχύτητα σάρωσης πραγματοποιήθηκε σε ρυθμό αργού περπατήματος.
- Όλοι οι χώροι και τα αντικείμενα προς σάρωση βρίσκονταν σε απόσταση μικρότερη των 50m από τον χειριστή.
- Η σάρωση δεν υπερέβη την προτεινόμενη χρονική διάρκεια των 30min.

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που δεν εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.
- Περιβάλλον σάρωσης όπου δεν υπάρχουν παντού έντονα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Οι έλεγχοι για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης θα πραγματοποιηθούν για δύο σενάρια:

- **Σενάριο 1**, για την γεωαναφορά της σάρωσης θα χρησιμοποιηθούν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά σημεία.
- **Σενάριο 2**, για την γεωαναφορά της σάρωσης θα χρησιμοποιηθούν όσα τοποσταθερά είναι απαραίτητα για να επιτευχθεί RMS περίπου  $\pm 0.020\text{m}$  ώστε να είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή που είναι  $\pm 0.030\text{m}$

#### 4.6.1.1. Σενάριο 1: Επίλυση λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Η διάρκεια σάρωσης ήταν 26min και μετρήθηκαν συνολικά δώδεκα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό S9. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



*Εικόνα 65: Σκαρίφημα της θέσης των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου.*

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των δώδεκα τοποσταθερών, όπου φαίνεται ότι καλύπτουν πλήρως και ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 66: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.

	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	S10	98.975	83.755	-1.839	-50.001	-6.255	0.026	-0.014	-0.040	0.015	0.045
2	S13	89.911	119.222	-0.365	-65.762	26.824	1.513	-0.078	-0.019	0.010	0.081
3	S1	98.830	163.863	0.768	-65.571	72.393	2.664	-0.073	0.028	0.008	0.079
4	S6	263.893	107.420	-4.735	107.427	48.589	-2.872	0.090	-0.059	0.020	0.110
5	S14	86.466	136.700	0.065	-72.505	43.321	1.949	-0.088	-0.013	0.008	0.089
6	S2	132.878	155.945	0.690	-30.589	71.180	2.567	-0.021	0.049	-0.003	0.053
7	S9	149.134	80.344	-1.984	-0.118	0.035	-0.161	-0.010	-0.018	-0.020	0.029
8	F1	193.083	92.126	-3.339	40.796	20.011	-1.519	0.026	-0.039	-0.023	0.053
9	S4	181.670	149.141	-0.368	18.669	73.890	1.502	0.051	0.069	-0.002	0.086
10	S3	148.707	155.155	0.543	-14.886	73.459	2.405	-0.001	0.065	-0.016	0.067
11	F2	223.726	90.068	-4.153	71.288	23.875	-2.324	0.051	-0.035	-0.010	0.062
12	F4	218.832	122.899	-1.720	60.198	55.208	0.148	0.067	0.013	0.013	0.069
											<b>RMS [m]=0.072</b>

Πίνακας 26: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

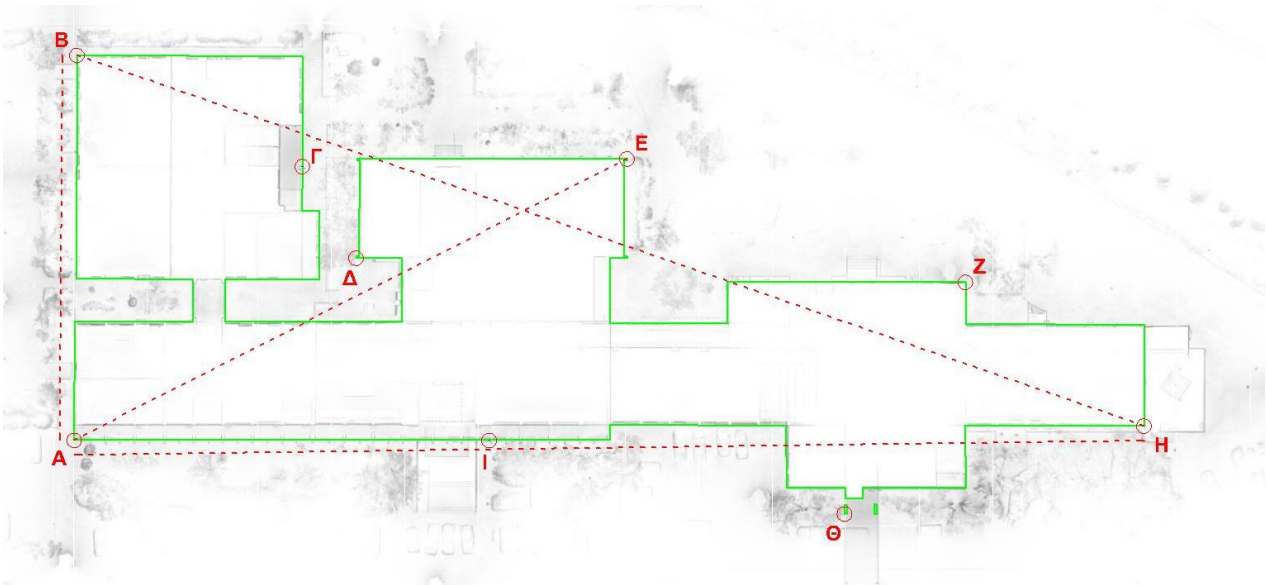
Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.072m, που είναι υπερδιπλάσιο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).

- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι τα S13, S1, S6, S14, S4, τα οποία αξίζει να επισημανθεί ότι είναι από τα πιο απομακρυσμένα από το κτήριο.

#### 4.6.1.1.1. Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης

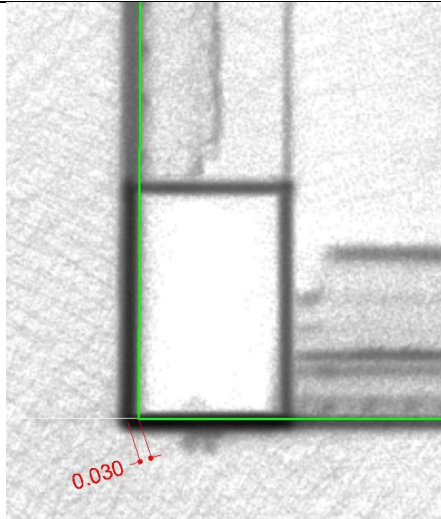
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ένδειξη των αποκλίσεων στα σημεία και στις αποστάσεις ελέγχου.



Εικόνα 67: Σκαρίφημα ένδειξης θέσης σημείων και αποστάσεων ελέγχου.

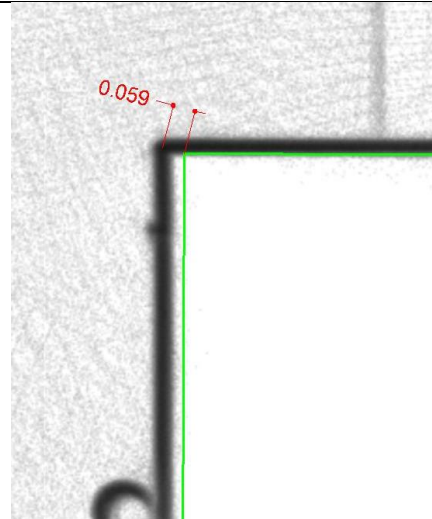


#### 4.6.1.1.2. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου για το Σενάριο 1



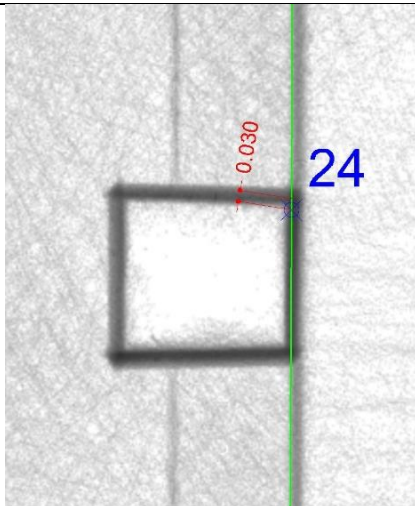
Εικόνα 68

Σημείο Ελέγχου Α



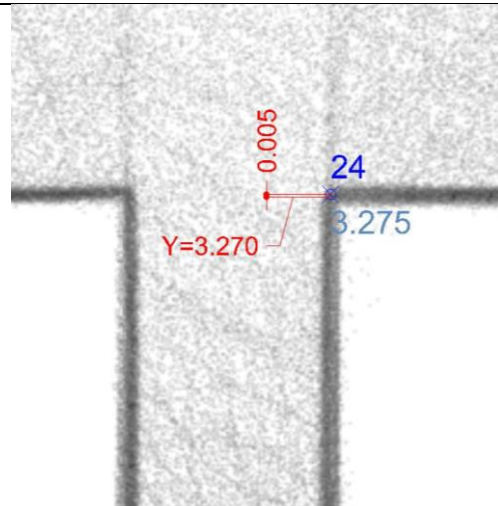
Εικόνα 69

Σημείο Ελέγχου Β



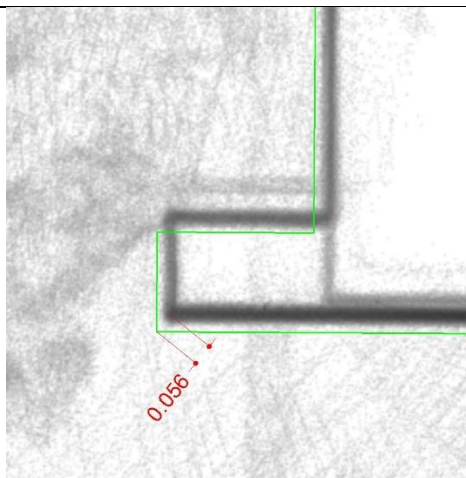
Εικόνα 70

Σημείο Ελέγχου Γ (οριζοντιογραφικά)



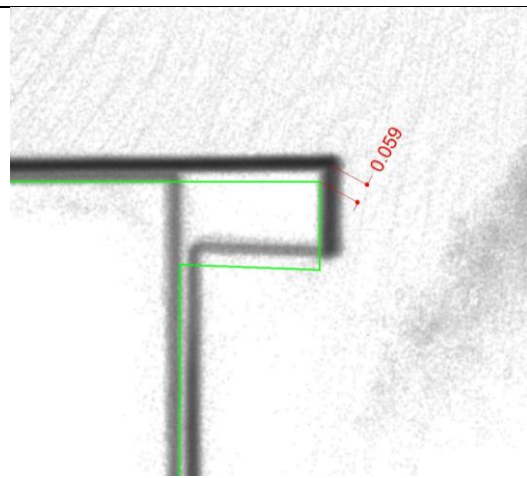
Εικόνα 71

Σημείο Ελέγχου Γ (υψομετρικά)



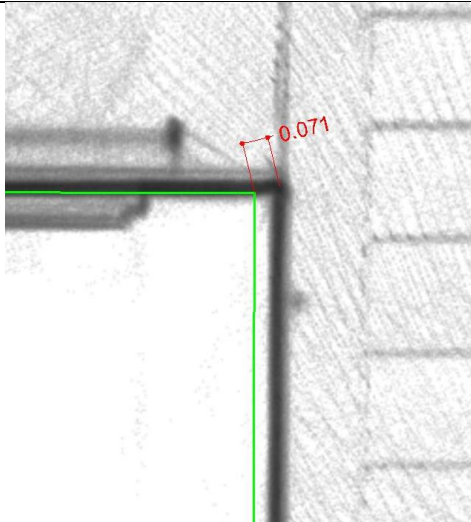
Εικόνα 72

Σημείο Ελέγχου Δ



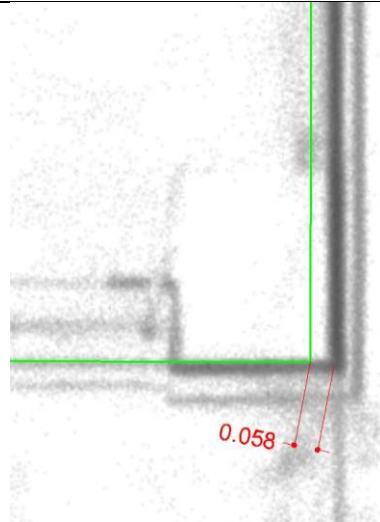
Εικόνα 73

Σημείο Ελέγχου Ε



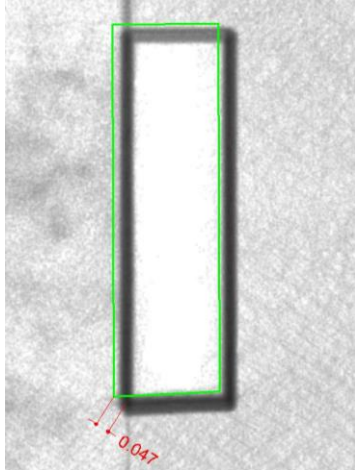
Εικόνα 74

Σημείο Ελέγχου Ζ



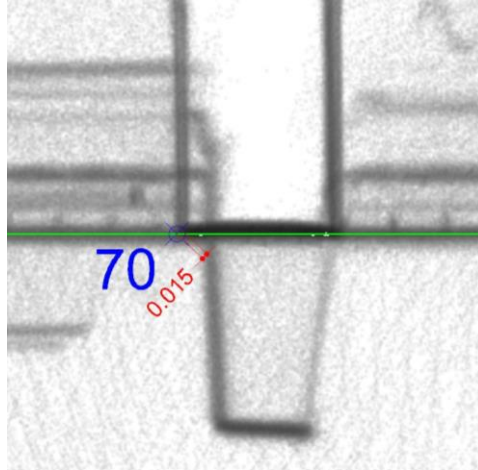
Εικόνα 75

Σημείο Ελέγχου Η



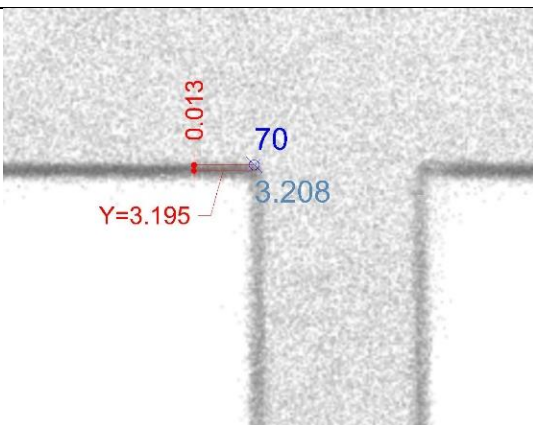
Εικόνα 76

Σημείο Ελέγχου Θ



Εικόνα 77

Σημείο Ελέγχου Ι (οριζοντιογραφικά)



Εικόνα 78

Σημείο Ελέγχου Ι (υψομετρικά)

#### 4.6.1.2. Σενάριο 2: Επίλυση γεωαναφοράς με σκοπό να επιτευχθεί $RMS \approx 0.020m \leq 0.030m$

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς του τρισδιάστατου νέφους σημείων, κάνοντας χρήση όσων τοποσταθερών απαιτείται ώστε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) να προκύψει περίπου 0.020m, μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030m$ ).

Για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ , χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα από τα διαθέσιμα δώδεκα τοποσταθερά. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαρίφημα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



**Εικόνα 79:** Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ .

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των τεσσάρων τοποσταθερών που απαιτήθηκαν για την επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ . Παρατηρείται ότι πλέον δεν υπάρχει ομοιόμορφη κάλυψη της περιοχής σάρωσης, αντίθετα η θέση τους περιορίζεται στο κάτω αριστερά τμήμα της.

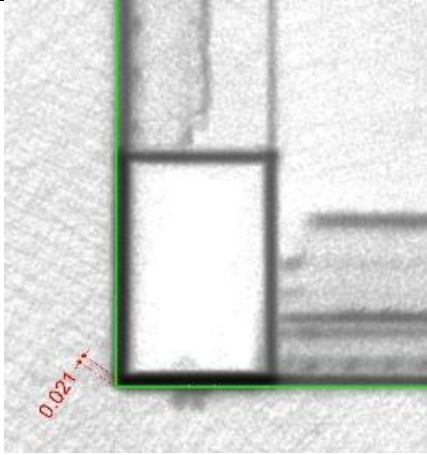
		Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:			
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	S10	98.975	83.755	-1.839	-50.001	-6.255	0.026	0.018	-0.012	0.000	0.022
2	S14	86.466	136.700	0.065	-72.505	43.321	1.949	-0.018	0.023	0.001	0.030
3	S9	149.134	80.344	-1.984	-0.118	0.035	-0.161	0.021	-0.027	-0.001	0.034
4	S13	89.911	119.222	-0.365	-65.762	26.824	1.513	-0.020	0.015	0.000	0.025
										<b>RMS [m]=0.028</b>	

**Πίνακας 27:** Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου για επίτευξη  $RMS \approx 0.020m$ .

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

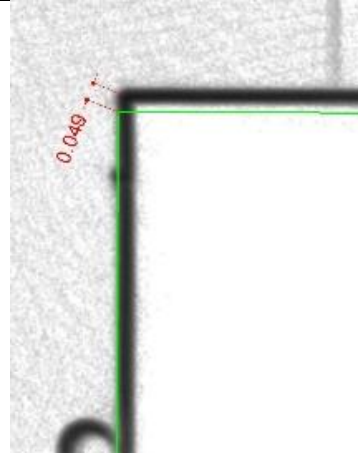
- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.028m, που είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι σε όλα η απόκλιση είναι μικρότερη από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).

4.6.1.2.1. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου για το Σενάριο 2



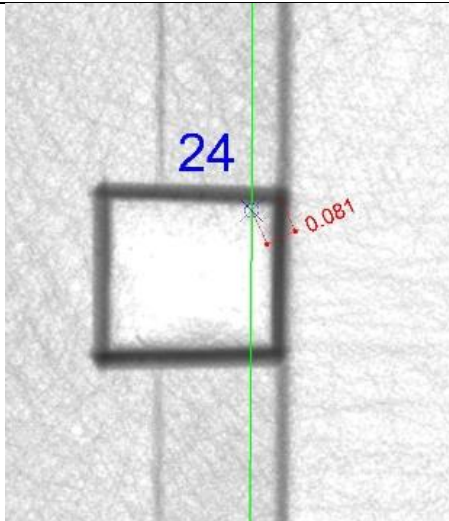
Εικόνα 80

Σημείο Ελέγχου Α



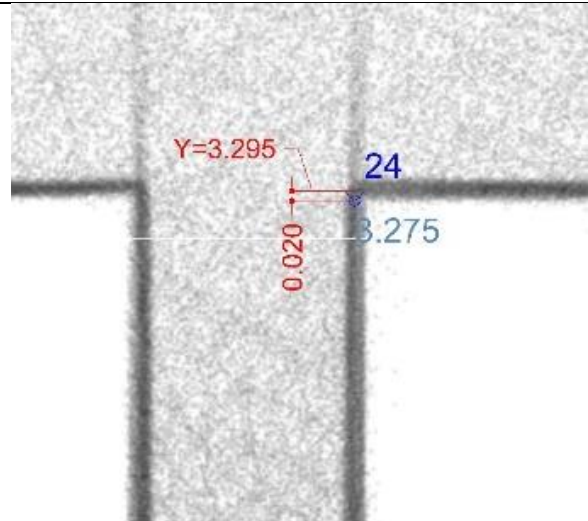
Εικόνα 81

Σημείο Ελέγχου Β



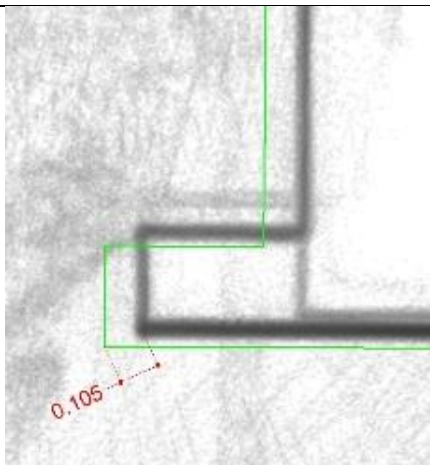
Εικόνα 82

Σημείο Ελέγχου Γ (οριζοντιογραφικά)



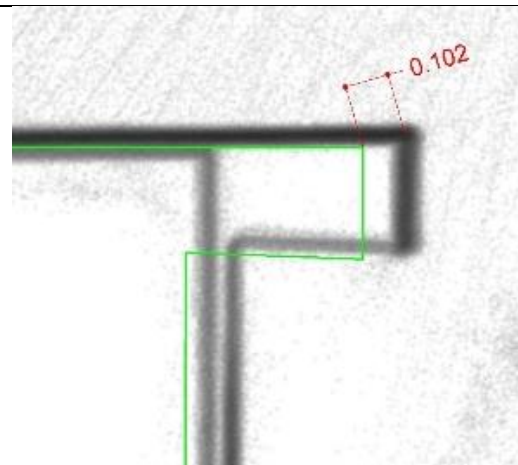
Εικόνα 83

Σημείο Ελέγχου Γ (υψομετρικά)



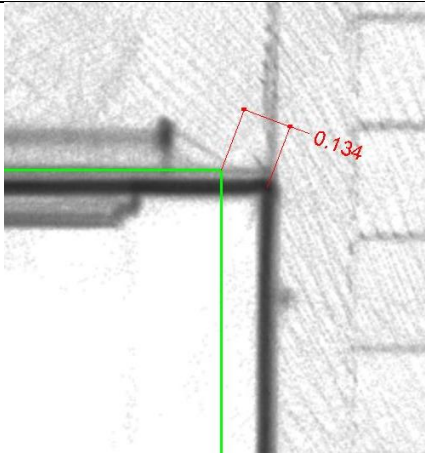
Εικόνα 84

Σημείο Ελέγχου Δ



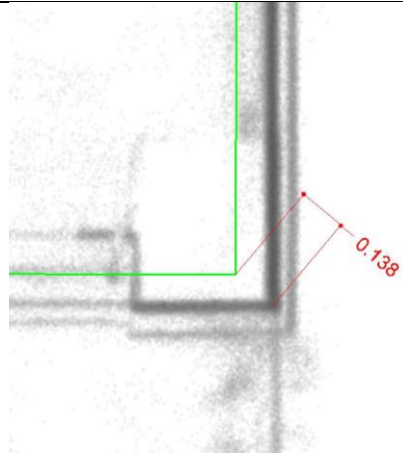
Εικόνα 85

Σημείο Ελέγχου Ε



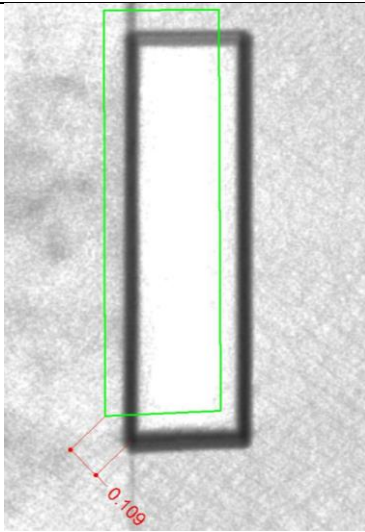
Εικόνα 86

Σημείο Ελέγχου Ζ



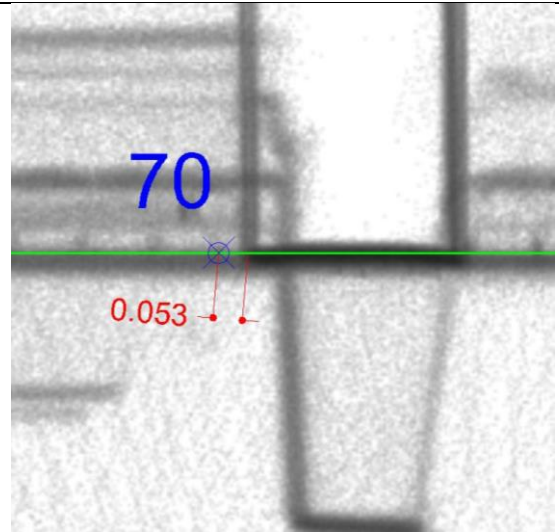
Εικόνα 87

Σημείο Ελέγχου Η



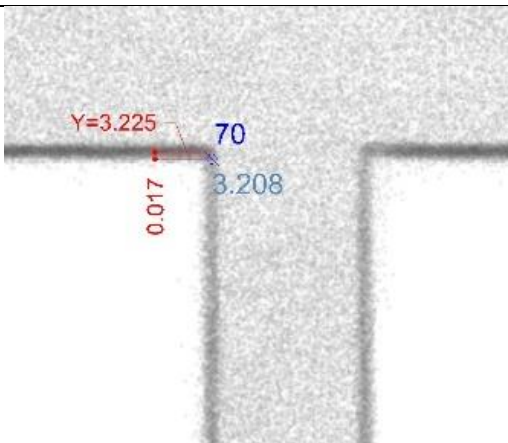
Εικόνα 88

Σημείο Ελέγχου Θ



Εικόνα 89

Σημείο Ελέγχου Ι (οριζοντιογραφικά)



Εικόνα 90

Σημείο Ελέγχου Ι (υψομετρικά)

### 4.6.1.3. Σύνοψη συμπερασμάτων

Το παρόν κεφάλαιο είχε ως κύριο στόχο να εξακριβώσει την ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON, συγκρίνοντάς τη με την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης που δίνει ο κατασκευαστής, μην εφαρμόζοντας την οδηγία χρήσης περί δημιουργίας επιπλέον κλειστών βρόγχων κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα ακόλουθα δύο σενάρια:

- **Σενάριο 1:** Γεωαναφορά της σάρωσης λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά σημεία.
- **Σενάριο 2:** Γεωαναφορά της σάρωσης λαμβάνοντας υπόψιν όσα τοποσταθερά είναι απαραίτητα για να επιτευχθεί RMS περίπου  $\pm 0.020\text{m}$  ώστε να είναι μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή που είναι  $\pm 0.030\text{m}$

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραπάνω δύο σεναρίων:

Τομείς σάρωσης	Διάρκεια σάρωσης (min)	Σενάριο 1			Σενάριο 2		
		Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)
1	26	12	0.072	0.110	4	0.028	0.034

Πίνακας 28: Αποτελέσματα γεωαναφοράς

Αποστάσεις	Τοπογραφική αποτύπωση D (m)	Laser σαρωτής d <sub>1</sub> (m)	$\Delta d_1 = d_1 - D$ (m)
A-B	52.364	52.388	0.024
A-E	84.360	84.438	0.078
A-H	145.498	145.583	0.085
B-H	153.617	153.733	0.116
		<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.116</b>

Πίνακας 29: Μέτρηση απόκλισης αποστάσεων στα σημείων ελέγχου

A/A	Σημεία Ελέγχου	Απόκλιση (m)	
		Σενάριο 1	Σενάριο 2
1	A	0.030	0.021
2	B	0.059	0.049
3	Γ (οριζ.)	0.030	0.081
4	Γ (υψομ.)	0.005	0.020
5	Δ	0.056	0.105
6	E	0.059	0.102
7	Z	0.071	0.134
8	H	0.058	0.138
9	Θ	0.047	0.109
10	I (οριζ.)	0.015	0.053
11	I (υψομ.)	0.013	0.017
	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.071</b>	<b>0.138</b>

Πίνακας 30: Μέτρηση απόκλισης θέσης στα σημεία ελέγχου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα παραπάνω σενάρια καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Στο Σενάριο 1 όπου έγινε χρήση όλων των τοποσταθερών, η ακρίβεια της σάρωσης που επετεύχθη είναι μικρότερη της ονομαστικής ακρίβειας του συστήματος ( $\pm 0.030$  m). Πιο συγκεκριμένα προέκυψε σφάλμα μέτρησης υπερδιπλάσιο της ονομαστικής ακρίβειας του σαρωτή ως προς την απόλυτη θέση του νέφους σημείων εντός του συστήματος αναφοράς ( $0.071\text{m} > 0.030\text{m}$ ) και τριπλάσιο σφάλμα μέτρησης ως προς την εσωτερική ακρίβεια του νέφους σημείων ( $0.116\text{m} > 0.030\text{m}$ ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι κατά την διάρκεια της σάρωσης αλλά και ότι το περιβάλλον σάρωσης δεν είχε παντού πλήθος χαρακτηριστικών ώστε να λειτουργήσει με τον βέλτιστο τρόπο ο αλγόριθμος SLAM. Επίσης παρατηρείται ότι το μέσο RMS ( $0.072\text{m}$ ) συνάδει με τη μέγιστη απόκλιση θέσης που βρέθηκε στα σημεία ελέγχου ( $0.071\text{m}$ ) και επίσης το μέγιστο RMS ( $0.110\text{m}$ ) συνάδει με τη μέγιστη απόκλιση της απόστασης στα σημεία ελέγχου ( $0.116\text{m}$ ). Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς είναι αξιόπιστα και δίνουν μια ρεαλιστική εκτίμηση του σφάλματος των μετρήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έγινε χρήση πλήθους τοποσταθερών ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιοχή σάρωσης.
- Στο Σενάριο 2 σκοπός ήταν η επίτευξη μικρότερου μέσου RMS από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή. Αυτό, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, δεν θα επηρεάσει την εσωτερική ακρίβεια της σάρωσης η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από την επίλυση του αλγορίθμου, αλλά θα επηρεάσει την απόλυτη θέση του τρισδιάστατου νέφους στο σύστημα αναφοράς. Συνεπώς η απόκλιση στην απόσταση μεταξύ των σημείων ελέγχου παραμένει η ίδια με αυτή του Σεναρίου 1. Η απόκλιση όμως της θέσης των σημείων ελέγχου σε σχέση με την τοπογραφική αποτύπωση παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Η μέγιστη απόκλιση της θέσης είναι  $0.138\text{m}$  ενώ στο Σενάριο 1 είναι  $0.071\text{m}$ . Επίσης η αύξηση της απόκλισης παρατηρείται στα σημεία ελέγχου που είναι πιο μακριά από την περιοχή που βρίσκονται τα τέσσερα τοποσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την γεωαναφορά. Παρατηρείται ότι το μέσο RMS ( $0.028\text{m}$ ) δεν αντιστοιχεί στη μέγιστη απόκλιση θέσης που βρέθηκε στα σημεία ελέγχου ( $0.138\text{m}$ ) και επίσης το μέγιστο RMS ( $0.034\text{m}$ ) δεν αντιστοιχεί στην μέγιστη απόκλιση της απόστασης στα σημεία ελέγχου ( $0.116\text{m}$ ). Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς είναι δεν είναι αξιόπιστα και δίνουν μια μη ρεαλιστική εκτίμηση του σφάλματος των μετρήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έγινε χρήση περιορισμένου πλήθους τοποσταθερών τα οποία δεν ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή σάρωσης.

Συνεπώς, η σάρωση μιας περιοχής η οποία δεν έχει παντού πλήθος χαρακτηριστικών και η μη δημιουργία επιπλέον κλειστών βρόγχων οδηγεί σε σφάλμα μέτρησης υπερδιπλάσιο της ονομαστικής ακρίβειας του σαρωτή ως προς την απόλυτη θέση του νέφους σημείων εντός του συστήματος αναφοράς και σε τριπλάσιο σφάλμα μέτρησης ως προς την εσωτερική ακρίβεια του νέφους σημείων. Η εκτίμηση του σφάλματος μέτρησης μέσω της τιμής RMS της γεωαναφοράς, τόσο ως προς την σχετική ακρίβεια του νέφους όσο και ως προς την απόλυτη θέση του εντός του συστήματος αναφοράς, θεωρείται αξιόπιστη εφόσον γίνεται χρήση επαρκούς πλήθους τοποσταθερών τα οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή σάρωσης. Η προσπάθεια επίτευξης χαμηλού RMS χωρίς να τηρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις οδηγεί σε μη ρεαλιστική εκτίμηση σφάλματος της απόλυτης θέσης του νέφους σημείων εντός του συστήματος αναφοράς.



## 4.6.2. Εξωτερική σάρωση κτηρίου Λαμπαδαρίου με ανοιχτή όδευση

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

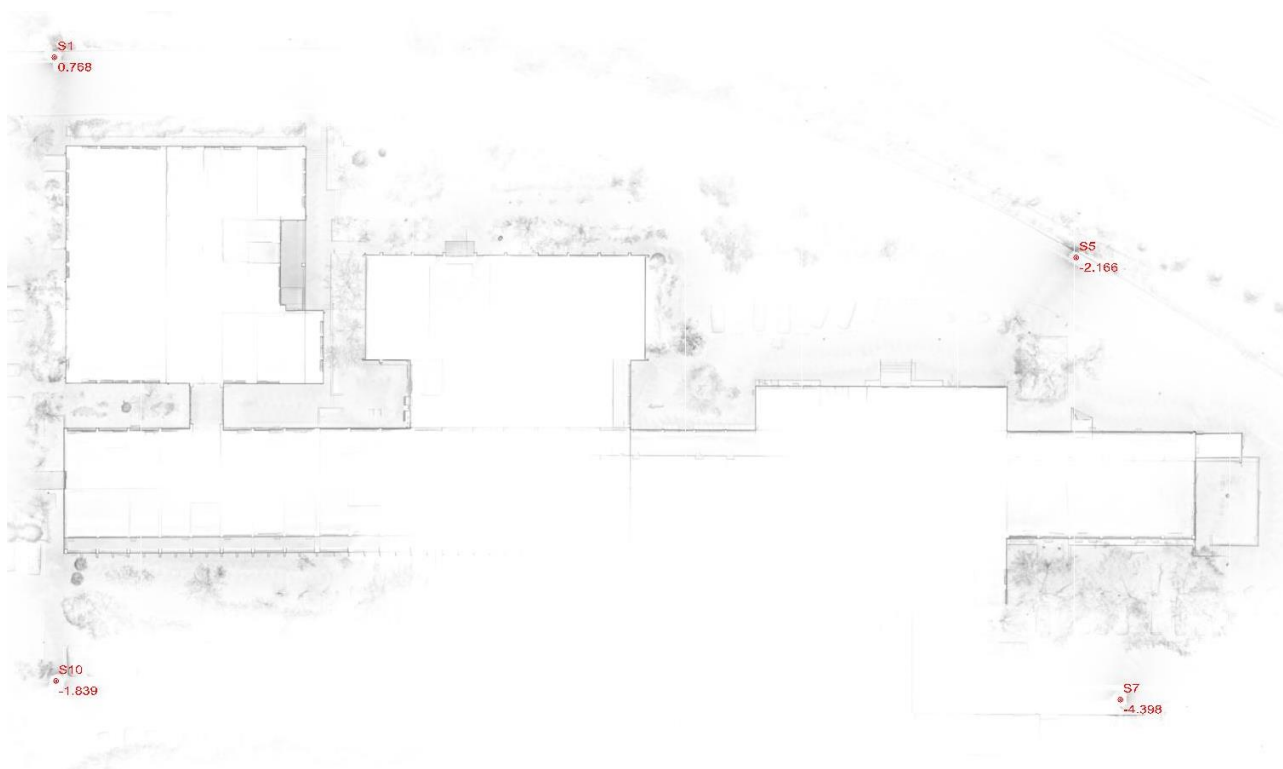
- Η ταχύτητα σάρωσης πραγματοποιήθηκε σε ρυθμό αργού περπατήματος.
- Όλοι οι χώροι και τα αντικείμενα προς σάρωση βρίσκονταν σε απόσταση μικρότερη των 50m από τον χειριστή.
- Η σάρωση δεν υπερέβη την προτεινόμενη χρονική διάρκεια των 30min.

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που δεν εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Δεν δημιουργήθηκε κανένας κλειστός βρόγχος.
- Περιβάλλον σάρωσης όπου δεν υπάρχουν παντού έντονα χαρακτηριστικά.

### 4.6.2.1. Επίλυση με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Η διάρκεια σάρωσης ήταν 18min και μετρήθηκαν συνολικά τέσσερα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά. Η σάρωση ξεκίνησε από το τοποσταθερό S7 και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό S10. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



**Εικόνα 91:** Σκαρίφημα θέσης τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου.

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των τεσσάρων τοποσταθερών, όπου φαίνεται ότι καλύπτουν ομοιόμορφα την περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 92: Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι η σάρωση δεν ολοκληρώθηκε στο σημείο από το οποίο ξεκίνησε και δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.

A/A	Reference system:				Pointcloud system:			Residuals:			
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	S7	235.822	81.371	-4.398	-0.003	0.060	-0.147	-0.104	-0.040	-0.002	0.112
2	S5	230.169	138.135	-2.166	-45.731	34.214	2.070	0.044	0.004	0.002	0.045
3	S1	98.830	163.863	0.768	-153.268	-45.702	5.047	-0.095	0.053	0.002	0.109
4	S10	98.975	83.755	-1.839	-93.690	-99.361	2.465	0.155	-0.017	-0.002	0.156
										<b>RMS [m]=0.112</b>	

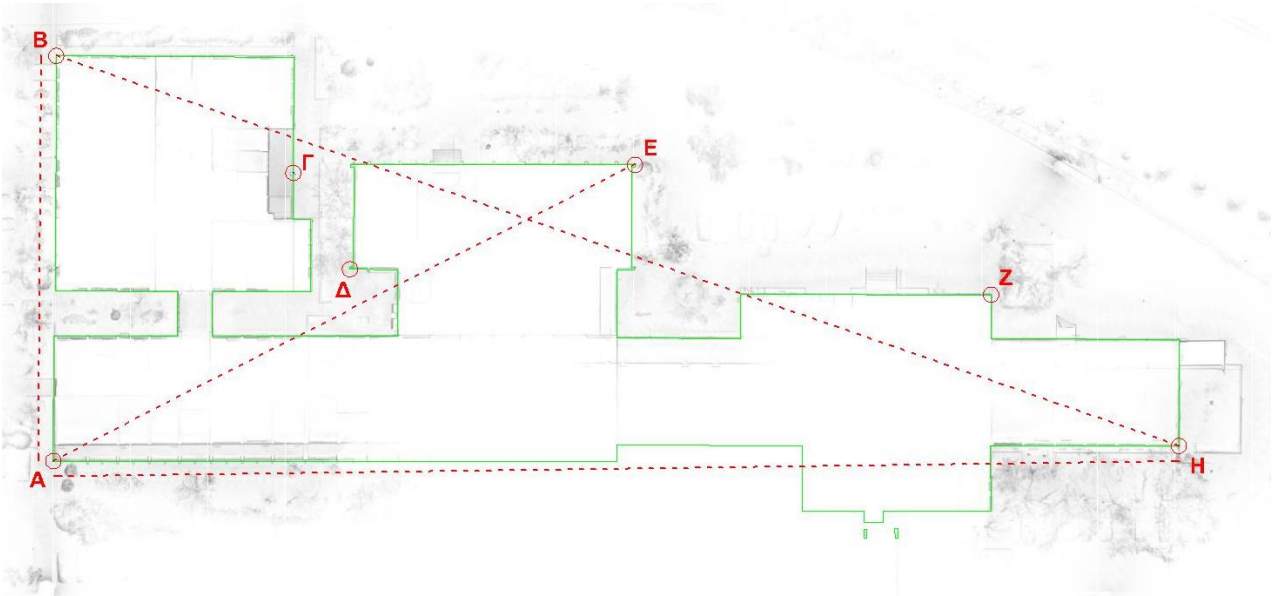
Πίνακας 31: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου με όλα τα διαθέσιμα τοποσταθερά.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς της σάρωσης του εξωτερικού περιγράμματος του κτηρίου Λαμπαδαρίου και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.112m, που είναι υπερτριπλάσιο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).

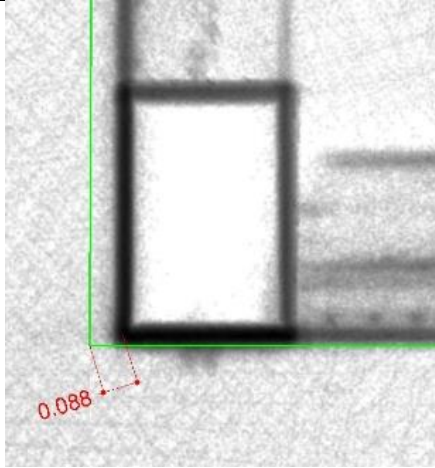
#### 4.6.2.1.1. Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ένδειξη των αποκλίσεων στα σημεία και στις αποστάσεις ελέγχου



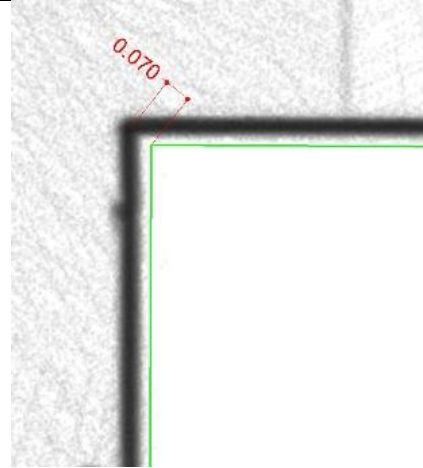
Εικόνα 93: Σκαρίφημα ένδειξης θέσης σημείων και αποστάσεων ελέγχου

#### 4.6.2.1.2. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου



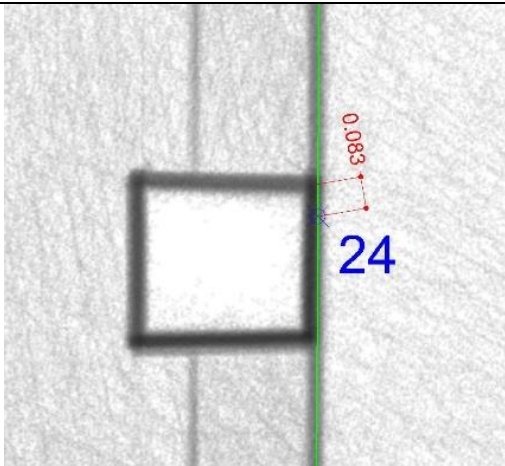
Εικόνα 94

Σημείο Ελέγχου Α



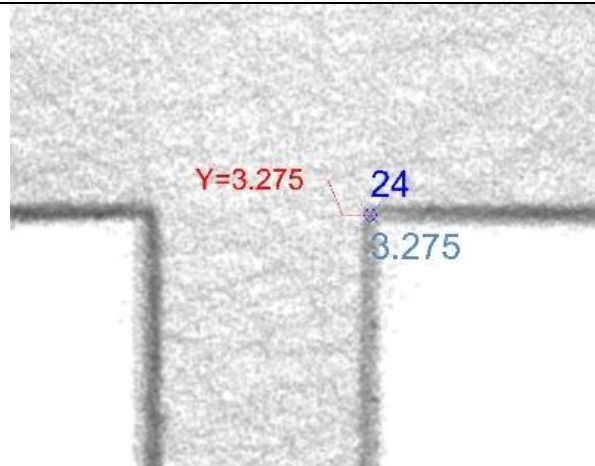
Εικόνα 95

Σημείο Ελέγχου Β



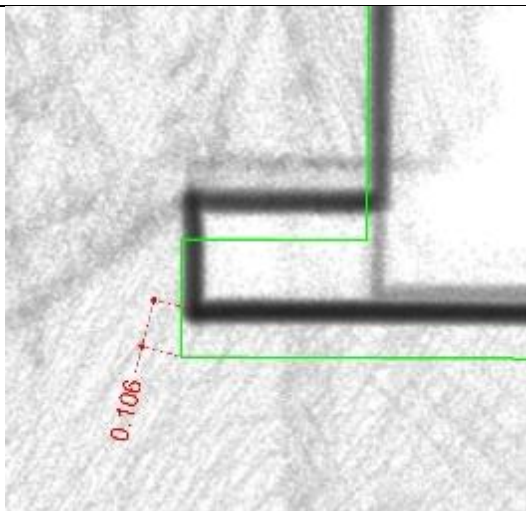
Εικόνα 96

Σημείο Ελέγχου Γ (οριζοντιογραφικά)



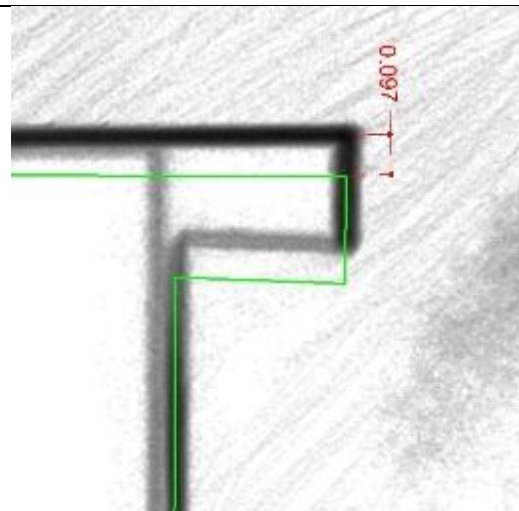
Εικόνα 97

Σημείο Ελέγχου Γ (υψομετρικά)



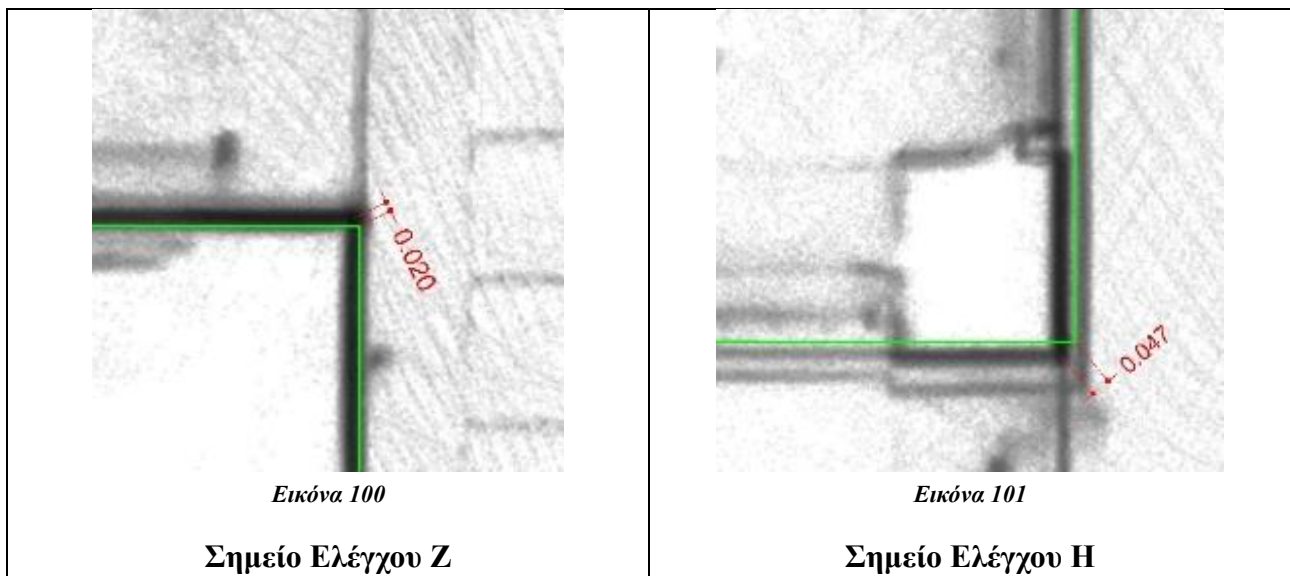
Εικόνα 98

Σημείο Ελέγχου Δ



Εικόνα 99

Σημείο Ελέγχου Ε



#### 4.6.2.2. Σύνοψη συμπερασμάτων

Το παρόν κεφάλαιο είχε ως κύριο στόχο να εξακριβώσει την ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON, συγκρίνοντάς τη με την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης που δίνει ο κατασκευαστής, μη εφαρμόζοντας τις οδηγίες χρήσης για έναρξη και λήξη της σάρωσης στο ίδιο σημείο για την δημιουργία ενός κλειστού βρόγχου και για τη δημιουργία επιπλέον κλειστών βρόγχων κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Σκοπός είναι αφενός να προσδιοριστεί η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης των τοποσταθερών από τον σαρωτή μέσω του δείκτη RMS της γεωαναφοράς, ο οποίος δείχνει τον βαθμό προσαρμογής της σάρωσης με τις τοπογραφικές μετρήσεις και αφετέρου να προσδιοριστεί η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή συγκρίνοντας τη θέση και την απόσταση χαρακτηριστικών σημείων (σημεία ελέγχου) επί του περιγράμματος του κτηρίου όπως προέκυψαν από το τρισδιάστατο νέφος σημείων σε σχέση με την τοπογραφική αποτύπωση.

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραπάνω δύο σεναρίων:

Τομείς σάρωσης	Διάρκεια σάρωσης (min)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)
1	18	4	0.112	0.156

Πίνακας 32: Αποτελέσματα γεωαναφοράς

A/A	Σημεία Ελέγχου	Απόκλιση (m)
1	A	0.088
2	B	0.070
3	Γ (οριζ.)	0.083
4	Γ (υψομ.)	0
5	Δ	0.106
6	E	0.097
7	Z	0.020
8	H	0.047
	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.106</b>

Πίνακας 33: Μέτρηση απόκλισης θέσης στα σημεία ελέγχου

Αποστάσεις	Τοπογραφική αποτύπωση D (m)	Laser σαρωτής d <sub>1</sub> (m)	Δd <sub>1</sub> =d <sub>1</sub> -D (m)
A-B	52.364	52.381	0.017
A-E	84.360	84.315	-0.045
A-H	145.498	145.377	-0.121
B-H	153.617	153.659	0.042
		<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>-0.121</b>

Πίνακας 34: Μέτρηση απόκλισης αποστάσεων στα σημείων ελέγχου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Η ακρίβεια της σάρωσης που επετεύχθη είναι μικρότερη της ονομαστικής ακρίβειας του συστήματος ( $\pm 0.030$  m). Πιο συγκεκριμένα προέκυψε σφάλμα μέτρησης τριπλάσιο της ονομαστικής ακρίβειας του σαρωτή ως προς την απόλυτη θέση του νέφους σημείων εντός του συστήματος αναφοράς ( $0.112\text{m} > 0.030\text{m}$ ) και τριπλάσιο σφάλμα μέτρησης ως προς την εσωτερική ακρίβεια του νέφους σημείων ( $0.121\text{m} > 0.030\text{m}$ ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν δημιουργήθηκαν καθόλου κλειστοί βρόγχοι κατά την διάρκεια της σάρωσης αλλά και ότι το περιβάλλον σάρωσης δεν είχε παντού πλήθος χαρακτηριστικών ώστε να λειτουργήσει με τον βέλτιστο τρόπο ο αλγόριθμος SLAM.
- Παρατηρείται ότι το μέσο RMS ( $0.112\text{m}$ ) αντιστοιχεί στη μέγιστη απόκλιση θέσης που βρέθηκε στα σημεία ελέγχου ( $0.106\text{m}$ ) και επίσης το μέγιστο RMS ( $0.156\text{m}$ ) αντιστοιχεί στην μέγιστη απόκλιση της απόστασης στα σημεία ελέγχου ( $0.121\text{m}$ ). Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς είναι αξιόπιστα και δίνουν μια ρεαλιστική εκτίμησης του σφάλματος των μετρήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα τοποσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή σάρωσης παρότι ήταν μόνο τέσσερα στον αριθμό.

## 4.7. Κατά μήκος σάρωση κτηρίου

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να ελεγχθεί η ακρίβεια μέτρησης του laser σαρωτή ZEB HORIZON, κάνοντας μετρήσεις σε ένα δυσμενές σενάριο όπου δεν θα τηρηθούν αρκετές από τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή.

Για να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω έλεγχος, επιλέχθηκε να γίνει μια σάρωση η οποία να διασχίζει το κτήριο από την μία άκρη στην άλλη κυρίως μέσω του υπόγειου διαδρόμου. Η έναρξη και λήξη της σάρωσης θα είναι εκτός του κτηρίου. Αυτό το περιβάλλον σάρωσης δεν έχει παντού πλήθος χαρακτηριστικών και πιο συγκεκριμένα, εσωτερικά το κτήριο που παρουσιάζει έντονα χαρακτηριστικά λόγω γεωμετρίας, ενώ εξωτερικά υπάρχουν πάρκινγκ και δρόμος που έχουν λιγότερο έντονα χαρακτηριστικά.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σαρώσεις όπου στην πρώτη η έναρξη και η λήξη έγιναν στο ίδιο τοποσταθερό (κλειστή όδευση), ενώ στη δεύτερη η έναρξη και η λήξη έγιναν σε διαφορετικά τοποσταθερά (ανοιχτή όδευση-μη κλειστός βρόγχος). Επίσης και στις σαρώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια τέσσερα τοποσταθερά. Όλες οι άλλες παράμετροι ήταν ίδιες και παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι οδηγίες του κατασκευαστή που εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Η ταχύτητα σάρωσης πραγματοποιήθηκε σε ρυθμό αργού περπατήματος.
- Όλοι οι χώροι και τα αντικείμενα προς σάρωση βρίσκονταν σε απόσταση μικρότερη των 50m από τον χειριστή.
- Η σάρωση δεν υπερέβη την προτεινόμενη χρονική διάρκεια των 30min.

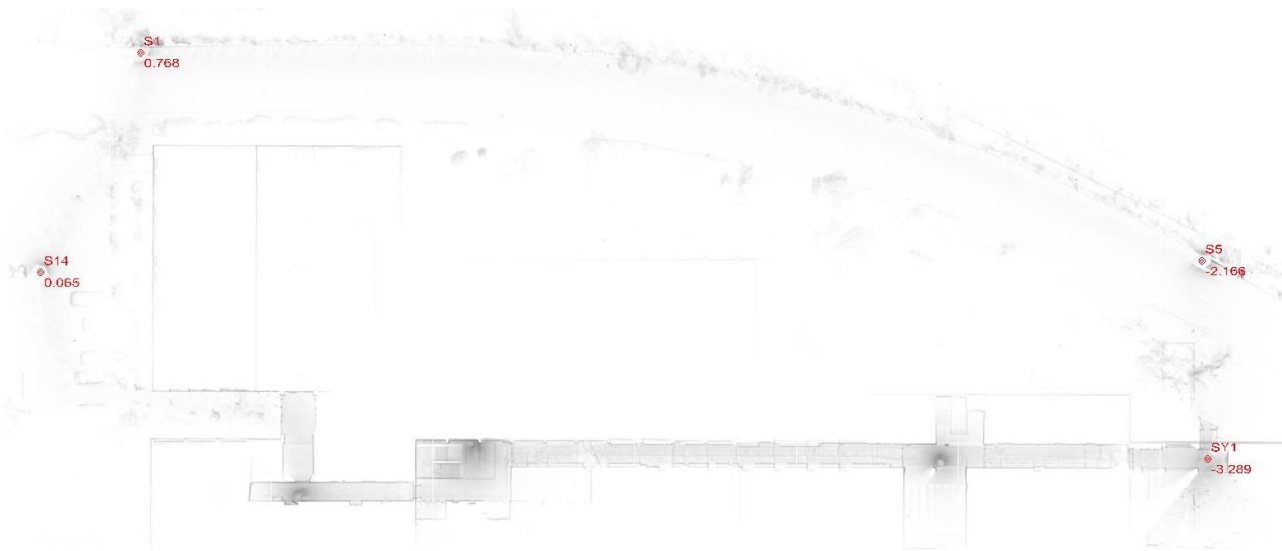
Οι οδηγίες του κατασκευαστή που δεν εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.
- Περιβάλλον σάρωσης όπου δεν υπάρχουν παντού έντονα χαρακτηριστικά.

Τέλος, σε αυτή την ενότητα για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης του σαρωτή, επιπλέον του δείκτη RMS και την μέτρηση αποκλίσεων στα σημεία ελέγχου, τοποθετήθηκαν τρεις σφαίρες εντοπισμού στη θέση τοποσταθερών, ώστε να γίνει σύγκριση των συντεταγμένων που θα προκύψουν από την σάρωση με αυτές της τοπογραφικής αποτύπωσης.

### 4.7.1. Εντοπισμός σφαιρών με κλειστή όδευση

Η διάρκεια σάρωσης ήταν 8min και μετρήθηκαν συνολικά τέσσερα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά. Η σάρωση ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό S5. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



**Εικόνα 102:** Σκαρίφημα της θέσης των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με κλειστή όδευση.

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των τεσσάρων τοποσταθερών που μετρήθηκαν, τα οποία βρίσκονται στα δύο άκρα της περιοχής σάρωσης και σε απόσταση από τις θέσεις των σφαιρών.



**Εικόνα 103:** Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με κλειστή όδευση.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.

Reference system:		Pointcloud system:			Residuals:						
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	S5	230.169	138.135	-2.166	0.020	0.123	-0.179	0.055	-0.003	-0.005	0.055
2	SY1	230.875	113.636	-3.289	23.613	6.794	-1.289	0.040	-0.012	0.003	0.042
3	S14	86.466	136.700	0.065	36.620	-138.958	2.118	-0.053	-0.001	-0.002	0.053
4	S1	98.830	163.863	0.768	7.238	-133.615	2.816	-0.042	0.016	0.005	0.045
										<b>RMS [m]=0.049</b>	

**Πίνακας 35:** Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με κλειστή όδευση.

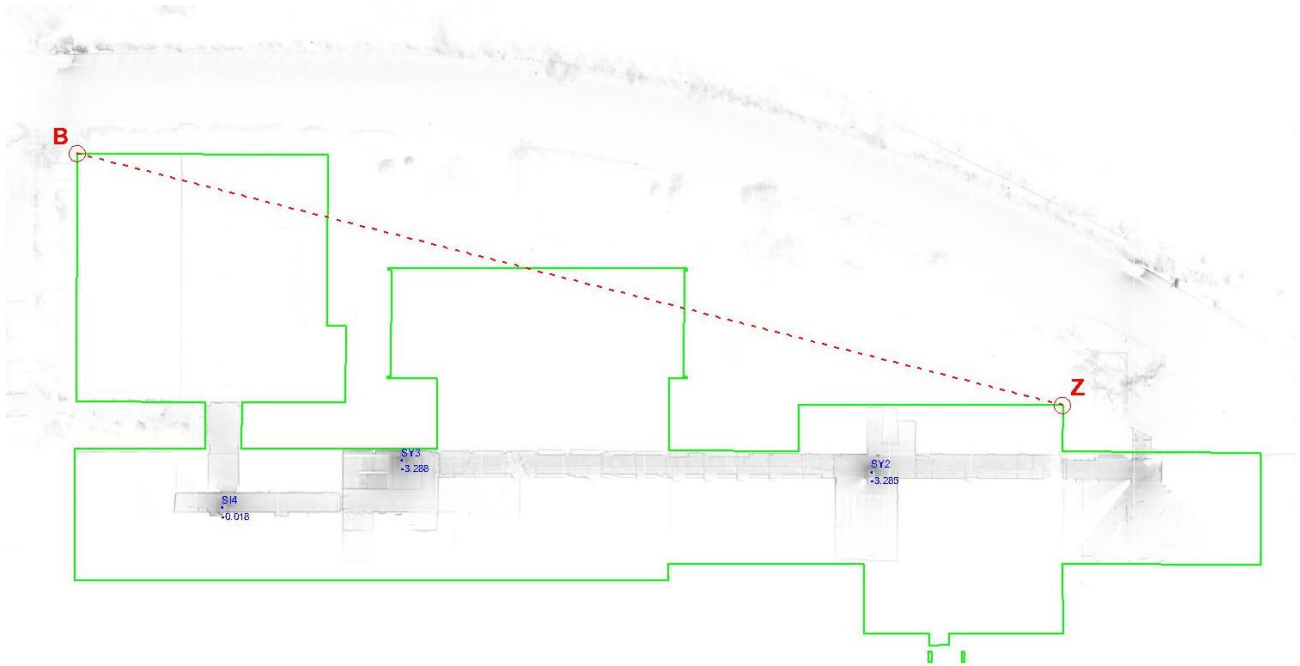


Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς της σάρωσης και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

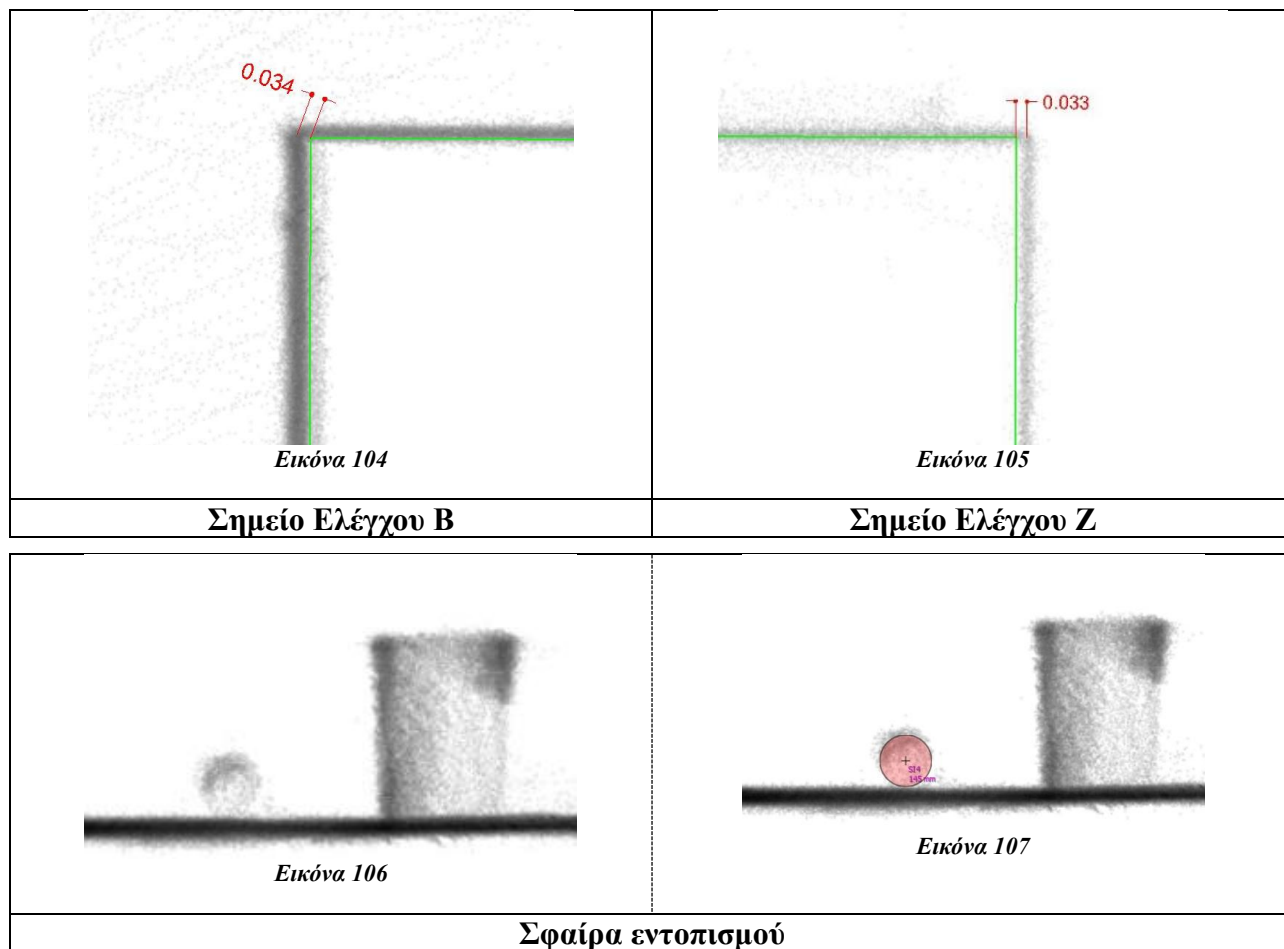
- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.049m, που είναι μεγαλύτερο από την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Z (υψομετρικά) είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Y (οριζοντιογραφικά).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι παρουσιάζουν την ίδια τάξη απόκλισης.

#### 4.7.1.1. Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ένδειξη των αποκλίσεων στα σημεία και στις αποστάσεις ελέγχου.

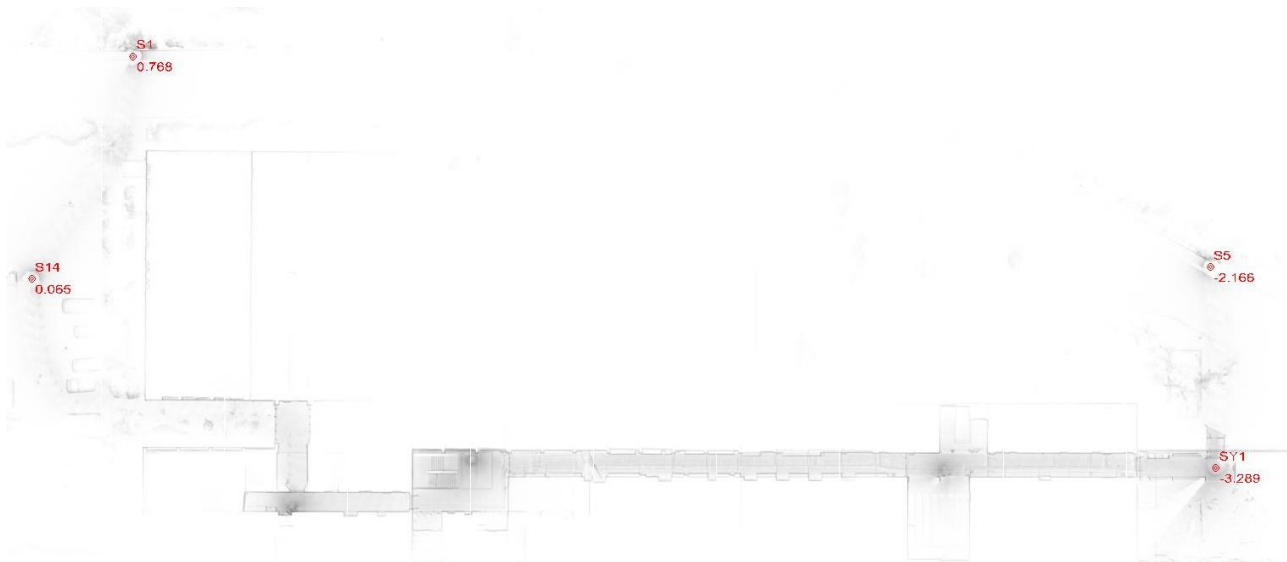


#### 4.7.1.1.1. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου



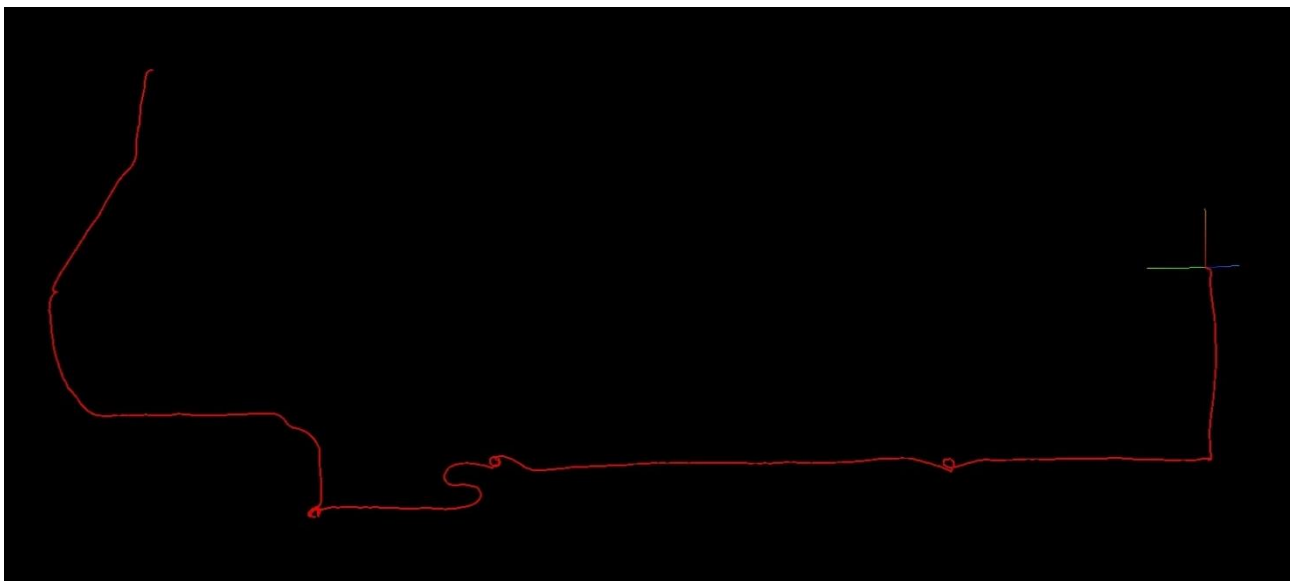
#### 4.7.2. Εντοπισμός σφαιρών με ανοιχτή όδευση.

Η διάρκεια σάρωσης ήταν 6min και μετρήθηκαν συνολικά τέσσερα τοποσταθερά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλα για την γεωαναφορά. Η σάρωση ξεκίνησε από το τοποσταθερό S5 και ολοκληρώθηκε στο τοποσταθερό S1. Παρακάτω παρουσιάζονται σκαριφήματα με την θέση των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, με την πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης και πίνακας με τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς.



**Εικόνα 108:** Σκαρίφημα της θέσης των τοποσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με ανοιχτή όδευση.

Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται η διάταξη των τεσσάρων τοποσταθερών που μετρήθηκαν, τα οποία βρίσκονται στα δύο άκρα της περιοχής σάρωσης και σε απόσταση από τις θέσεις των σφαιρών.



**Εικόνα 109:** Σκαρίφημα της πορείας που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με ανοιχτή όδευση.

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης, από την οποία προκύπτει ότι δεν δημιουργήθηκαν επιπλέον κλειστοί βρόγχοι.

A/A	Reference system:			Pointcloud system:			Residuals:				
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY1	230.875	113.636	-3.289	-24.449	-0.621	-1.199	-0.014	0.010	0.016	0.023
2	S14	86.466	136.700	0.065	-1.765	143.851	2.314	-0.023	-0.001	-0.012	0.026
3	S5	230.169	138.135	-2.166	0.042	0.153	-0.091	-0.021	0.004	-0.016	0.027
4	S1	98.830	163.863	0.768	25.417	131.473	3.044	0.059	-0.013	0.012	0.062
										<b>RMS [m]=0.038</b>	

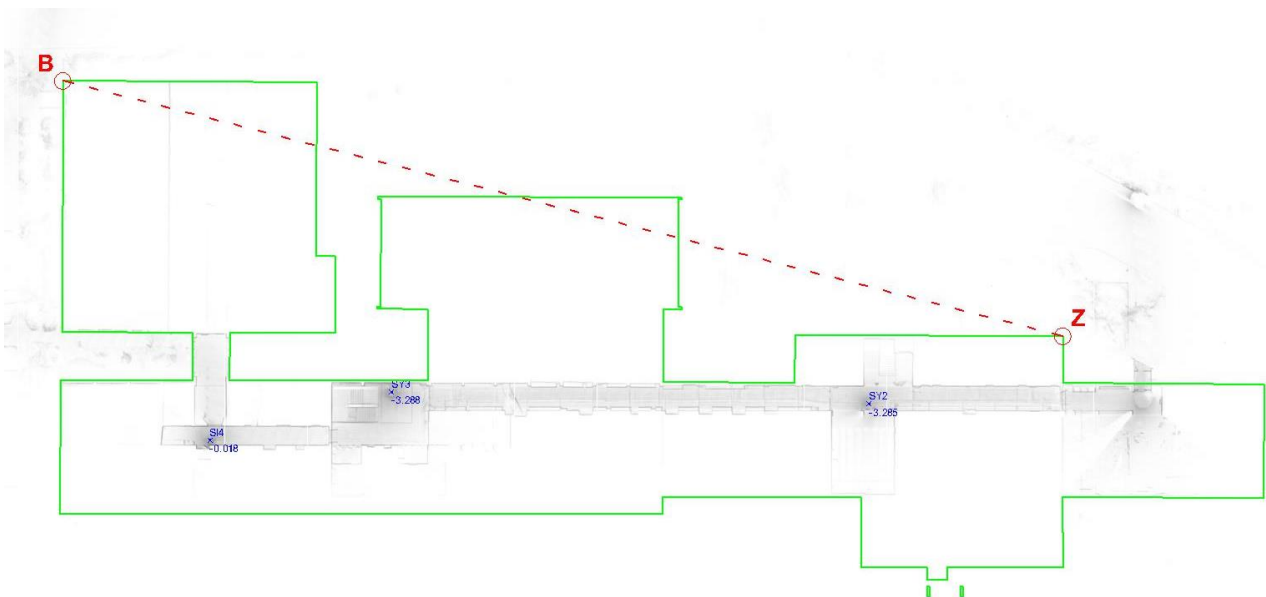
Πίνακας 36: Αποτελέσματα επίλυσης γεωαναφοράς της σάρωσης για τον εντοπισμό των σφαιρών με ανοιχτή όδευση.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα επίλυσης της γεωαναφοράς της σάρωσης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

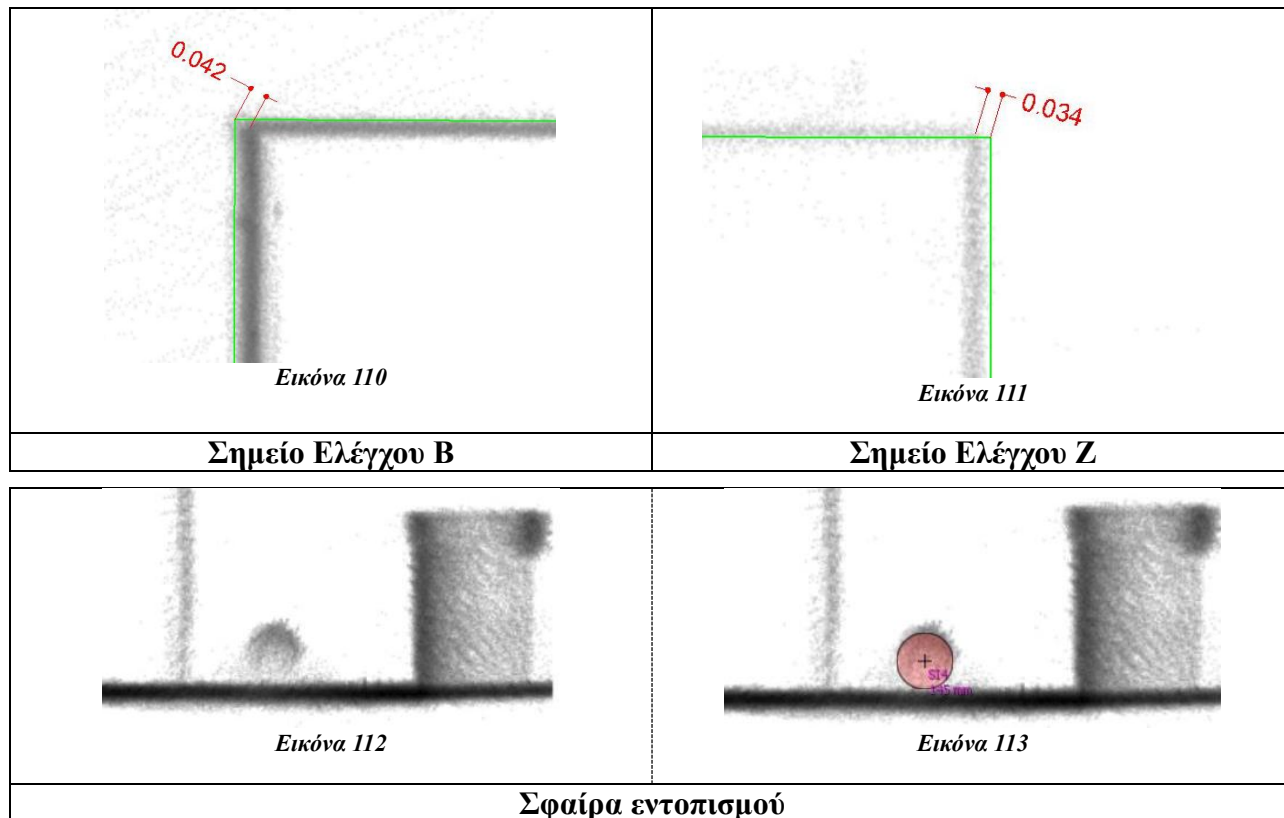
- το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) προέκυψε 0.038m, που είναι αντίστοιχο με την ονομαστική ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά άξονα προκύπτει ότι η προσαρμογή κατά τον άξονα Υ είναι συνολικά καλύτερη από αυτή κατά τους άξονες X, Z.
- παρατηρώντας τα σφάλματα ανά τοποσταθερό προκύπτει ότι αυτό με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι το S1, το οποίο αξίζει να επισημανθεί ότι είναι το πιο απομακρυσμένο από το κτήριο.

#### 4.7.2.1. Προσδιορισμός ακρίβειας μέτρησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ένδειξη των αποκλίσεων στα σημεία ελέγχου.



#### 4.7.2.1.1. Αποκλίσεις στα σημεία ελέγχου



#### 4.7.3. Σύνοψη συμπερασμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των γεωαναφορών των δύο σαρώσεων, όπου παρατηρείται ότι το μέσο RMS της σάρωσης με κλειστή όδευση (0.038m) είναι μικρότερο από αυτό της σάρωσης με ανοιχτή όδευση (0.049m). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με αυτό που αναμενόταν, αφού στη σάρωση με ανοιχτή όδευση δεν δημιουργήθηκε κανένας κλειστός βρόγχος. Παρόλα αυτά, η μεταξύ τους διαφορά είναι 0.011m, αρκετά μικρότερη από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή (0.030m) και μπορεί να θεωρηθεί εντός των ορίων του στατιστικού λάθους. Το μέγιστο RMS της κλειστής όδευσης είναι 0.055m, μικρότερο από αυτό της ανοιχτής όδευσης που είναι 0.062m. Σε κάθε περίπτωση, και στα δύο σενάρια όλες οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες της ονομαστικής ακρίβειας του σαρωτή.

Κλειστή όδευση				Ανοιχτή όδευση			
Διάρκεια σάρωσης (min)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)	Διάρκεια σάρωσης (min)	Αριθμός τοποσταθερών	Μέσο RMS (m)	Μέγιστο RMS (m)
8	4	0.049	0.055	6	4	0.038	0.062

Πίνακας 37: Αποτελέσματα γεωαναφοράς

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο συγκεντρωτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα των αποκλίσεων στα σημεία ελέγχου.

Α/Α	Σημεία Ελέγχου	Απόκλιση (m)	
		Κλειστή όδευση	Ανοιχτή όδευση
1	B	0.034	0.042
2	Z	0.033	0.034
	<b>MAX Απόκλιση</b>	<b>0.034</b>	<b>0.042</b>

Πίνακας 38: Μέτρηση απόκλισης θέσης στα σημεία ελέγχου

Αποστάσεις	Τοπογραφική αποτύπωση D (m)	Κλειστή όδευση		Ανοιχτή όδευση	
		Laser σαρωτής d <sub>1</sub> (m)	Δd <sub>1</sub> =d <sub>1</sub> -D (m)	Laser σαρωτής d <sub>2</sub> (m)	Δd <sub>2</sub> =d <sub>2</sub> -D (m)
<b>B-Z</b>	124.712	124.778	0.066	124.637	-0.075

Πίνακας 39: Μέτρηση απόκλισης αποστάσεων στα σημεία ελέγχου

Όσον αφορά στις αποκλίσεις της θέσης στα σημεία ελέγχου, παρατηρείται ότι για τη σάρωση με ανοιχτή όδευση είναι 0.042m, η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της κλειστής όδευσης που είναι 0.034m. Η μεταξύ τους διαφορά είναι 0.008m. Γενικά προκύπτει ότι και για τα δύο σενάρια οι αποκλίσεις είναι παρόμοιες και οριακά μεγαλύτερες από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή.

Για τις αποκλίσεις της απόστασης στα σημεία ελέγχου, παρατηρείται ότι για τη σάρωση με ανοιχτή όδευση είναι -0.075m, η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της κλειστής όδευσης που είναι 0.066m. Σε απόλυτα μεγέθη η διαφορά της μεταξύ τους απόκλισης είναι 0.009m, ενώ η σχετική μεταξύ τους διαφορά είναι 0.141m, η οποία προκύπτει γιατί το περίγραμμα του κτηρίου από την σάρωση με κλειστή όδευση βρίσκεται στην εξωτερική μεριά του περιγράμματος της τοπογραφικής αποτύπωσης ενώ από τη σάρωση με ανοιχτή όδευση βρίσκεται από την εσωτερική του μεριά (δες κεφάλαια 4.7.1.1.1. & 4.7.2.1.1).

Τέλος, παρατίθενται οι πίνακες που παρουσιάζουν τις συντεταγμένες των σφαιρών όπως αναγνωρίστηκαν στο τρισδιάστατο νέφος σημείων και την αντιπαραβολή τους με τις συντεταγμένες της θέσης τους από την τοπογραφική αποτύπωση. Τονίζεται ότι το υψόμετρο της θέσης των σφαιρών έχει αναχθεί στο ίδιο σημείο με αυτό της τοπογραφικής αποτύπωσης, αφαιρώντας την ακτίνα της ( $\frac{1}{2} 145mm$ ) και το ύψος της βάσης της (30mm).

Α/Α	Reference system:				Pointcloud system (spheres):			Residuals:			
	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	197.841	113.357	-3.296	0.037	0.031	-0.011	0.050
2	SY3	140.132	114.768	-3.288	140.156	114.855	-3.347	0.024	0.087	-0.059	0.108
3	SI4	118.201	108.945	-0.018	118.246	108.975	-0.098	0.045	0.030	-0.080	0.097
											<b>RMS [m]=0.085</b>

Πίνακας 40: Κλειστή όδευση – Απόκλιση θέσης σφαιρών

Reference system:				Pointcloud system (spheres):			Residuals:				
A/A	ID	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	Delta
1	SY2	197.804	113.326	-3.285	197.787	113.296	-3.306	-0.017	-0.030	-0.021	0.040
2	SY3	140.132	114.768	-3.288	140.104	114.708	-3.310	-0.028	-0.060	-0.022	0.070
3	SI4	118.201	108.945	-0.018	118.174	108.881	-0.051	-0.027	-0.064	-0.033	0.077
										<b>RMS [m]=0.055</b>	

Πίνακας 41: Ανοιχτή όδευση – Απόκλιση θέσης σφαιρών

Παρατηρώντας τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι:

- Για τη σάρωση με κλειστή όδευση το μέσο RMS της θέσης των σφαιρών είναι 0.085m ενώ το μέσο RMS της γεωναφοράς είναι 0.049m. Για τη σάρωση με ανοιχτή όδευση το μέσο RMS της θέσης των σφαιρών είναι 0.055m ενώ το μέσο RMS της γεωναφοράς είναι 0.038m.
- Η προσαρμογή κατά τον άξονα Z παρουσιάζει αντίστοιχα ή και μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με του άξονες X,Y.
- Το μέσο αλλά και το μέγιστο RMS της θέσης των σφαιρών για τη σάρωση με κλειστή όδευση είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της σάρωσης με ανοιχτή όδευση, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με αυτό που αναμενόταν, αφού στη σάρωση με ανοιχτή όδευση δεν δημιουργήθηκε κανένας κλειστός βρόγχος.

Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι η προσαρμογή του νέφους σημείων στην τοπογραφική αποτύπωση είναι εκτός προδιαγραφών ακρίβειας του σαρωτή. Η διαφοροποίηση στις αποκλίσεις μεταξύ των δύο σεναρίων είναι πολύ μικρή και κατά μέσω όρο περίπου 0.010m το οποίο είναι αρκετά μικρότερο από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή 0.030m και μπορεί να θεωρηθεί εντός των ορίων του στατιστικού λάθους. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν μπόρεσε να εντοπιστεί με σαφήνεια η επίπτωση στην ακρίβεια μέτρησης, η ύπαρξη ή μη, κλειστών βρόγχων κατά τη σάρωση. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι τρία από τα τέσσερα τοποσταθερά που επιλέχθηκαν (S1, S5, S14) βρίσκονται μακριά από το κτήριο και την κύρια περιοχή σάρωσης, στο πάρκινγκ και στο δρόμο, περιβάλλον φτωχό σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επίσης το κλείσιμο της όδευσης έγινε με κατεύθυνση από το τοποσταθερό S1 προς το S5 (βλέπε ενότητα 4.7.1), περπατώντας στο κρσπεδο του δρόμου που βρίσκεται απέναντι από το κτήριο, όπου υπάρχουν ελάχιστα χαρακτηριστικά (φύτευση, χαμηλό τοιχίο), με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος SLAM να μην είχε τα απαραίτητα δεδομένα για τη βέλτιστη επίλυση.

Τέλος, το γεγονός ότι η απόκλιση στον εντοπισμό των σφαιρών είναι μεγαλύτερη στην σάρωση με κλειστή όδευση από ότι στην σάρωση με ανοιχτή όδευση και επίσης το γεγονός, ότι για πρώτη φορά σε αυτή την εργασία, η προσαρμογή κατά τον άξονα Z παρουσιάζει αντίστοιχα ή και μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με του άξονες X,Y, πιθανόν να οφείλεται συνδυαστικά στους λόγους που αναλύθηκαν στην παραπάνω παράγραφο και στον τρόπο σάρωσης των σφαιρών. Οι σφαίρες ήταν διαμέτρου 145mm με βάση ύψους 30mm, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε σημεία που υπήρχαν τοποσταθερά επί του δαπέδου. Κατά τη σάρωση, λόγω του ότι οι σφαίρες ήταν σχεδόν σε επαφή με το δάπεδο ήταν πολύ δύσκολο να αποτυπωθούν πλήρως γιατί ο σαρωτής δεν είχε τη δυνατότητα, λόγω μεγέθους, να πλησιάσει στο δάπεδο όσο απαιτείται για να μετρηθεί και το κάτω μέρος των σφαιρών. Συνεπώς, η μη ομοιόμορφη αποτύπωση των σφαιρών κατά τη σάρωση μπορεί να οδήγησε σε χαμηλότερης ακρίβειας εντοπισμό τους στο τρισδιάστατο νέφος σημείων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκε η ακρίβεια μέτρησης του φορητού laser σαρωτή ZEB HORIZON της εταιρείας Geoslam μέσω διαφόρων σεναρίων μετρήσεων στον εργαστηριακό χώρο Μετρολογίας και στο κτήριο Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ-ΜΓ. Η διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων αφορούσε στην εφαρμογή ή μη, των οδηγιών χρήσης του κατασκευαστή κατά τη διάρκεια των σαρώσεων. Η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό GeoSLAM Hub, για την παραγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων, έγινε με τις προεπιλεγμένες-προτεινόμενες ρυθμίσεις.

### 5.1. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε με σαφήνεια ότι, εφόσον τηρηθούν οι οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, η ακρίβεια μέτρησης που επιτυγχάνεται είναι εντός των προδιαγραφών του σαρωτή ( $\pm 0.030\text{m}$ ).

Κατέστη σαφές ότι οι οδηγίες χρήσης δεν στοχεύουν τόσο πολύ στην καθοδήγηση για καλύτερη πληρότητα αποτύπωσης της περιοχής σάρωσης. Κυρίως στοχεύουν, στο να γίνεται η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων με τέτοιον τρόπο ώστε να διευκολυνθεί ο αλγόριθμος SLAM, τόσο στη επίτευξη λύσης και τη δημιουργία του χαρτογραφικού υπόβαθρου, όσο και στην επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας, εξαλείφοντας ή αντιμετωπίζοντας πιθανές πηγές σφαλμάτων.

Στο κεφάλαιο 4.5 αποδείχθηκε ότι εφόσον τηρηθούν οι οδηγίες χρήσης και το γεωμετρικό περιβάλλον σάρωσης είναι πλούσιο σε χαρακτηριστικά, όπως στην προκειμένη περίπτωση το κτήριο Λαμπαδαρίου, επιτυγχάνεται η ονομαστική ακρίβεια μέτρησης, τόσο σχετικά (αποστάσεις) όσο και απόλυτα (θέση στο χώρο).

Σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια, όπου δεν τηρήθηκε τουλάχιστον μία από τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν χειρότερη της ονομαστικής.

Η μεγαλύτερη βαρύτητα των οδηγιών χρήσης αφορά στο κλείσιμο βρόγχων και στην ύπαρξη στο περιβάλλον πλούσιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Η σημασία του να υπάρχουν πλούσια γεωμετρικά χαρακτηριστικά στο περιβάλλον σάρωσης, δείχνει να τεκμηριώνεται και από τις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στα τοποσταθερά κατά τη γεωαναφορά των νεφών σημείων. Σε όλα τα σενάρια κατέστη εμφανές ότι τα τοποσταθερά με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι τα πιο απομακρυσμένα από την κυρίως περιοχή σάρωσης (κτήριο) (βρίσκονταν τοποθετημένα στο πάρκινγκ και στο δρόμο, περιοχές με όχι τόσο πλούσια γεωμετρικά χαρακτηριστικά).



Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η βέλτιστη μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθηθεί κατά τη χρήση του φορητού laser σαρωτή ZEB HORIZON για τη σάρωση μιας περιοχής, ώστε να επιτευχθεί η ονομαστική του ακρίβεια είναι:

- Αυτοψία για αναγνώριση της περιοχής σάρωσης και καταγραφή των χαρακτηριστικών της.
- Εντοπισμός των προβληματικών σημείων και προετοιμασία αντιμετώπισής τους. Π.χ. τρόπο μετακίνησης από στενά περάσματα, προσθήκη τεχνικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε φτωχό περιβάλλον, κτλ.
- Εντοπισμός πορείας σάρωσης ώστε να δημιουργηθούν οι περισσότεροι δυνατοί κλειστοί βρόγχοι.
- Σάρωση τηρώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Επίλυση των πρωτογενών δεδομένων με τον αλγόριθμο SLAM για την παραγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων.

Οι παραπάνω οδηγίες αφορούν σενάρια κατά τα οποία αρκεί μια σάρωση για την αποτύπωση της περιοχής ενδιαφέροντος. Σε περίπτωση που λόγω μεγέθους της περιοχής αποτύπωσης απαιτούνται παραπάνω της μίας σαρώσεις ή χρειάζεται η σάρωση να ενταχθεί σε ένα σύστημα αναφοράς, τότε η μεθοδολογία είναι η ακόλουθη:

- Αυτοψία για αναγνώριση της περιοχής σάρωσης και καταγραφή των χαρακτηριστικών της.
- Εντοπισμός των προβληματικών σημείων και προετοιμασία αντιμετώπισής τους. Π.χ. τρόπο μετακίνησης από στενά περάσματα, προσθήκη τεχνικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε φτωχό περιβάλλον, κτλ.
- Δημιουργία τομέων σαρώσεων όπου θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους επικάλυψη, ώστε να μπορεί να γίνει στο τέλος έλεγχος της συνένωσής τους στα σημεία επικάλυψης. Επίσης θα πρέπει να έχουν κατάλληλο μέγεθος ώστε να μπορεί να αποτυπωθεί ο κάθε τομέας εντός 30min.
- Επιλογή της θέσης των τοποσταθερών εντός κάθε τομέα, λαμβάνοντας υπόψιν ότι θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή σάρωσης και σε θέση με πλούσια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.
- Δημιουργία τοπογραφικού δικτύου για την αποτύπωση των τοποσταθερών και ένταξη τους στο σύστημα αναφοράς. Θα πρέπει η ακρίβεια του δικτύου να είναι τουλάχιστον μια τάξη ανώτερη από την ονομαστική ακρίβεια του σαρωτή.
- Εντοπισμός πορείας σάρωσης ώστε να δημιουργηθούν οι περισσότεροι δυνατοί κλειστοί βρόγχοι.
- Σάρωση τηρώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή και αποτυπώνοντας τα τοποσταθερά.
- Επίλυση των πρωτογενών δεδομένων με τον αλγόριθμο SLAM για την παραγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων.
- Γεωαναφορά του κάθε νέφους σημείων στο σύστημα αναφοράς για την δημιουργία του ενιαίου τρισδιάστατου υποβάθρου.

## 5.2. Προτάσεις

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στον έλεγχο της ακρίβειας μέτρησης με χρήση διαφόρων σεναρίων μετρήσεων που αφορούσαν στην εφαρμογή ή μη, των οδηγιών χρήσης του κατασκευαστή κατά τη διάρκεια των σαρώσεων. Επίσης, η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό GeoSLAM Hub, για την παραγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων, έγινε με τις προεπιλεγμένες-προτεινόμενες ρυθμίσεις.

Ενδιαφέρουσες προτάσεις για μελλοντική έρευνα αποτελούν:

- Έλεγχος της επίπτωσης στην ακρίβεια μέτρησης της κάθε οδηγίας του κατασκευαστή, καταστρώνοντας σενάρια μέτρησης σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όπου θα τηρούνται σταθερές όλες οι μεταβλητές εκτός από την οδηγία χρήσης που θα ελέγχεται κάθε φορά.
- Έλεγχος της επίπτωσης στην ακρίβεια μέτρησης των παραμέτρων επίλυσης του αλγορίθμου SLAM στο λογισμικό GeoSLAM Hub.
- Έλεγχος της επίπτωσης στην ακρίβεια μέτρησης, των διαφορετικών παραλλαγών του αλγορίθμου SLAM που έχουν ενσωματωθεί στο νέας γενιάς λογισμικό GeoSLAM Connect (νυν FARO Connect). Πλέον δίνεται η επιλογή, εκτός των παραμέτρων επίλυσης, να επιλεγεί παραλλαγή ανάλογα με το περιβάλλον και τον τρόπο σάρωσης. Π.χ. ευθύγραμμη σάρωση, δάσος, σήραγγα, κ.τ.λ..

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. GeoSLAM Hub User Guide v6.1, version 1.1 (10/08/20).
2. ZEB-Horizon User Guide v.4.0 (31/01/2022)
3. Bradley Hiebert-Treuer: *An Introduction to Robot SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)*
4. Søren Riisgaard and Morten Rufus Blas: *SLAM for Dummies - A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping*
5. Sebastian Thrun, John J. Leonard: *37. Simultaneous Localization and Mapping*
6. Cyrill Stachniss, John J. Leonard, Sebastian Thrun: *46. Simultaneous Localization and Mapping*
7. Cesar Cadena, Luca Carlone, Henry Carrillo, Yasir Latif, Davide Scaramuzza, Jose Neira, Ian Reid and John J. Leonard: *Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age*. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 32, NO. 6, DECEMBER 2016
8. Durrant-Whyte H. & Bailey T. 2006: *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, no.2, pp. 99-110.
9. Doaa, M., Abdel-Megeed, MS., Ramadan, H., & Roushdy, M. (2014): *3D Graph-based VisionSLAM Registration and Optimization*. INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 8, 123-130.
10. Elhashash, M., Albanwan, H., & Qin, R. (2022): *A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications*. Sensors, 22 (11), 1-26.
11. Piniotis, G., Soile, S., Bourexis, F., Tsakiri, M., & Ioannidis, C. (2020): *EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF 3D NARROW SPACE MAPPING TECHNOLOGIES*. ISPRS, 43, 149-156.
12. Qin Zou, Qin Sun, Long Chen, Bu Nie, Qingquan Li: *A Comparative Analysis of LiDAR SLAM-based Indoor Navigation for Autonomous Vehicles*. IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2020
13. Giorgio Grisetti, Rainer Kummerle, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard: *A Tutorial on Graph-Based SLAM*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, December 2010
14. Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, Ben Wegbreit: *FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem*. AAAI, 2002.

15. Alif Ridzuan Khairuddin, Mohamad Shukor Talib, Habibollah Haron: *Review on Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*. IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 27 - 29 November 2015, Penang, Malaysia
16. Yanhao Zhang, Teng Zhang, Shoudong Huang: *Comparison of EKF based SLAM and Optimization based SLAM Algorithms*. IEEE 2018
17. Muhammad Shahzad Alam Khan, Danish Hussain: *Investigation of Widely Used SLAM Sensors Using Analytical Hierarchy Process*. Journal of Sensors, Volume 2022, Article ID 5428097
18. Nwankwo Linus, Elmar Rueckert: *Understanding why SLAM algorithms fail in modern indoor environments*. In book: Advances in Service and Industrial Robotics (pp.186-194), 2023
19. Ο. Αραμπατζή, Γ. Πηνιώτης, Μ. Τσακίρη, Ν. Κουβάς: *ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. – Ε.Μ.Π. ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER TRACKER*. 7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018
20. Τσακίρη Μ., Σταθάς Δ., Μπίθας Α. & Βαλάνη Α.: *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ελέγχου Επίγειων Σαρωτών Laser*, Σ.Α.Τ.Μ.-ΜΓ Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
21. Λάμπρου Ε.-Πανταζής Γ., *Εφαρμοσμένη Γεωδαισία*, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα 2010
22. Μπαλοδήμος Δ. - Σταθάς Δ. - Αραμπατζή Α. : *ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ: Δίκτυα-Αποτυπώσεις-Χαράξεις*, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
23. Ροϊδούλια Μ.: *Χρήση των σαρωτών τεχνολογίας SLAM για την τεκμηρίωση της ναυτικής κληρονομιάς - Εφαρμογή στο Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ»*. Σ.Α.Τ.Μ.-ΜΓ Ε.Μ.Π., Αθήνα 2023
24. Λέκκας Ι.: *Μοντελοποίηση νέφους σημείων με συνδυασμό ημιαυτόματης και αυτόματης απόδοσης για την παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου BIM*. Σ.Α.Τ.Μ.-ΜΓ Ε.Μ.Π., Αθήνα 2023
25. Τοπάλη Χ.: *Συγκριτική αξιολόγηση σαρωτών SLAM*. Σ.Α.Τ.Μ.-ΜΓ Ε.Μ.Π., Αθήνα 2023
26. Ασβός Ε.: *3D Μοντελοποίηση εσωτερικού κτηρίου με χρήση laser scanner*. Σ.Α.Τ.Μ.-ΜΓ Ε.Μ.Π., Αθήνα 2019
27. Τσόπελας Μ.: *Συμβολή στην Ανάπτυξη Μεθόδου Υβριδικής (τοπολογικής/μετρικής) Χαρτογράφησης και Ταυτόχρονου Εντοπισμού Θέσης Κινητού Ρομπότ με Χρήση Οπτικής Πληροφορίας*. Σ.Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
28. <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>
29. <https://geoslam.com/what-is-slam/>

30. <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Article/What-is-SLAM>

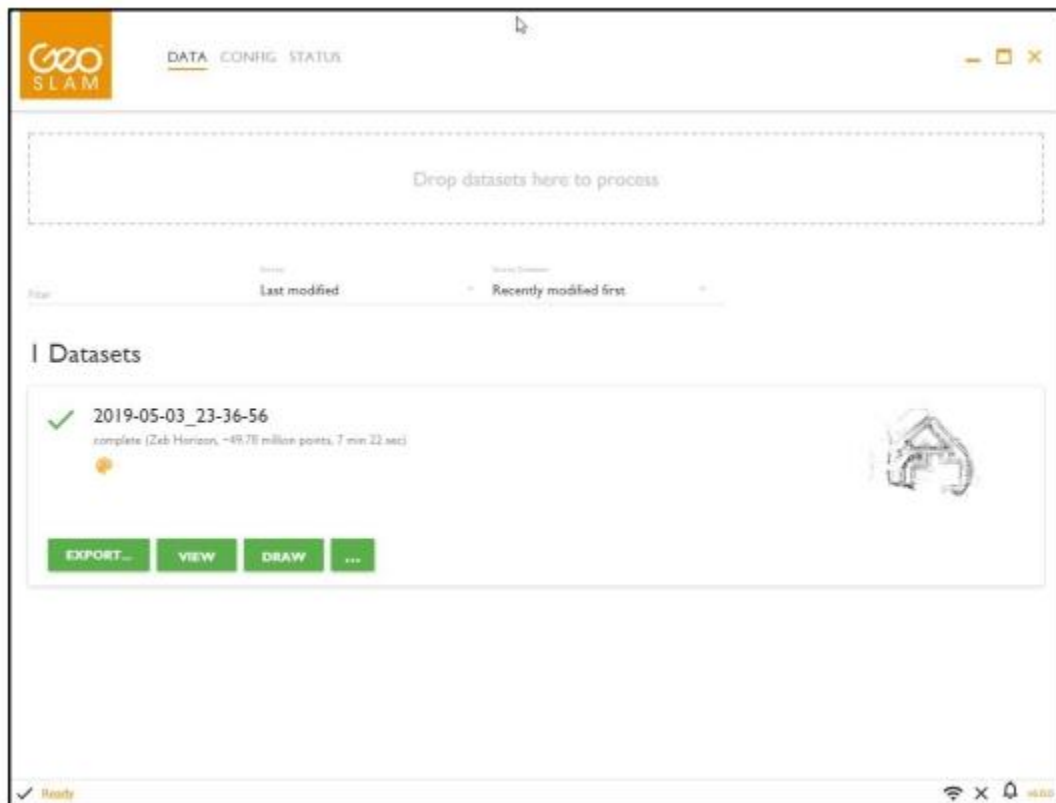
31. <https://pointcab-software.com/en/learn/pointcab-origins-tutorials/>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Λογισμικό GeoSLAM Hub

## 1. Βασική ροή εργασιών

### 1.1. Δημιουργία εργασίας

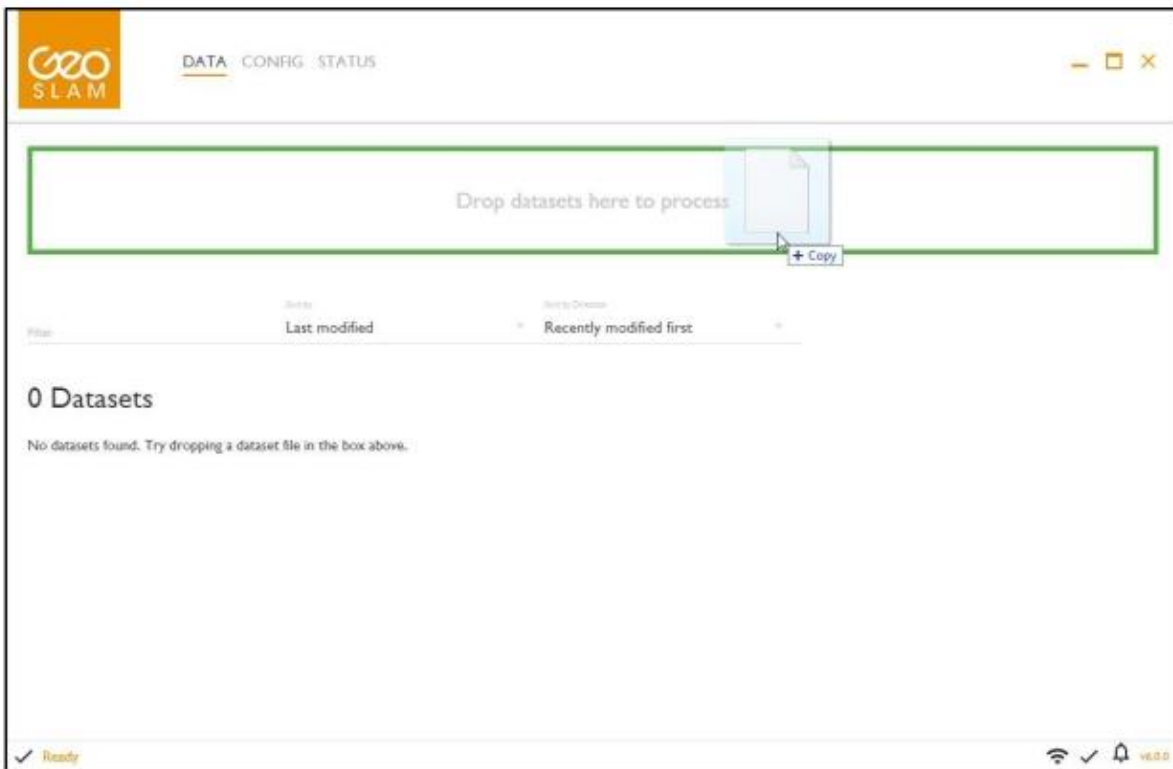
Σε αυτό το βήμα επιλέγεται ο φάκελος και το όνομα της εργασίας.



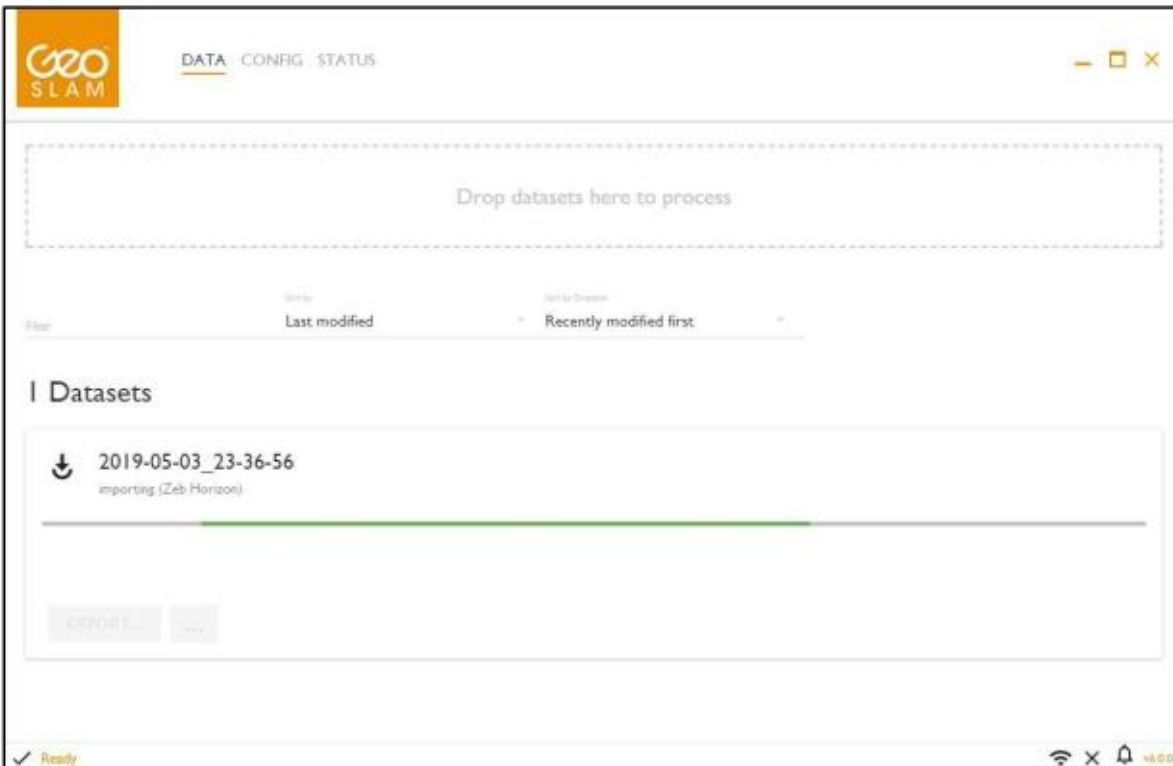
Εικόνα 114: Κόρια οθόνη του GeoSLAM Hub με φορτωμένη εργασία.

### 1.2. Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων

Σε αυτό το βήμα εισάγεται το αρχείο με τα πρωτογενή δεδομένα (μορφής *.geoslam*) και αυτόματα ξεκινάει η επεξεργασία τους από τον αλγόριθμο με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους.



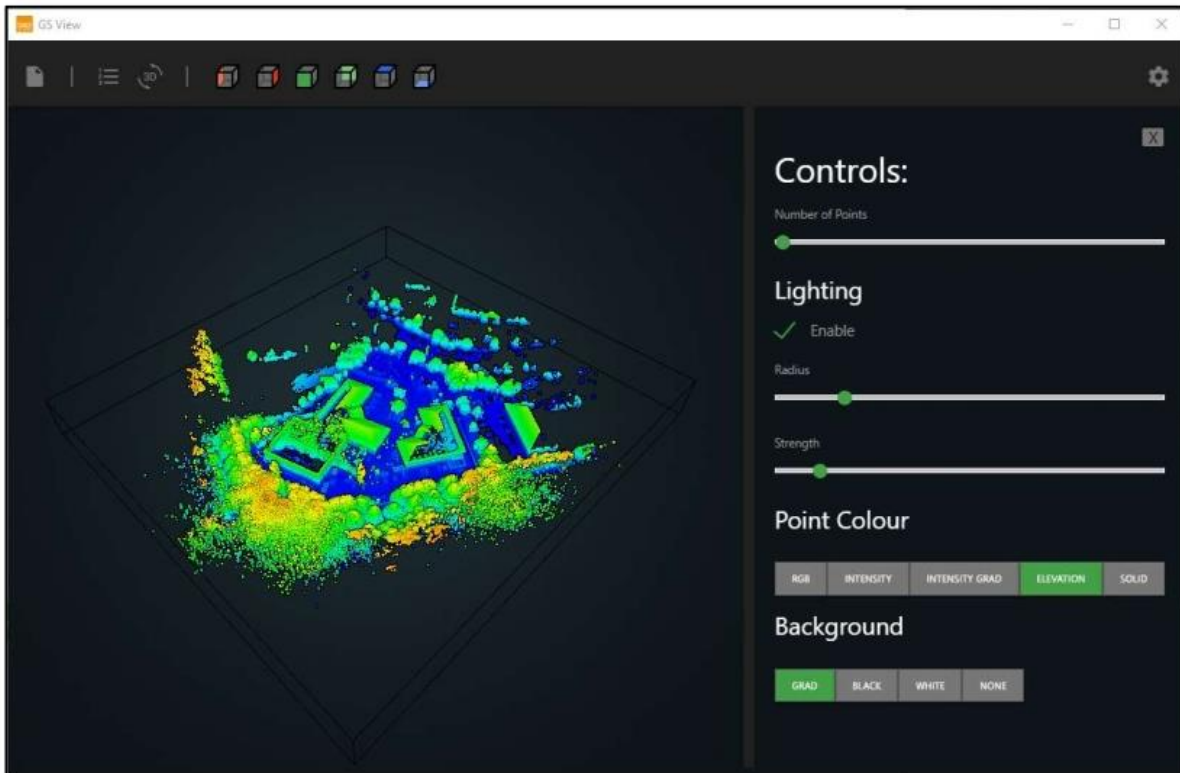
Εικόνα 115: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων για την αυτόματη έναρξη επεξεργασίας τους.



Εικόνα 116: Οθόνη ενεργής επεξεργασίας δεδομένων.

### 1.3. Θέαση αποτελεσμάτων

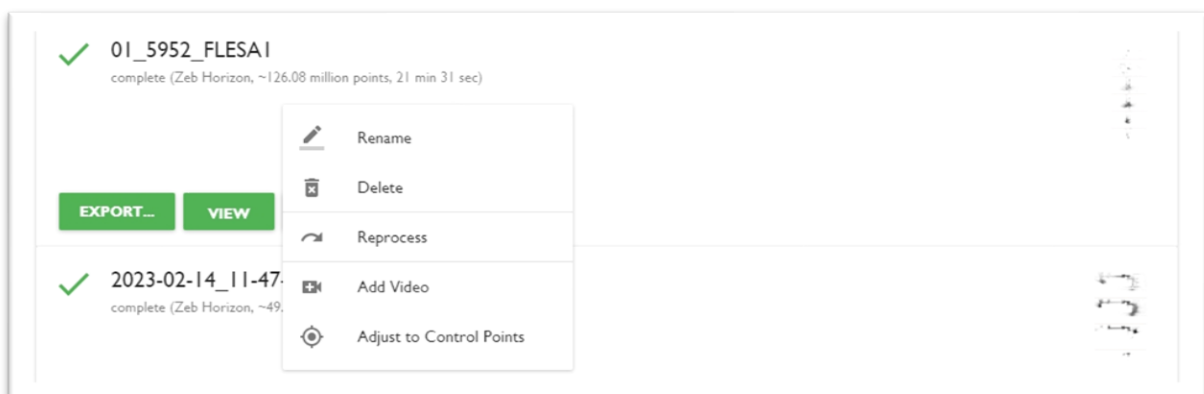
Μόλις ολοκληρωθεί η επεξεργασία των δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα προεπισκόπησης του νέφους σημείων, ώστε να ελεγχθεί για τυχόν σφάλματα. Ο έλεγχος αυτός είναι οπτικός και αφορά κυρίως στον εντοπισμό χονδρικών λαθών στην επίλυση που οδηγούν σε παραμορφώσεις στη γεωμετρία του παραγόμενου νέφους σημείων.



Εικόνα 117: Οθόνη για τη απεικόνιση και τον έλεγχο των επεξεργασμένων δεδομένων.

### 1.4. Επανεπεξεργασία

Εφόσον στο προηγούμενο στάδιο εντοπιστούν σφάλματα ή υπάρξει αδυναμία επίλυσης, δίνεται η δυνατότητα επανεπεξεργασίας αλλάζοντας τις παραμέτρους του αλγόριθμου, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.



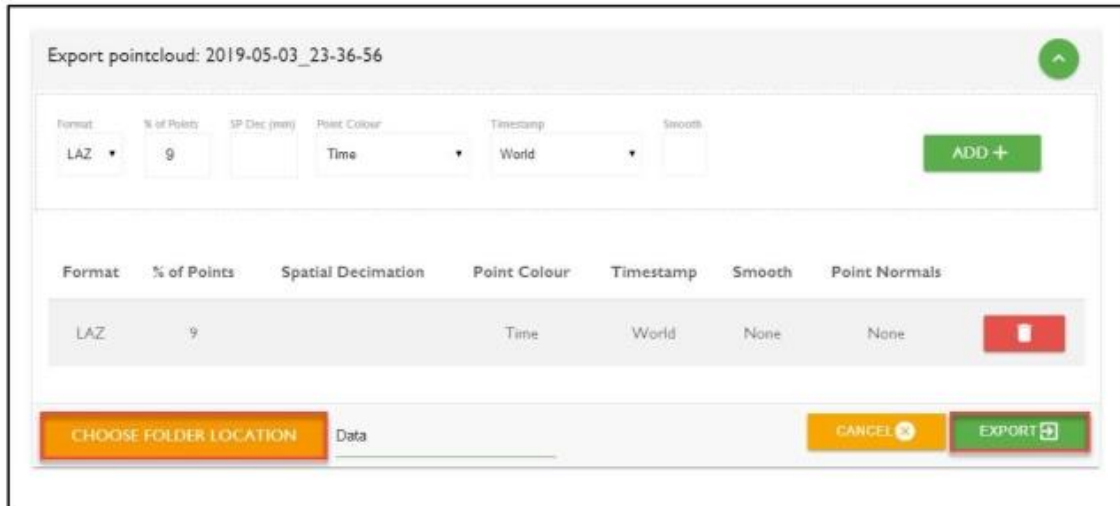
Εικόνα 118: Οθόνη για την επιλογή επανεπεξεργασίας (reprocess).



## 1.5. Εξαγωγή δεδομένων

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία επίλυσης μπορεί να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων τα οποία μπορεί να είναι:

- Νέφος σημείων (μορφή *.E57*, *.las*, *.laz*, *.ply*, *.txt*)
- Πορεία κίνησης κατά τη σάρωση (μορφή *.txt*, *.ply*)
- Τοποσταθερά (reference points *.txt*)



Εικόνα 119: Οθόνη εξαγωγής νέφους σημείων.



Εικόνα 120: Οθόνη εξαγωγής πορείας σάρωσης.



Εικόνα 121: Οθόνη εξαγωγής τοποσταθερών (reference points).

## 2. Παράμετροι επεξεργασίας αλγόριθμου SLAM

### 2.1. Τοπικές παράμετροι (local)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιλογές και οι ιδιότητες των τοπικών παραμέτρων.

#### 2.1.1. Όριο σύγκλισης (Convergence Threshold)

Το όριο σύγκλισης καθορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων που θα κάνει ο αλγόριθμος SLAM για να ταιριάζει τα δεδομένα εντός περιοχής επικάλυψης. Σε σαρώσεις που εμφανίζουν σημεία ολίσθησης (drift), η αύξηση του ορίου σύγκλισης μπορεί να βελτιώσει τα αποτελέσματα. Η τιμή του ορίου σύγκλισης είναι μια κρίσιμη παράμετρος προς τροποποίηση κατά τη διαδικασία επανεπεξεργασίας των δεδομένων και συνήθως τροποποιείται σε συνδυασμό με το μέγεθος παραθύρου (βλέπε επόμενη ενότητα). Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου θα αυξήσει την απαιτούμενη μνήμη (ram) και τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας. **Εύρος τιμής από 0 έως 5 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**

#### 2.1.2. Μέγεθος παραθύρου (window size)

Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου οδηγεί τον αλγόριθμο να λαμβάνει μεγαλύτερα δείγματα δεδομένων για κάθε βήμα επεξεργασίας. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην άρση των ολισθήσεων που συμβαίνουν κατά τη φάση τοπικής καταχώρησης. Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου θα αυξήσει την απαιτούμενη μνήμη (ram) και τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας. **Εύρος τιμής από 0 έως 5 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**

#### 2.1.3. Πυκνότητα voxel (voxel density)

Η πυκνότητα των voxel καθορίζει το μέγεθος των voxels (κύβοι στους οποίους διαιρούνται τα δεδομένα) που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος SLAM. Η αύξηση της πυκνότητας των voxel μειώνει το μέγεθος των voxels. Η αύξηση της πυκνότητας των voxel θα επιτρέψει την ανίχνευση περισσότερων λεπτομερειών σε κοντινή απόσταση και θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διαδικασία επεξεργασίας από τον αλγόριθμο SLAM.

Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου θα αυξήσει την απαιτούμενη μνήμη (ram) και τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας. **Εύρος τιμής από -1 έως +3 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**

#### **2.1.4. Σταθερότητα (Rigidity)**

Η παράμετρος σταθερότητα (Rigidity) ελέγχει την εξισορρόπηση μεταξύ των δεδομένων της IMU (Inertial Measurement Unit - Μονάδα Αδρανειακής Μέτρησης) και του LiDAR (Light Detection and Ranging - Ανίχνευση Φωτός και Εμβέλειας) στον αλγόριθμο επεξεργασίας. Σε περιοχές όπου μπορεί να μην υπάρχουν πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά (π.χ. γύρω από κτήρια, διαδρόμους ή σήραγγες), συνιστάται να αυξηθεί το βάρος των δεδομένων της IMU (αύξηση της τιμής της παραμέτρου Rigidity). Αν τα δεδομένα έχουν ληφθεί καθώς το σύστημα κινείται πολύ γρήγορα, π.χ. κατά τη διάρκεια κίνησης πάνω και κάτω από σκάλες, τότε για να αποφευχθούν οι ανακρίβειες της IMU πρέπει να αυξηθεί το βάρος των δεδομένων του laser (μείωση της παραμέτρου Rigidity). Από προεπιλογή, οι βαρύτητες ορίζονται ισοσταθμισμένες. **Εύρος τιμής από -5 έως +5 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**

#### **2.1.5. Μέγιστη εμβέλεια (maximum range)**

Η τιμή της μέγιστης εμβέλειας καθορίζει την απόσταση, εντός της οποίας θα λαμβάνονται υπόψιν τα δεδομένα σάρωσης που θα χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο SLAM και για την εξαγωγή του νέφους σημείων.

#### **2.1.6. Τροποποίηση πλαισίου (modify bounding box)**

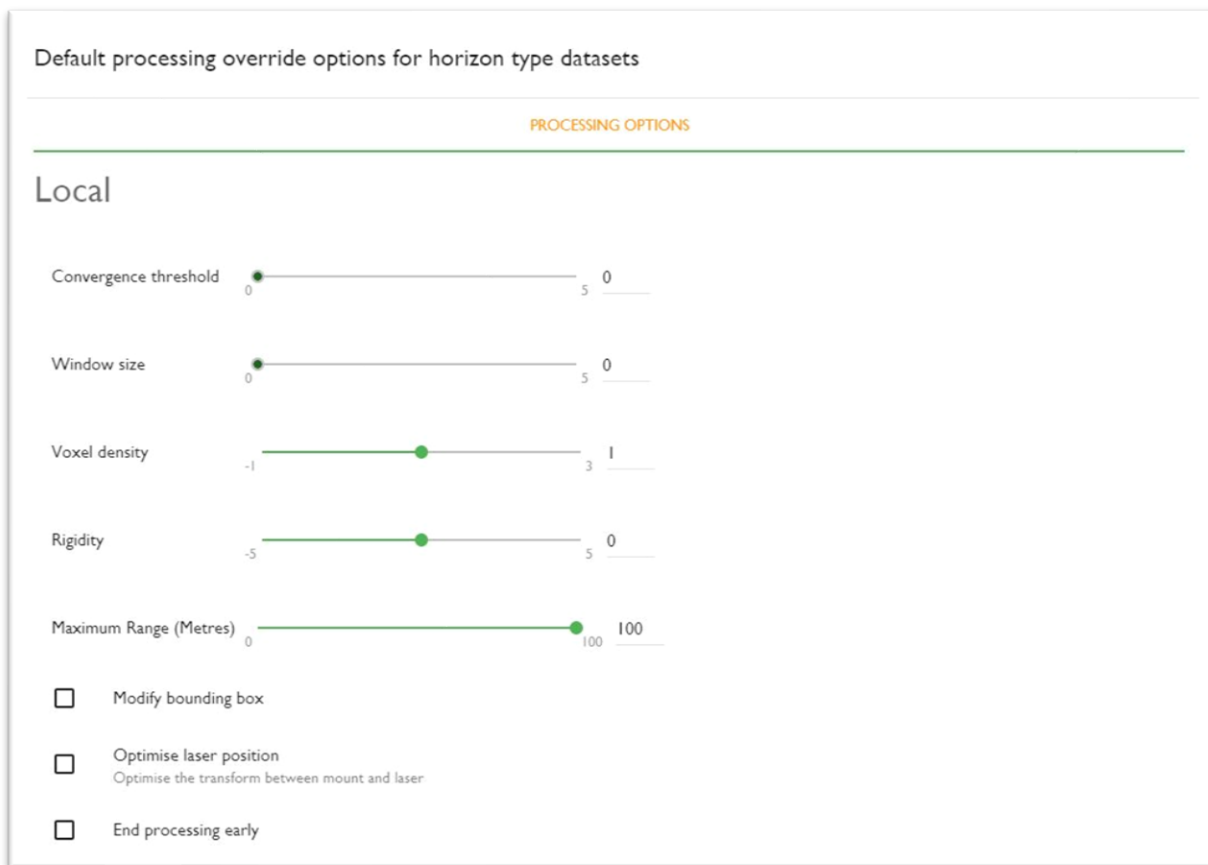
Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει το προεπιλεγμένο μέγεθος του πλαισίου (απόσταση από τον σαρωτή) που χρησιμοποιείται για να αποκλειστεί ο χειριστής (ή μια πλατφόρμα στην οποία είναι τοποθετημένος ο σαρωτής) από τη σάρωση. Ως προεπιλογή, το μέγεθος του πλαισίου έχει ρυθμιστεί ώστε να αποκλείει τον ανθρώπινο χειριστή από τη σάρωση. Όλα τα σημεία μέσα στο πλαίσιο αυτό αγνοούνται. Με αύξηση του μεγέθους του, αποκλείονται περισσότερα σημεία γύρω από τον σαρωτή. Εάν σαρώνονται στενοί χώροι, η μείωση του μεγέθους του πλαισίου θα συμπεριλάβει σημεία σε κοντινότερη απόσταση (σημεία κοντά στον σαρωτή).

#### **2.1.7. Βελτιστοποίηση θέσης σαρωτή (optimize laser position)**

Αυτή η επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε δεδομένα που προέρχονται από τον σαρωτή ZEB HORIZON με τη χρήση κάμερας. Βελτιστοποιεί τον μετασχηματισμό μεταξύ της βάσης της κάμερας και του laser και υπολογίζει την μεταξύ τους απόσταση για να χρησιμοποιηθεί στην ρύθμιση της κάμερας.

#### **2.1.8. Πρόωρος τερματισμός επεξεργασίας (end processing early)**

Αυτή η επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση λαθών στο τέλος της σάρωσης. Οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν τον χρόνο μετά τον οποίο η επεξεργασία θα ολοκληρωθεί και όλα όσα έχουν καταγραφεί μετά από αυτόν τον συγκεκριμένο χρόνο θα αγνοηθούν. Η επιλογή "Έναρξη/Λήξη κλειστού βρόχου" πρέπει να είναι απενεργοποιημένη όταν χρησιμοποιείται αυτή την επιλογή.



Εικόνα 122: Οθόνη ρύθμισης τοπικών παραμέτρων αλγορίθμου (local).

## 2.2. Γενικές παράμετροι (global)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιλογές και οι ιδιότητες των γενικών παραμέτρων.

### 2.2.1. Προτεραιοποίηση Επίπεδων Επιφανειών (prioritise planar surfaces)

Η επιλογή αυτή θα οδηγήσει τον αλγόριθμο να προσπαθήσει να ταυτίσει μόνο πολύ επίπεδες επιφάνειες. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της επεξεργασίας πολύ μεγάλων συνόλων δεδομένων, υποθέτοντας ότι υπάρχουν αρκετές επίπεδες επιφάνειες στα σημεία όπου υπάρχει κλείσιμο βρόχου.

### 2.2.2. Έναρξη/Λήξη κλειστού βρόχου (start/finish closed loop)

Η ρύθμιση αυτή είναι ενεργοποιημένη από προεπιλογή και αναγκάζει τα σημεία έναρξης και λήξης της σάρωσης να συγκλίνουν. Σε περίπτωση που δεν ταυτίζεται το σημεία έναρξης και λήξης της σάρωσης, η επιλογή αυτή θα πρέπει να απενεργοποιείται.

### 2.2.3. Όριο σύγκλισης (Convergence Threshold)

Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου αυξάνει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για κάθε βήμα επεξεργασίας και μειώνει το όριο σύγκλισης. Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου μπορεί να διορθώσει ορισμένα σφάλματα επεξεργασίας (εις βάρος του χρόνου). **Εύρος τιμής από 0 έως 5 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**

#### 2.2.4. Σταθερότητα (Rigidity)

Η αύξηση της τιμής αυτής της παραμέτρου θα κάνει τον αλγόριθμο πιο "αυστηρό" κατά την επεξεργασία και θα επηρεάζεται περισσότερο από τα ακατέργαστα δεδομένα της IMU και λιγότερο από τα δεδομένα των laser σημείων κατά την εκτίμηση της τροχιάς. Η μείωση της τιμής αυτής της παραμέτρου θα έχει το αντίθετο αποτέλεσμα, επηρεάζοντας τον αλγόριθμο περισσότερο τα δεδομένα των laser σημείων παρά τα ακατέργαστα αδρανειακά δεδομένα του IMU. **Εύρος τιμής από -5 έως +5 (προεπιλεγμένη τιμή 0).**



*Εικόνα 123: Οθόνη ρύθμισης γενικών παραμέτρων αλγορίθμου (global).*

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, όλες οι επιλύσεις έγιναν με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του λογισμικού.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Λογισμικό PointCab

## Υπολογιστής Μετασχηματισμού (transform calculator)

Τα βήματα για την ολοκλήρωση της γεωαναφοράς είναι τα ακόλουθα:

1. Εισαγωγή του τρισδιάστατου νέφους σημείων και των τοποσταθερών, όπως αυτά έχουν προκύψει από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων από το λογισμικό GeoSLAM Hub, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.
2. Εισαγωγή των τοποσταθερών με συντεταγμένες του συστήματος αναφοράς στο οποίο θέλουμε να γεωαναφέρουμε το νέφος σημείων.
3. Επιλογή της κατηγορίας του μετασχηματισμού που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Παρέχονται οι ακόλουθες επιλογές :
  - 2D
  - 3D
  - 3D scale
  - 2D Nonlinear
  - 3D Nonlinear

Παρακάτω παρουσιάζεται η οθόνη με τις παραμέτρους του μετασχηματισμού που αντιστοιχούν στο μαθηματικό μοντέλο  $X_r = sRX_c + T$ , όπου:

- $X_r$ : Οι συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς.
- $X_c$ : Οι συντεταγμένες στο τοπικό σύστημα αναφοράς.
- S (scale): Είναι η κλίμακα που εφαρμόστηκε κατά τον μετασχηματισμό.
- T (X,Y,Z): Είναι η μετατόπιση κατά τις τρεις διευθύνσεις.
- R (Omega, Phi, Kappa): Είναι γωνίες στροφής του νέφους κατά τις τρεις διευθύνσεις.

Transformation parameter	Value	Sigma (gravity center)
X:	90.6457	7.8528 [m]
Y:	-175.8598	7.8528 [m]
Z:	-10.9560	7.8528 [m]
Omega:	175.9398	23.9439 [°]
Phi:	-1.3739	25.1072 [°]
Kappa:	151.2395	17.2845 [°]
Scale:	1.0000000	1.000000 [-]
Sigma 0:	14.6912 [-]	
RMS:	30.4138 [m]	

Options  
Transformation: 3D  
Max difference: 1.00 [m]

Model:  $X_r = sRX_c + T$

Εικόνα 124: Οθόνη παραμέτρων αφινικού μετασχηματισμού.

4. Αφού επιλεγεί η κατηγορία του μετασχηματισμού, υπολογίζονται τα σφάλματα (residuals) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μέσω των οποίων ελέγχεται η ακρίβειά του.
5. Τέλος, εφόσον η ακρίβεια που επιτεύχθηκε κριθεί αποδεκτή, ολοκληρώνεται η διαδικασία με την γεωαναφορά του νέφους σημείων στο σύστημα αναφοράς.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, εφαρμόστηκε ο γραμμικός 3D μετασχηματισμός χωρίς τη χρήση κλίμακας.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Επίλυση οδεύσεων

## 1. Κύρια όδευση (εξωτερική)

Παρακάτω παρατίθεται η επίλυση της κύριας (εξωτερική) όδευσης εξαρτημένη από τις κορυφές S0, S1.

\*\*\*\*\*

Κωδ.Σημ.	X(m)	Y(m)	H(m)	Δχ(m)	Δy(m)	ΔH(m)
S0	480686.711	4202687.447	194.221		ΣΤΑΘΕΡΟ	
S1	480575.599	4202724.815	196.046		ΣΤΑΘΕΡΟ	
S2	480546.010	4202743.429	195.969	0.000	0.000	0.000
S3	480531.308	4202749.350	195.821	0.000	0.000	0.000
S4	480502.123	4202765.810	194.910	0.000	0.000	0.000
S5	480459.888	4202792.066	193.111	0.000	0.000	0.000
S6	480438.057	4202832.119	190.543	0.000	0.000	0.000
S7	480473.104	4202847.561	190.882	0.000	0.000	0.000
S8	480515.252	4202832.382	192.379	0.000	0.000	0.000
S9	480555.364	4202820.189	193.296	0.000	0.000	0.000
S10	480601.652	4202800.567	193.440	0.000	0.000	0.000
S11	480639.538	4202789.124	193.997	0.000	0.000	0.000
S12	480632.979	4202770.452	194.411	0.000	0.000	0.000
S13	480598.622	4202764.087	194.915	0.000	0.000	0.000
S14	480596.164	4202746.443	195.344	0.000	0.000	0.000
S1	480575.599	4202724.815	196.046		ΣΤΑΘΕΡΟ	
S0	480686.711	4202687.447	194.221		ΣΤΑΘΕΡΟ	

\*\*\*\*\*

Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = 0.7(c)

Προβλεπόμενο Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = 3.873(c) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά X(m) = -0.0012

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά Y(m) = 0.0008

Γραμμικό Ολικό κλείσιμο Όδευσης W(m) = 0.0014

Προβλεπόμενο Γραμμικό Κλείσιμο Όδευσης = 0.1615(m) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

## 2. 1<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (υπόγειο)

Παρακάτω παρατίθεται η επίλυση της 1<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο υπόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S4, S5, S8, S9.

\*\*\*\*\*

Κωδ.Σημ.	X(m)	Y(m)	H(m)	Δχ(m)	Δy(m)	ΔH(m)
S4	480502.123	4202765.810	194.910			ΣΤΑΘΕΡΟ
S5	480459.888	4202792.066	193.111			ΣΤΑΘΕΡΟ
SY1	480467.230	4202815.450	191.988	0.000	0.000	0.000
SY3	480552.616	4202784.713	191.992	-0.001	0.000	0.000
SY2	480498.585	4202804.932	191.996	0.000	0.000	0.000
S8	480515.252	4202832.382	192.379			ΣΤΑΘΕΡΟ
S9	480555.364	4202820.189	193.296			ΣΤΑΘΕΡΟ

\*\*\*\*\*

Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = -0.32(c)

Προβλεπόμενο Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = 2.2361(c) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά X(m) = -0.0012

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά Y(m) = 0.0009

Γραμμικό Ολικό κλείσιμο Όδευσης W(m) = 0.0015

Προβλεπόμενο Γραμμικό Κλείσιμο Όδευσης = 0.1216(m) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

## 3. 2<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)

Παρακάτω παρατίθεται η επίλυση της 2<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο ισόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S8, S9, S3, S4.

\*\*\*\*\*

Κωδ.Σημ.	X(m)	Y(m)	H(m)	Δχ(m)	Δy(m)	ΔH(m)
S8	480515.252	4202832.382	192.379			ΣΤΑΘΕΡΟ
S9	480555.364	4202820.189	193.296			ΣΤΑΘΕΡΟ
SI3	480547.094	4202803.949	195.211	-0.001	0.000	-0.001
SV2	480542.739	4202789.069	195.278	-0.001	0.000	0.000
SI1	480535.169	4202765.763	196.586	-0.001	0.001	-0.001
S3	480531.308	4202749.350	195.821			ΣΤΑΘΕΡΟ
S4	480502.123	4202765.810	194.910			ΣΤΑΘΕΡΟ

\*\*\*\*\*

Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = -1.13(c)

Προβλεπόμενο Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = 2.2361(c) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά X(m) = -0.0032

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά Y(m) = 0.0018

Γραμμικό Ολικό κλείσιμο Όδευσης W(m) = 0.0037

Προβλεπόμενο Γραμμικό Κλείσιμο Όδευσης = 0.0933(m) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ



#### 4. 3<sup>η</sup> δευτερεύουσα όδευση (ισόγειο)

Παρακάτω παρατίθεται η επίλυση και το σκαρίφημα της 3<sup>ης</sup> δευτερεύουσας όδευσης στο ισόγειο, εξαρτημένη από τις κορυφές S8, S9, S14, S1.

\*\*\*\*\*

Κωδ.Σημ.	X(m)	Y(m)	H(m)	Δχ(m)	Δy(m)	ΔH(m)
----------	------	------	------	-------	-------	-------

S8	480515.252	4202832.382	192.379		ΣΤΑΘΕΡΟ	
S9	480555.364	4202820.189	193.296		ΣΤΑΘΕΡΟ	
SI3	480547.094	4202803.948	195.211	0.000	0.000	-0.001
SV2	480542.739	4202789.068	195.278	0.000	0.000	-0.001
SI2	480559.987	4202788.299	195.276	0.000	0.000	-0.001
SI4	480575.247	4202783.047	195.260	0.000	0.000	-0.001
SI5	480565.988	4202758.196	195.339	0.000	0.000	-0.001
SI6	480582.322	4202751.508	195.327	0.000	0.000	-0.001
S14	480596.164	4202746.443	195.344		ΣΤΑΘΕΡΟ	
S1	480575.599	4202724.815	196.046		ΣΤΑΘΕΡΟ	

\*\*\*\*\*

##### Στατιστικά Στοιχεία

\*\*\*\*\*

Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = -0.45(c)

Προβλεπόμενο Γωνιακό Κλείσιμο Όδευσης = 2.8284(c) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ

-----  
Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά X(m) = -0.002

Γραμμικό κλείσιμο Όδευσης κατά Y(m) = -0.0019

Γραμμικό Ολικό κλείσιμο Όδευσης W(m) = 0.0028

Προβλεπόμενο Γραμμικό Κλείσιμο Όδευσης = 0.1061(m) Από τον κανονισμό 1974

Αποτέλεσμα = ΟΡΘΟ  
-----

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Εξαγωγή σχεδίων

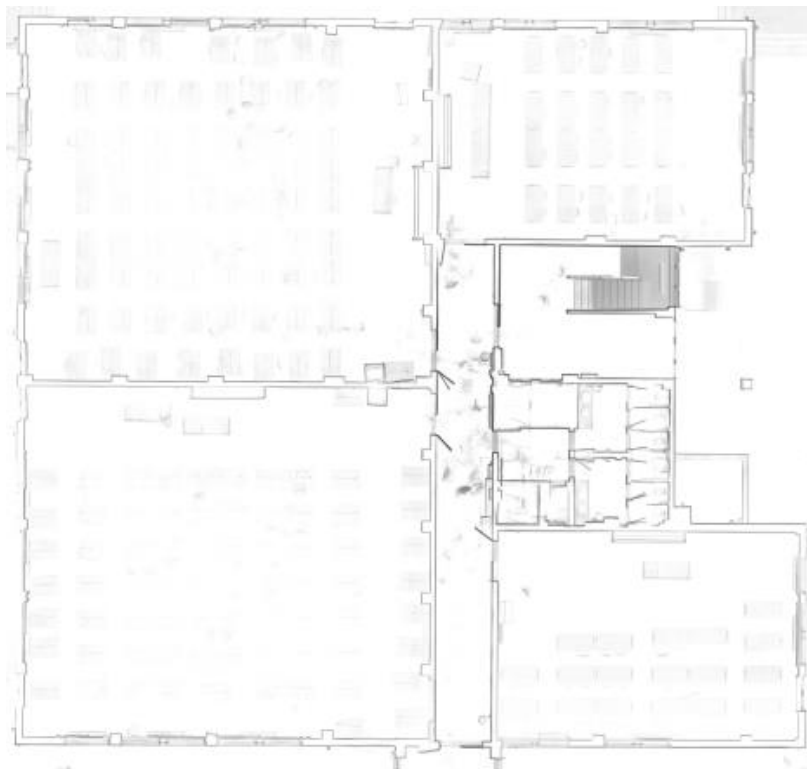
Εξαγωγή σχεδίων κτηρίου Λαμπαδαρίου από το τρισδιάστατο νέφος σημείων

Κατόψεις

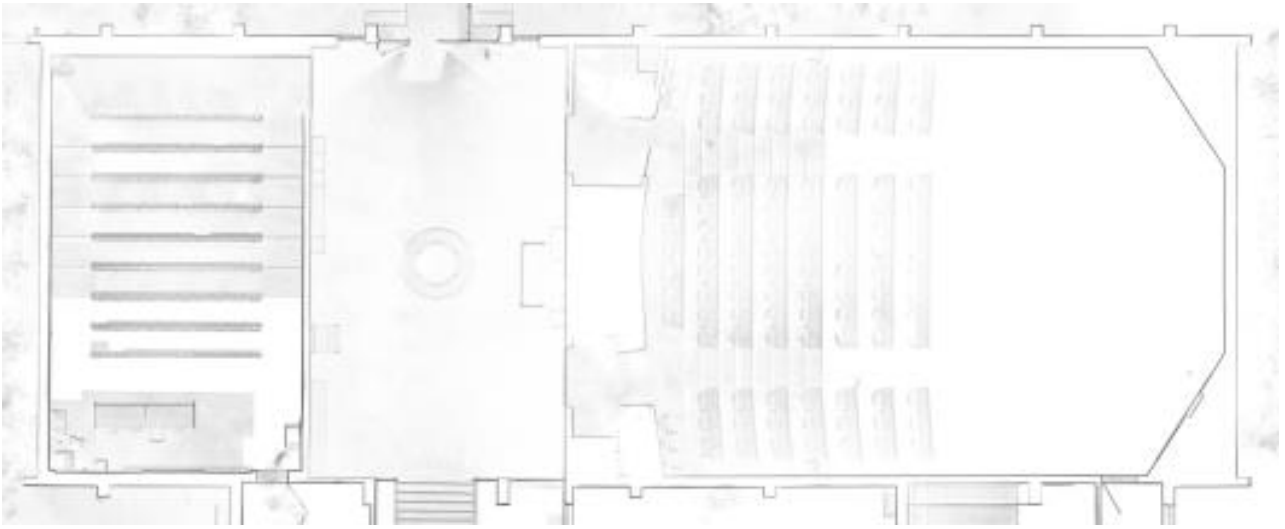
Ισόγειο



Εικόνα 125: Συνολική κάτοψη ισόγειου



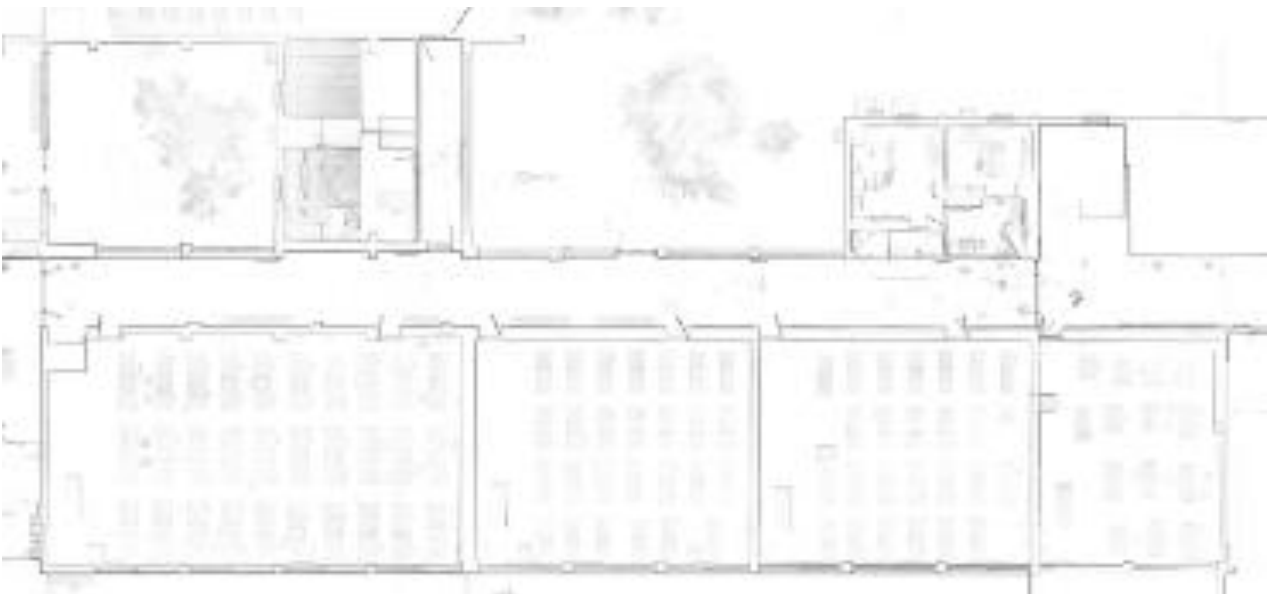
Εικόνα 126: Ισόγειο - Αίθουσες διδασκαλίας και σχεδιαστήρια κτηρίου Α



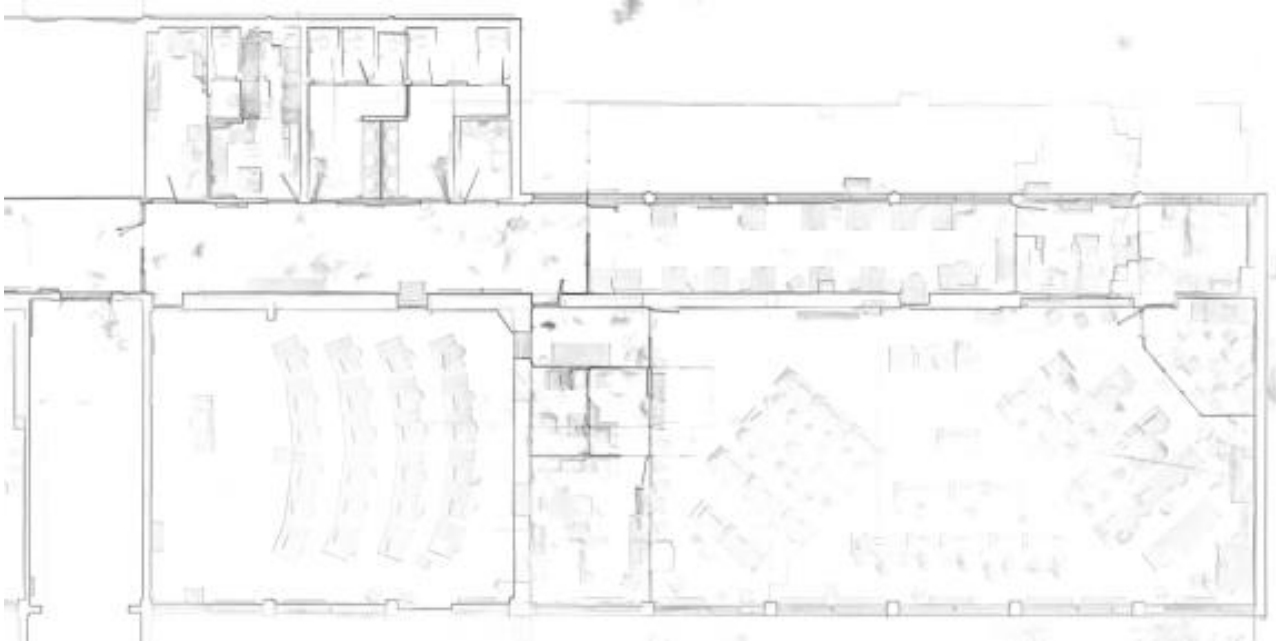
**Εικόνα 127:** Ισόγειο - Μικρό και μεγάλο αμφιθέατρο



**Εικόνα 128:** Ισόγειο - Χώροι γραφείων και εργαστηρίου

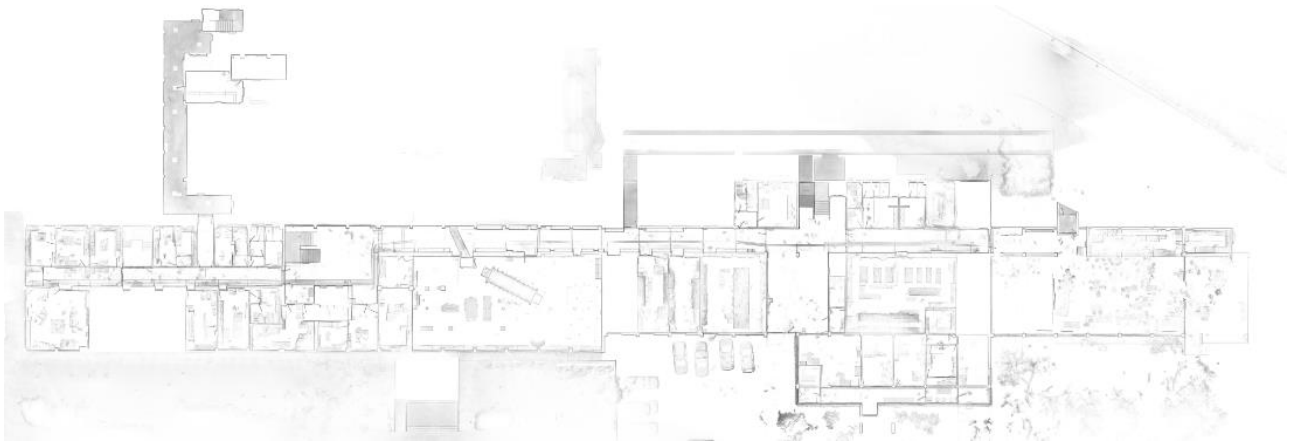


**Εικόνα 129:** Ισόγειο - Αίθουσες διδασκαλίας και αίθριο

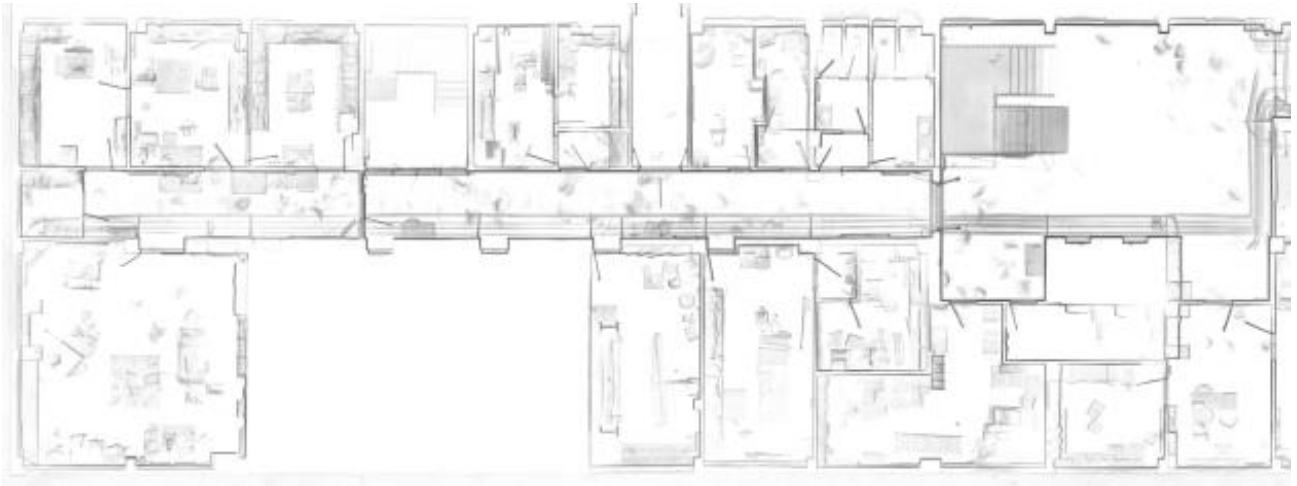


*Εικόνα 130: Ισόγειο - Αίθουσα διδασκαλίας μεταπτυχιακών και εργαστήριο γεωπληροφορικής*

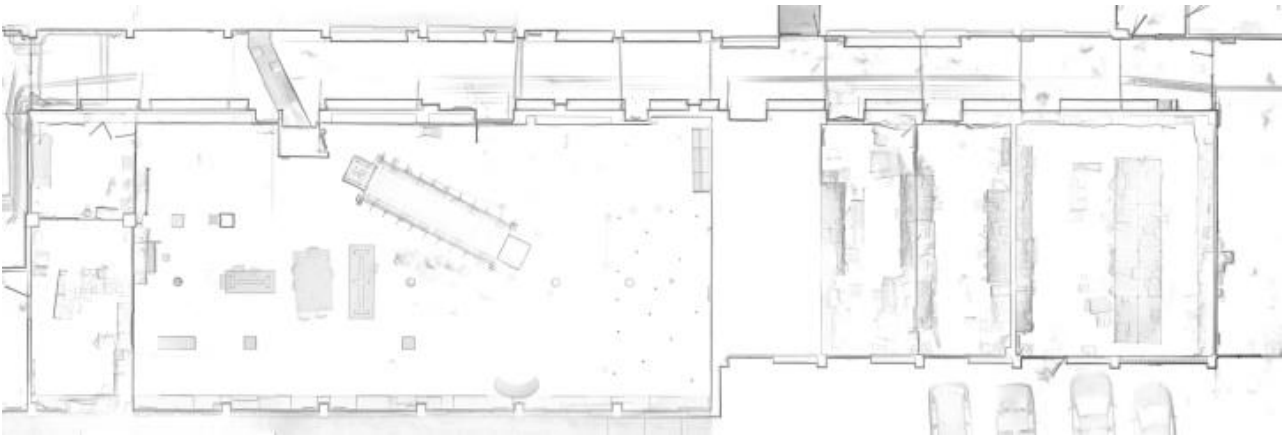
## Υπόγειο



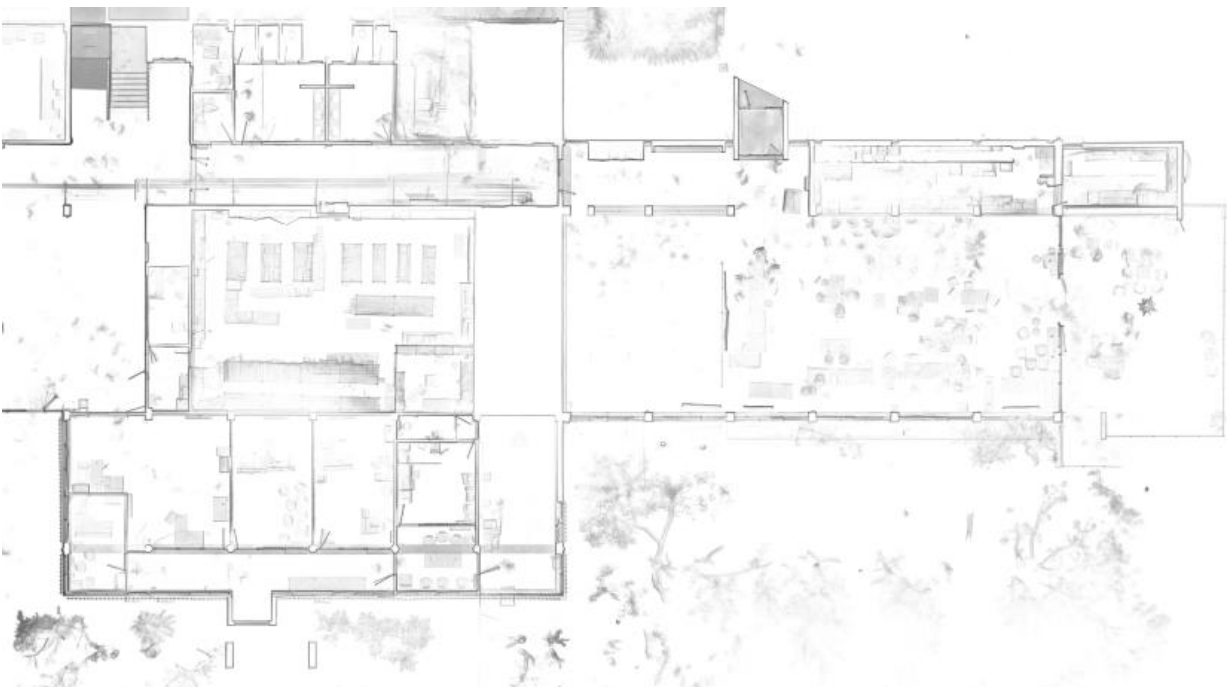
*Εικόνα 131: Συνολική κάτοψη υπογείου*



*Εικόνα 132: Υπόγειο - Χώροι πολλαπλών χρήσεων (σιδηρουργείο, ξυλουργείο, μηχανουργείο, αποθήκες, κ.τ.λ.)*

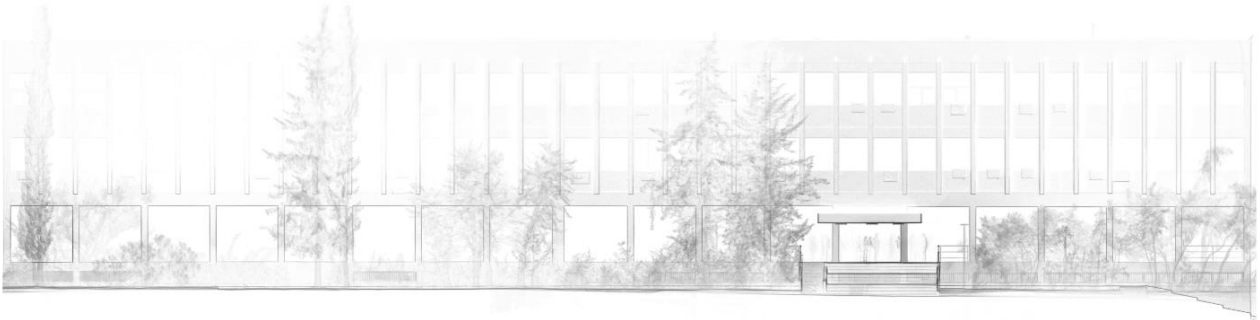


*Εικόνα 133: Υπόγειο – Αίθουσα επίδειξης οργάνων και αποθήκες*



*Εικόνα 134: Υπόγειο – Αποθήκη οργάνων γεωδαισίας, υπολογιστικό κέντρο, κυλικίο, Η/Μ χώροι*

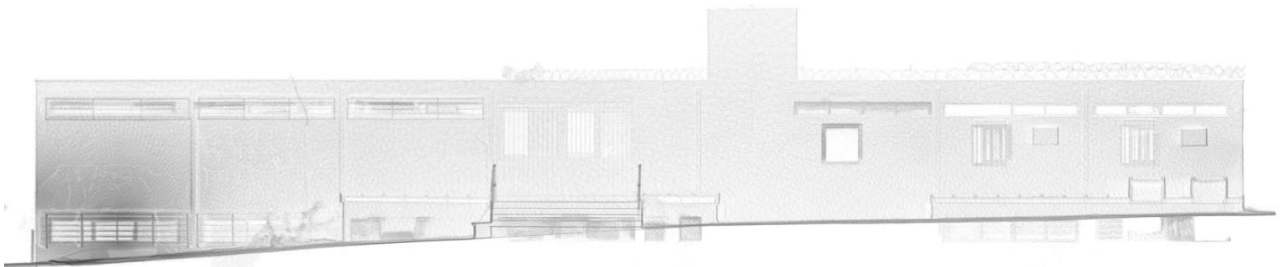
## Όψεις



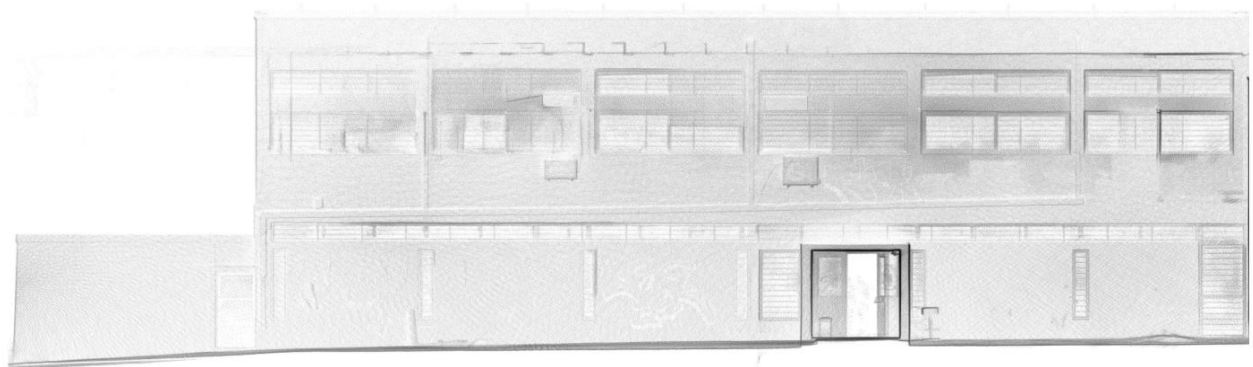
*Εικόνα 135: Κύρια όψη*



*Εικόνα 136: Τμήμα Βόρειας όψης (κυλκείο)*



*Εικόνα 137: Τμήμα Νότιας όψης (είσοδος)*

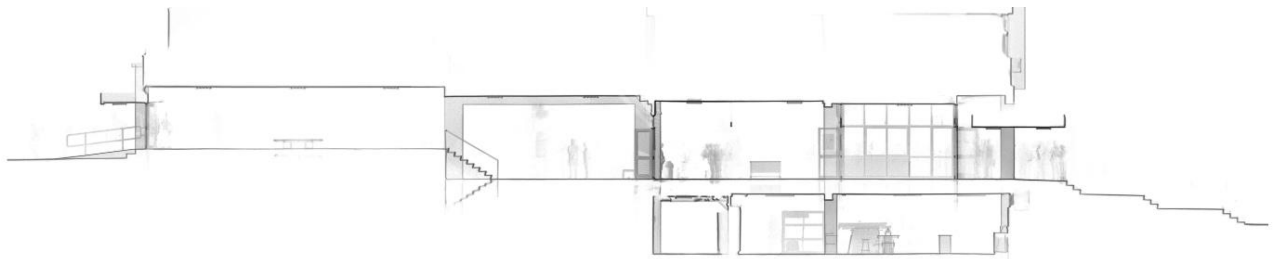


*Εικόνα 138: Τμήμα Νότιας όψης (εξωτερική είσοδος κυλκείου)*

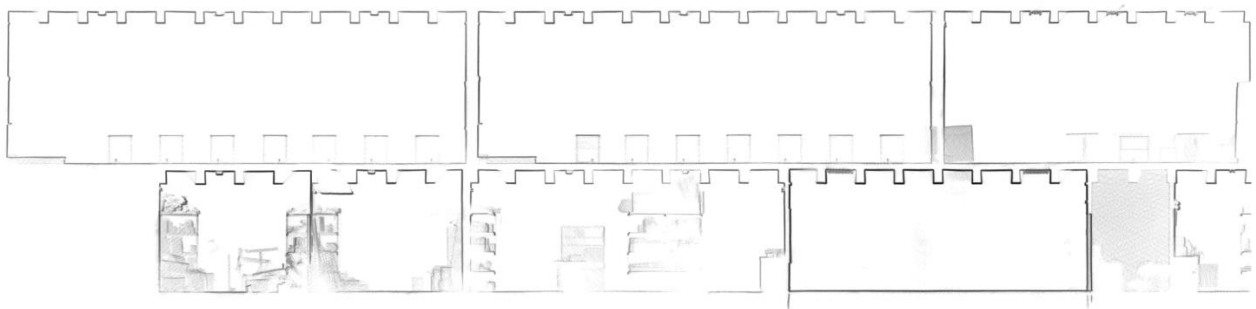
## Τομές



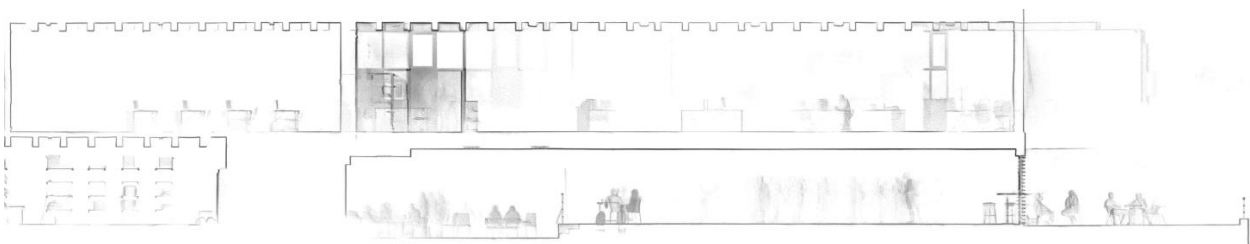
*Εικόνα 139: Συνολική διαμήκης τομή*



*Εικόνα 140: Συνολική εγκάρσια τομή*

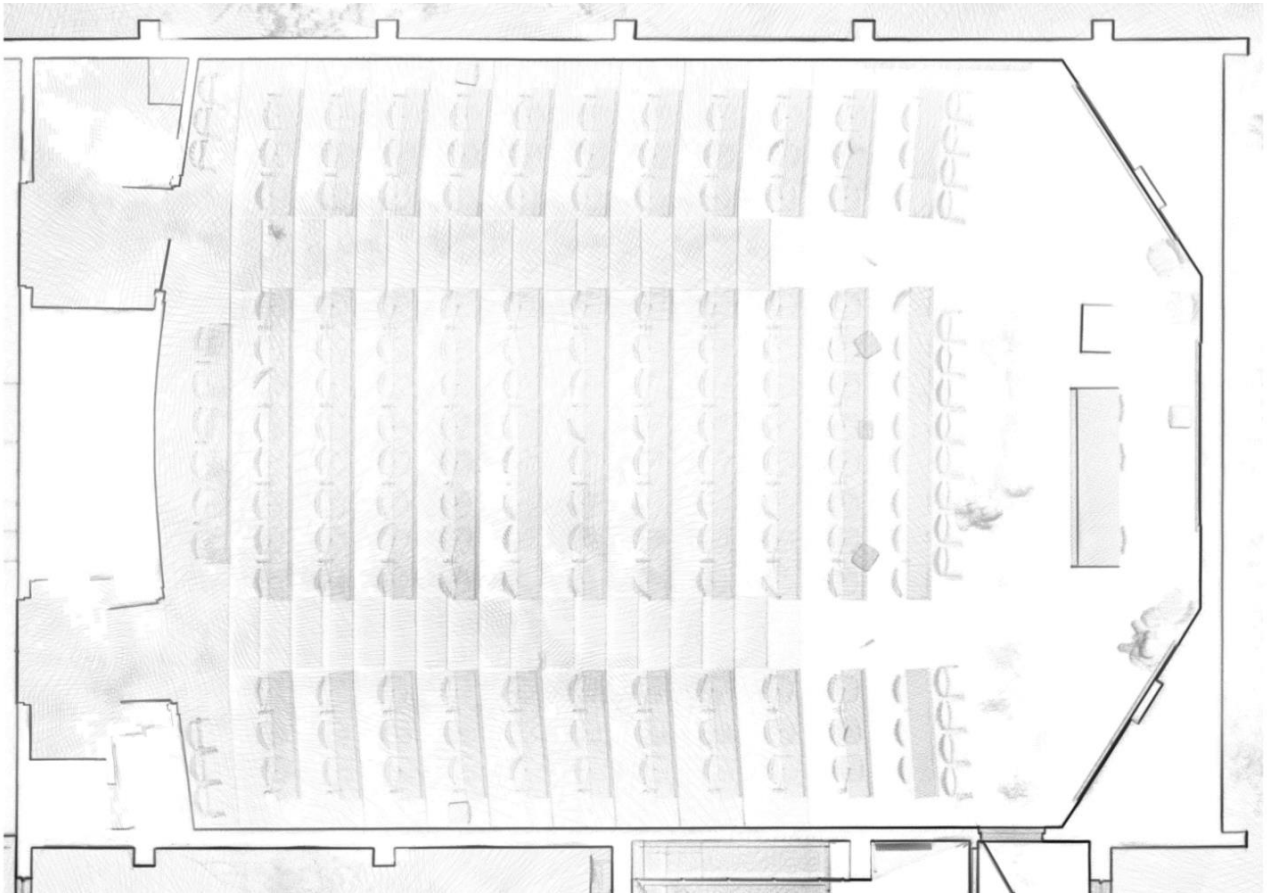


*Εικόνα 141: Τομή για αποτύπωση ξυλοτύπου (δοκαριών)*



*Εικόνα 142: Τομή για αποτύπωση ξυλοτύπου (δοκαριών)*

## Μεγάλο αμφιθέατρο

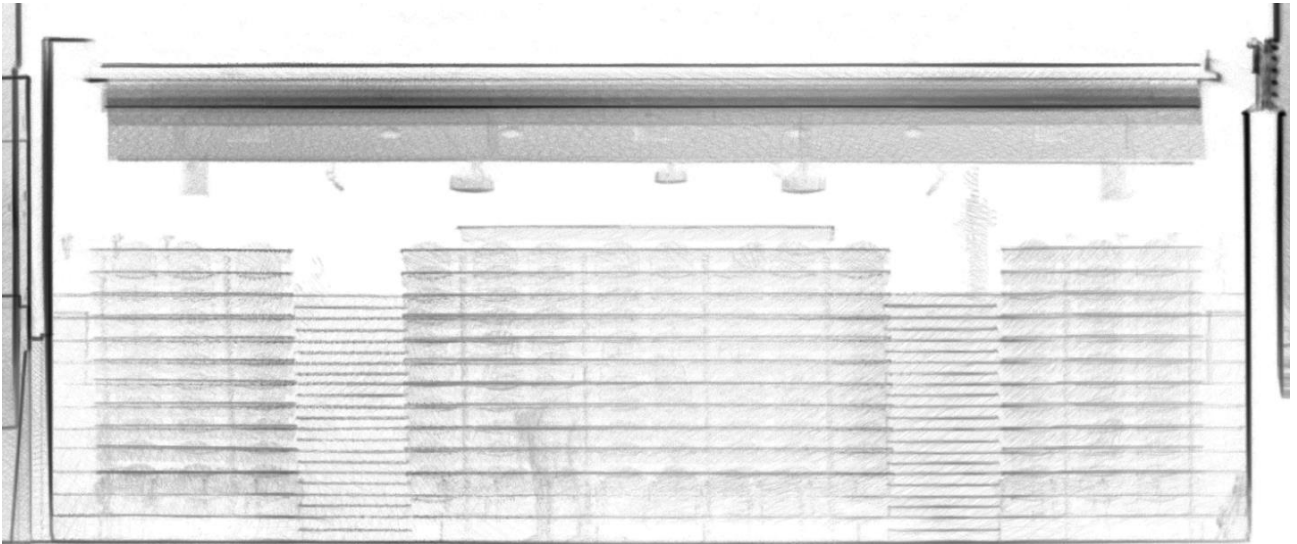


*Εικόνα 143: Μεγάλο αμφιθέατρο - Κάτοψη*



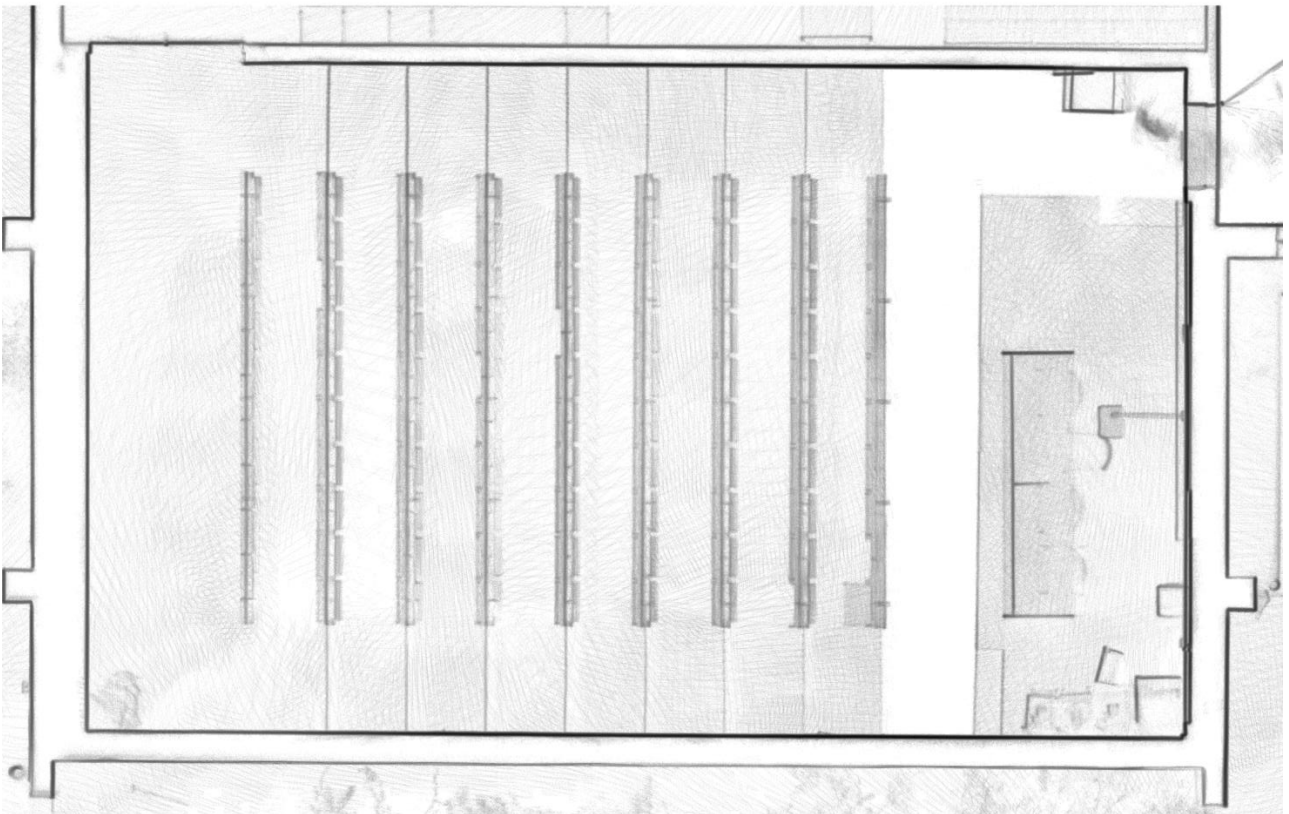
*Εικόνα 144: Μεγάλο Αμφιθέατρο - Διαμήκης τομή*



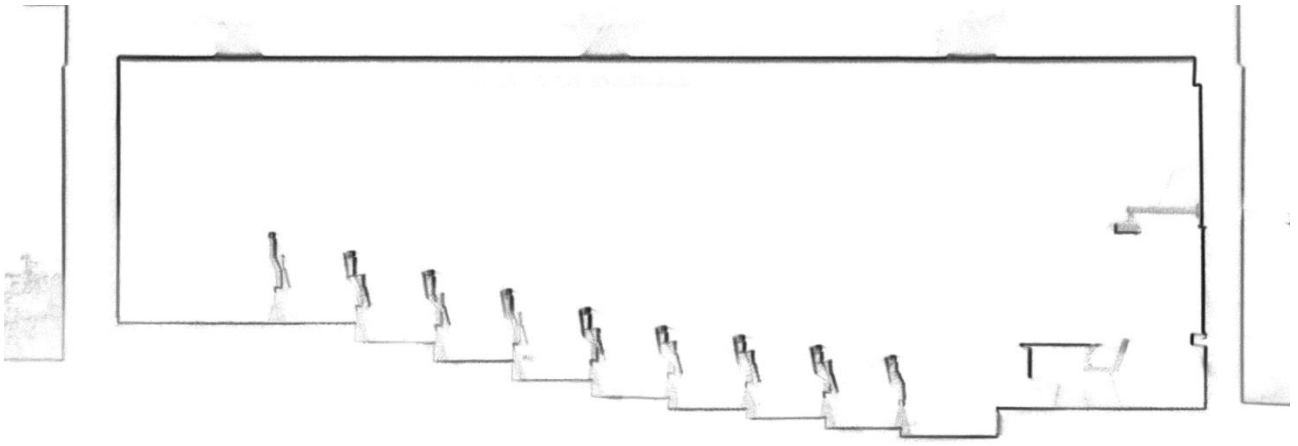


*Εικόνα 145: Μεγάλο Αμφιθέατρο – Εγκάρσια τομή*

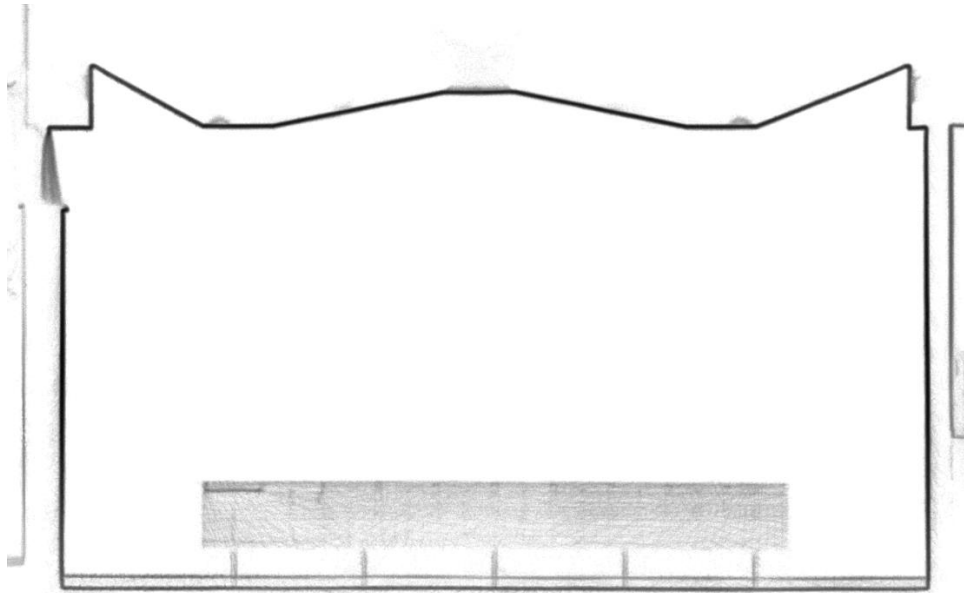
## Μικρό αμφιθέατρο



*Εικόνα 146: Μικρό αμφιθέατρο - Κάτοψη*



*Εικόνα 147: Μικρό Αμφιθέατρο – Διαμήκης τομή*



*Εικόνα 148: Μικρό Αμφιθέατρο – Εγκάρσια τομή*