



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών**  
**Τομέας Τοπογραφίας**  
**Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας**

**ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LASER ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ  
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ  
ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία

**Αλεξαντωνάκης Παύλος**

Επιβλέπουσα: Μ.Τσακίρη

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Μαρία Τσακίρη, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, για την καθοδήγησή της και για τη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα.

Από πλευράς ΗΣΑΠ θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς κ. Γιώργο Σκούρα, κ. Μπάμπη Ζήση και κα Μαρκέλλα Πατεράκη, για τα στοιχεία που μου παρείχαν, τις συμβουλές τους και τον χρόνο που μου διέθεταν με μεγάλη ευχαρίστηση, όποτε αυτό χρειαζόταν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρέχει όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και για την πρακτική βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες και στην κα Αναστασία Ράπτη για την προθυμία που έχει πάντα να με βοηθήσει σε ό,τι χρειαστώ.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους μου, συμφοιτητές και μη, για την υποστήριξη που μου παρέχουν, ο καθένας με τον τρόπο του.

Για το Χαρούμενο Χωριό.

## Περίληψη

Ατυχήματα που συμβαίνουν σε σιδηροδρόμους πολλές φορές οφείλονται σε συγκρούσεις συρμών με εμπόδια. Για τη μελέτη των ατυχημάτων αυτών είναι απαραίτητη η ύπαρξη μετρητικής πληροφορίας που να αφορά τις παραμορφώσεις των οχημάτων, ώστε να διερευνηθούν οι αιτίες του ατυχήματος, η αποκατάσταση των φθορών αλλά και η υποδομή δημιουργίας ασφαλέστερων οχημάτων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι ο έλεγχος χρήσης της επίγειας laser σάρωσης για τέτοιου είδους εργασίες. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζεται μέσα από την εφαρμογή αποτύπωσης των παραμορφώσεων που υπέστη σιδηροδρομικό όχημα του ΗΣΑΠ μετά από σύγκρουση. Η μέθοδος οδήγησε σε γρήγορη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων τα οποία επεξεργάστηκαν σε κατάλληλα προγράμματα και το τελικό παράγωγο ήταν το λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο του βαγονιού.

Στο μοντέλο δημιουργήθηκαν διάφορες τομές σε κατάλληλα σημεία, πάνω στις οποίες μετρήθηκαν αποστάσεις. Τα αποτελέσματα στη συνέχεια συγκρίθηκαν με την αρχική σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ (μετά το ατύχημα), ώστε να διερευνηθεί η καταλληλότητα της μεθόδου και η ακρίβεια του μοντέλου. Επίσης, έγινε τρισδιάστατη σύγκριση ανάμεσα στο μοντέλο της laser σάρωσης και ενός «πρότυπου μοντέλου» που δημιουργήθηκε από τις διαθέσιμες διαστάσεις (πριν το ατύχημα), για την διερεύνηση των παραμορφώσεων του οχήματος.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, οι μετρήσεις στο μοντέλο παρουσίασαν μικρή απόκλιση συγκριτικά με την αρχική σειρά μετρήσεων, γεγονός που δείχνει την ικανοποιητική ακρίβεια που αυτό παρέχει. Συμπερασματικά, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για αποτυπώσεις ατυχημάτων παρέχοντας, σε σύντομο χρόνο, άμεση τρισδιάστατη πληροφορία .

## **Abstract**

Railway accidents are often caused due to collision of the train with obstacles. In order to investigate such accidents, it is necessary for someone to have metric information related to the wagon deformation, so that the causes of the accident can be explored as well as the restoration of the damage along with improving train safety.

The purpose of this project is the use of terrestrial laser scanning for such cases. This specific method is presented through the imprintation of the deformation of a railway wagon of HSAP after an accident. This method has led to a fast collection of a huge amount of data that were processed with suitable software and the final result was the detailed 3D model of the wagon.

Different sections were made on the model at specific spots, in order to be used to count distances. The results were afterwards compared with the initial measured values of HSAP (after the accident) so that the accuracy of the method and the precision of the model could be determined. Besides, a 3D comparison took place between the laser scanning model and an original model created by the available dimensions of the wagon (before the accident), so that the deformation of the vehicle could be investigated.

The final result evaluation showed that the measures on the model appeared to have small deviations compared to the first measures and this leads to the conclusion that the precision of the method is satisfactory. In conclusion, this method can be used for accident investigations to provide fast and direct 3D information.

# Περιεχόμενα

## Περίληψη

## Abstract

<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Αποτύπωση ατυχημάτων.....	1
1.2 Ατυχήματα σε σιδηροδρόμους.....	2
1.3 Σκοπός της εργασίας.....	2
1.4 Δομή της εργασίας.....	3
<b>Κεφάλαιο 2 : Μεθοδολογία.....</b>	<b>5</b>
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Γεωδαιτικές μέθοδοι.....	5
2.2.1 Εμπειρική μέθοδος.....	5
2.2.2 Συμβατικές τοπογραφικές μέθοδοι.....	6
2.2.3 Φωτογραμμετρική μέθοδος.....	6
2.2.4 Βιομηχανική Γεωδαισία.....	7
2.2.5 Παραδείγματα χρήσης των μεθόδων.....	8
2.3 Άλλες τεχνικές.....	12
2.4 Επίγειος σαρωτής Laser.....	13
2.4.1 Time of flight.....	14
2.4.2 Phase based.....	15
2.4.3 Μέθοδος τριγωνισμού.....	16
2.4.4 Ακρίβεια σάρωσης.....	16
2.4.5 Παραδείγματα χρήσης laser scanner.....	17
2.4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επίγειας laser σάρωσης.....	21
<b>Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογή αποτύπωσης.....</b>	<b>22</b>
3.1 Εισαγωγή.....	22
3.2 Ιστορικό του ατυχήματος.....	22
3.3 Το αντικείμενο αποτύπωσης.....	24

3.4 Ο επίγειος σαρωτής Leica Scanstation 2.....	28
3.5 Σχεδιασμός εργασιών πεδίου.....	30
3.6 Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων.....	33
<b>Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία δεδομένων.....</b>	<b>37</b>
4.1 Εισαγωγή.....	37
4.2 Συνένωση των νεφών.....	37
4.3 Καθαρισμός θορύβου στο Cyclone.....	43
4.4 Εισαγωγή του νέφους στο Geomagic.....	44
4.5 Βελτιστοποίηση νέφους και αφαίρεση θορύβου.....	44
4.6 Διαδικασία μοντελοποίησης.....	50
4.7 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη μοντελοποίηση.....	57
<b>Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα – Συγκρίσεις.....</b>	<b>60</b>
5.1 Εισαγωγή.....	60
5.2 Εξαγωγή τομών.....	60
5.3 Τρισδιάστατη σύγκριση.....	66
<b>Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>77</b>
6.1 Εισαγωγή.....	77
6.2 Συμπεράσματα.....	77
6.2.1 Συλλογή δεδομένων.....	77
6.2.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	78
6.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....	79
6.4 Προτάσεις.....	81

## **Βιβλιογραφία**

**Παράρτημα Α :** Σειρά μετρήσεων ΗΣΑΠ (μετά το ατύχημα)

**Παράρτημα Β :** Σχέδια βαγονιού

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Ακρίβειες και εύρος χρήσης για κάθε αρχή λειτουργίας σάρωσης..	14
Πίνακας 3.1 : Γενικά στοιχεία των οχημάτων 11 <sup>ης</sup> παραλαβής του ΗΣΑΠ.....	25
Πίνακας 3.2 : Κύρια χαρακτηριστικά σαρωτή Leica Scanstation 2.....	29
Πίνακας 4.1 : Οι κοινοί στόχοι των θέσεων σάρωσης.....	39
Πίνακας 4.2 : Τα σφάλματα κάθε στόχου στη συνένωση των νεφών.....	41
Πίνακας 5.1 : Σύγκριση των δύο σειρών μετρήσεων.....	65
Πίνακας 5.2 : Μετρήσεις στο μπροστά τμήμα.....	75

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Η αρχή λειτουργίας time of flight.....	15
Σχήμα 2.2 : Η αρχή λειτουργίας phase based.....	15
Σχήμα 2.3 : Η αρχή λειτουργίας του τριγωνισμού.....	16
Σχήμα 3.1 : Σχεδιάγραμμα της κίνησης του συρμού που προκάλεσε το ατύχημα στο αμαξοστάσιο του Πειραιά.....	23
Σχήμα 3.2 : Το αμαξοστάσιο δίπλα στον σταθμό του Θησείου.....	30
Σχήμα 3.3 : Σκαρίφημα θέσεων σάρωσης και οπτικού τους πεδίου.....	31

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 : Ενδεικτικά αποτελέσματα των αποκλίσεων που προέκυψαν από τη σύγκριση των μεθόδων.....	10
Διάγραμμα 5.1 : Δισδιάστατη απεικόνιση των αποκλίσεων.....	73

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 : Χρήση φωτογραμμετρικών στόχων σε αποτύπωση ατυχήματος.....	7
Εικόνα 2.2 : Μέθοδος εμπροσθοτομίας με χρήση συστήματος έξι θεοδολίχων....	8
Εικόνα 2.3 : Τα οχήματα που μετρήθηκαν με τις τρεις μεθοδολογίες.....	9
Εικόνα 2.4 : Συγκριτικά αποτελέσματα πριν και μετά το ατύχημα με χρήση φωτογραμμετρικών τεχνικών.....	11
Εικόνα 2.5 : Καλίμπρα ελέγχου του πλαισίου μοτοσυκλέτας.....	12



Εικόνα 2.6 : Νέφος σημείων αυτοκινήτου που έχει υποστεί ζημιά.....	17
Εικόνα 2.7 : Νέφος σημείων κατεστραμμένου αυτοκινήτου.....	18
Εικόνα 2.8 : Αναπαράσταση του εκτροχιασμού βαγονιού.....	18
Εικόνα 2.9 : Η καμπίνα κατεστραμμένου αεροσκάφους (2.9.α) και το νέφος σημείων της (2.9.β).....	19
Εικόνα 2.10 : Το εκτροχιασμένο βυτιοφόρο βαγόκι (2.10.α), η μοντελοποιημένη επιφάνειά του (2.10.β) και η χρωματική ανάλυση των φθωρών του (2.10.γ).....	20
Εικόνα 3.1 : Η σειρά των οχημάτων του συρμού που έλαβε μέρος στο ατύχημα..	25
Εικόνα 3.2 : Το σκηνικό του ατυχήματος (3.2.α,β,γ) και το προς μελέτη βαγόκι (3.2.δ,ε).....	27
Εικόνα 3.3 : Ο επίγειος σαρωτής Leica Scanstation 2.....	28
Εικόνα 3.4 : Τετραγωνικός, επίπεδος στόχος 3"χ3" (αριστερά) και κυκλικός, επίπεδος στόχος 6" (δεξιά).....	30
Εικόνα 3.5 : Σάρωση βαγονιού από την οροφή κτιρίου.....	31
Εικόνα 3.6 : Το βαγόκι πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την τοποθέτηση χαρτιού και κόντρα πλακέ.....	32
Εικόνα 3.7 : Διαδικασία σάρωσης του βαγονιού.....	33
Εικόνα 3.8 : Λεπτομερής σάρωση του στόχου 24 και προσδιορισμός του κέντρου από το Cyclone.....	34
Εικόνα 3.9 : Τα παράγωγα νέφη σημείων από τις τέσσερις θέσεις σάρωσης.....	36
Εικόνα 4.1 : Το παράθυρο της συνένωσης στο λογισμικό Cyclone.....	40
Εικόνα 4.2 : Χονδροειδές σφάλμα στο στάδιο της αναγνώρισης και σάρωσης των στόχων, κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.....	42
Εικόνα 4.3 : Η επιλογή View interim Results του λογισμικού Cyclone κατά τη διαδικασία της συνένωσης.....	42
Εικόνα 4.4 : Το νέφος σημείων πριν (4.14 α) και μετά (4.14 β) τον καθαρισμό στο Cyclone.....	43
Εικόνα 4.5 : Ελλιπή δεδομένα στο σασί του βαγονιού τα οποία διαγράφηκαν....	45
Εικόνα 4.6 : Αποτύπωμα της ακτίνας laser ανάλογα με τη γωνία σάρωσης.....	46
Εικόνα 4.7 : Επιλεγμένα ως θόρυβος σημεία από το εργαλείο "select outliers" ...	47
Εικόνα 4.8 : Αναφορά για τη μετακίνηση των σημείων με σκοπό την απαλοιφή του θορύβου.....	49
Εικόνα 4.9 : Παράδειγμα λάθος προσανατολισμένων τριγώνων.....	50
Εικόνα 4.10 : Παραδείγματα επικαλυπτόμενων τριγώνων.....	51

Εικόνα 4.11 : Το μπροστινό τμήμα πριν και μετά τη συμπλήρωση των κενών.....	52
Εικόνα 4.12 : Το ανάγλυφο της μοντελοποιημένης επιφάνειας λόγω του χαρτιού και του διαφανούς πλαστικού που υπήρχε στα τζάμια.....	52
Εικόνα 4.13 : Η μοντελοποιημένη επιφάνεια πριν (4.13.α) και μετά (4.13.β) την εφαρμογή της μείωσης των τριγώνων.....	53
Εικόνα 4.14 : Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο του βαγονιού.....	56
Εικόνα 4.15 : Τα κενά στο νέφος σημείων της οροφής (άνω) και η αρχική μοντελοποιημένη επιφάνεια που δημιουργήθηκε από αυτά (κάτω)...	57
Εικόνα 4.16 : Το νέφος σημείων σε περιοχή με μαύρο περίγραμμα στο γκράφιτι (αριστερά), και η μοντελοποιημένη επιφάνεια που προέκυψε από αυτό (δεξιά).....	58
Εικόνα 4.17 : Εφαρμογή του εργαλείου sculpt σε προβληματικές περιοχές με ανάγλυφο, η οποία όμως δεν απέδωσε αποδεκτά αποτελέσματα.....	59
Εικόνα 5.1 : Τα επίπεδα συμμετρίας στο σύστημα αναφοράς του βαγονιού.....	61
Εικόνα 5.2 : Η παράλληλη μετακίνηση του επιπέδου συμμετρίας για την εξαγωγή των διατομών στα επιθυμητά σημεία.....	62
Εικόνα 5.3 : Οι δέκα διατομές και η μηκοτομή που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.....	63
Εικόνα 5.4 : Τα σημεία των διατομών στα οποία έγιναν οι μετρήσεις.....	
Εικόνα 5.5 : Η σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ στις διατομές του βαγονιού.....	64
Εικόνα 5.6 Η εισαγωγή του σχεδίου του autocad στο Geomagic, ώστε να γίνει η σύγκριση με το μοντέλο της σάρωσης.....	67
Εικόνα 5.7 : Τα ομόλογα σημεία στη διαδικασία ταύτισης των δύο μοντέλων.....	68
Εικόνα 5.8 : Δοκιμή του εργαλείου “3d compare” για μέγιστη τιμή απόκλισης 14cm.....	70
Εικόνα 5.9 Το αποτέλεσμα του εργαλείου “3d compare”.....	71
Εικόνα 5.10 : Θέσεις τομών για τη δισδιάστατη αναπαράσταση αποκλίσεων.....	72
Εικόνα 5.11 : Οι τομές στο μπροστά τμήμα και τα σημεία στα οποία έγιναν οι έξι μετρήσεις (τρία πλάτη και τρία μήκη).....	74



# Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

## 1.1 Αποτυπώσεις ατυχημάτων

Μία από τις εφαρμογές της επιστήμης της τοπογραφίας είναι η αποτύπωση ατυχήματος, είτε αυτό λαμβάνει χώρα σε οδικό δίκτυο, είτε σε συστήματα μέσω σταθερής τροχιάς (τρένο, μετρό, τραμ), είτε αφορά πλοία και αεροσκάφη. Η αποτύπωση ατυχημάτων είναι ένα σημαντικό ζήτημα, αφού, πέραν του πρακτικού μέρους της επιδιόρθωσης των υλικών φθορών, μπορεί να βοηθήσει στην ανάλυση των αιτιών που οδήγησαν στο ατύχημα, στον υπολογισμό των ταχυτήτων των οχημάτων και εν συνεχεία στη βελτίωση των υποδομών για τον περιορισμό αντίστοιχων συμβάντων.

Η έννοια της αποτύπωσης του ατυχήματος είναι διστυπώτατη.

1. Μπορεί να αναφέρεται στην επί τόπου καταγραφή του σκηνικού του ατυχήματος κατά την οποία θα πρέπει να αποτυπώνονται εκτός από τα οχήματα τα οποία έλαβαν μέρος, η θέση τους, ο περιβάλλον χώρος, σημάδια από ελαστικά και αυλακώσεις στο οδόστρωμα ή και αποκολλημένα εξαρτήματα. Τέτοιου είδους μελέτη οδηγεί στην εξαγωγή πορισμάτων για την ευθύνη του ατυχήματος, το πώς προκλήθηκε, τις ταχύτητες των οχημάτων, και κατ' επέκταση και στα μέτρα πρόληψης και το σχεδιασμό για μελλοντική αποφυγή παρόμοιων καταστάσεων. Η συγκεκριμένη διαδικασία οφείλει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ώστε να τίθεται άμεσα σε κυκλοφορία και πάλι ο δρόμος ή το δίκτυο σταθερής τροχιάς.
2. Επίσης, μπορεί να αναφέρεται στη μετέπειτα λεπτομερή αποτύπωση της ζημιάς που έχει υποστεί κάθε όχημα. Αυτό συμβαίνει μετά τη μεταφορά των οχημάτων από τον τόπο του ατυχήματος σε ειδικό χώρο επισκευής. Οι μετρήσεις απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και θα οδηγήσουν σε συμπεράσματα για το αν το όχημα είναι επισκευάσιμο, τι είδους επισκευή χρειάζεται και κατά πόσο αυτή είναι συμφέρουσα. Επίσης μπορεί με εξειδικευμένα προγράμματα να υπολογιστεί η ταχύτητα των οχημάτων πριν το ατύχημα.

## 1.2 Ατυχήματα σε σιδηροδρόμους

Τα σιδηροδρομικά ατυχήματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ( Xiangdong, 2005).

- Ατύχημα μεταξύ δύο συρμών, δηλαδή σύγκρουσή τους.
- Ατύχημα μεταξύ συρμού και εμπόδιου. Ένα τέτοιο εμπόδιο θα μπορούσε να είναι κάποιο διερχόμενο αυτοκίνητο σε διασταύρωση του οδικού δικτύου με τη σιδηροτροχιά.
- Ατύχημα στο οποίο λαμβάνει μέρος μόνο ένας συρμός, ο οποίος για κάποιο λόγο εκτροχιάζεται.

Σύμφωνα με τον Xiangdong (2005), στατιστική έρευνα έδειξε πως το 35% των σιδηροδρομικών ατυχημάτων για την περίοδο 1964-2001/02 και το 36% κατά την τελευταία δεκαετία εντάσσεται στη δεύτερη κατηγορία, αυτή δηλαδή της σύγκρουσης με εμπόδιο. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των ατυχημάτων λαμβάνει χώρα σε διασταυρώσεις. Κάθε χρόνο συμβαίνουν κατά μέσο όρο 19.4 συγκρούσεις συρμών με οχήματα δρόμου οι οποίες επιφέρουν 3.2 θανάτους, επίσης ανά έτος.

Βέβαια, σε περιπτώσεις σιδηροδρόμων μετρό (υπέργειο και υπόγειο) τα ποσοστά συγκρούσεων συρμού με εμπόδιο είναι σημαντικά μικρότερα λόγω της μη ύπαρξης διασταυρώσεων με οδικό δίκτυο.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση του ΗΣΑΠ, από τα διαθέσιμα στοιχεία τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχουν συμβεί πέντε περιπτώσεις σύγκρουσης δύο συρμών, επτά περιπτώσεις εκτροχιασμού και μια περίπτωση σύγκρουσης συρμού με εμπόδιο (τοίχος), η οποία και εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική.

## 1.3 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί κατά πόσο η μέθοδος της τρισδιάστατης επίγειας σάρωσης (3D laser scanner) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις αποτύπωσης ατυχημάτων σε σιδηροδρόμους. Η εργασία επικεντρώνεται στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις φθορές που έχει υποστεί ένα όχημα που λαμβάνει μέρος σε ατύχημα και κατά πόσο αυτές μπορούν να περιγραφούν και να μετρηθούν από την επιλεγμένη μέθοδο. Οπότε,

σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στην ενότητα 1.1, στην αποτύπωση δεν εμπλέκονται στοιχεία του περιβάλλοντος χώρου του ατυχήματος.

Για τον παραπάνω σκοπό επιλέχθηκε να σαρωθεί ένα από τα έξι βαγόνια του συρμού του ΗΣΑΠ που είχε εμπλακεί στο ατύχημα, συγκεκριμένα, το μοναδικό το οποίο είχε υποστεί σημαντικές φθορές αλλά είχε κριθεί επισκευάσιμο. Στη συνέχεια συνενώθηκαν τα νέφη από τις περιμετρικές στάσεις του σαρωτή και μετά την επεξεργασία του συνολικού νέφους προέκυψε η τελική μοντελοποιημένη επιφάνεια. Πάνω σε αυτή διεξήχθησαν μετρήσεις οι οποίες κατέληξαν σε μονοδιάστατα, δισδιάστατα αλλά και τρισδιάστατα αποτελέσματα, τα οποία συγκρίθηκαν με την αρχική σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ (μετά το ατύχημα) αλλά και με τις πρότυπες διαστάσεις του οχήματος.

Επιμέρους στόχοι :

- Αξιολόγηση της ακρίβειας του επίγειου σαρωτή για τέτοιου είδους εργασίες.
- Αξιολόγηση των επιλεχθέντων λογισμικών για την επεξεργασία των δεδομένων.
- Αξιολόγηση των φθορών του οχήματος μέσα από μετρήσεις στο συνολικό μοντέλο.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα προηγούμενης σειράς μετρήσεων και με τα πρότυπα σχέδια του οχήματος.

## 1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει δομηθεί σύμφωνα με την παρακάτω μορφή.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στις αποτυπώσεις ατυχημάτων και συγκεκριμένα σε αυτά που λαμβάνουν χώρα σε σιδηροδρόμους και παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας και η δομή της.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στον τομέα της αποτύπωσης ατυχημάτων και αναλύεται η μέθοδος της τρισδιάστατης επίγειας σάρωσης.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο ιστορικό του ατυχήματος, το οποίο μελετάται, και παρουσιάζονται οι εργασίες πεδίου κατά τη διαδικασία της σάρωσης.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν στα ειδικά λογισμικά και η παραγωγή της τρισδιάστατης επιφάνειας.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαδικασία των μετρήσεων στη μοντελοποιημένη επιφάνεια και τα συγκριτικά αποτελέσματα από τα παλαιότερα διαθέσιμα δεδομένα.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και δίνονται προτάσεις για μελλοντική συνέχισή της αλλά και για έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα.

Τέλος, στα παραρτήματα υπάρχουν τα σχέδια με τις βασικές διαστάσεις του βαγονιού της εργασίας και η αρχική σειρά μετρήσεων (αμέσως μετά το ατύχημα) των Ελληνικών Ναυπηγείων.

## **Κεφάλαιο 2 : Μεθοδολογία**

### **2.1 Εισαγωγή**

Οι αποτυπώσεις των ατυχημάτων, είτε αυτές αφορούν την αποτύπωση ολόκληρου του περιβάλλοντος χώρου του ατυχήματος, είτε μόνο τη ζημιά των οχημάτων (βλ. ενότητα 1.1), μπορεί να επιτευχθούν με διάφορες μεθοδολογίες. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, εμφανίζονται διαρκώς νέες μέθοδοι, οι οποίες πάντα παρουσιάζουν και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκριτικά με τις παλαιότερες.

Σε κάθε περίπτωση η επιλογή της μεθόδου αποτύπωσης αποτελεί σημαντική απόφαση για το μηχανικό και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ζητούμενη ακρίβεια, τα χρονικά περιθώρια μέσα στα οποία πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία, αλλά και το συνολικό οικονομικό κόστος.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι βασικότερες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση μόνο της ζημιάς που έχει προκληθεί σε όχημα λόγω ατυχήματος, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, καθώς και παραδείγματα χρήσης τους από τη διεθνή βιβλιογραφία.

### **2.2 Γεωδαιτικές μέθοδοι**

#### **2.2.1 Εμπειρική μέθοδος**

Ως εμπειρική μέθοδο θεωρούμε αυτή κατά την οποία μετρώνται μήκη με χρήση μετροταινίας (Τσιούκας, 2009). Αν και είναι η παλαιότερη όλων των μεθόδων, παραμένει ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη. Σε αυτή τη μέθοδο ο χρήστης εκτιμά με βάση τον οπτικό έλεγχο και την εμπειρία του τα σημεία του οχήματος που έχουν υποστεί ζημιά, την οποία μετρά με τη μετροταινία.

Σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το χαμηλό της κόστος και η ταχύτητα εφαρμογής της, λόγοι για τους οποίους παραμένει ακόμα τόσο διαδεδομένη. Παρόλα αυτά αδυνατεί να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα σε



περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη μεγάλης ακρίβειας (πχ. έλεγχος για φθορές σε ένα αεροσκάφος), αφού η μέτρηση είναι μονοδιάστατη.

### **2.2.2 Συμβατικές τοπογραφικές μέθοδοι**

Οι συμβατικές τοπογραφικές μέθοδοι αφορούν την χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού (total station) και χωροβάτη. Με αυτό τον εξοπλισμό και τα αντίστοιχα παρελκόμενα μετρώνται μήκη, γωνίες και υψομετρικές διαφορές σε χαρακτηριστικά σημεία του οχήματος. Αυτά τα μεγέθη περιγράφουν τις φθορές που έχει υποστεί το όχημα. Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι τις περισσότερες φορές αυθαίρετο. Αυτή η μέθοδος παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα από την εμπειρική, αλλά είναι ελαφρώς πιο χρονοβόρα .

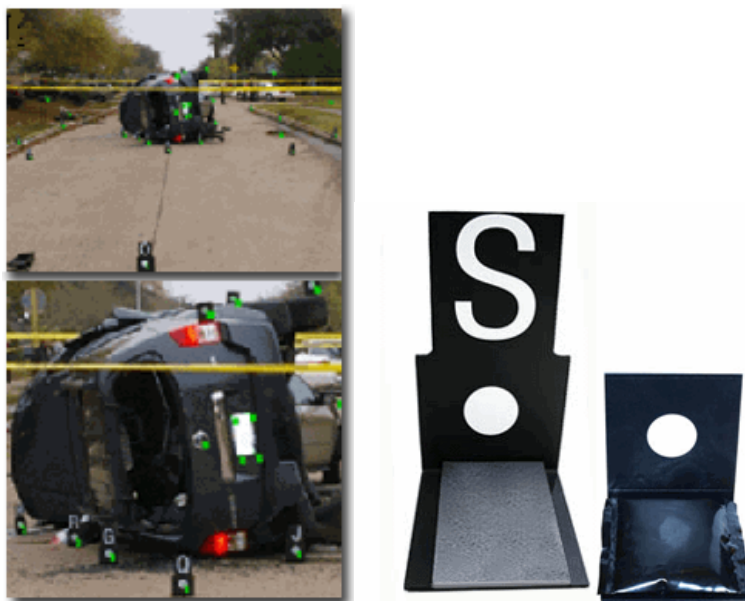
Συχνότερα χρησιμοποιείται ο συνδυασμός μεθόδων, και κυρίως συμβατικών τοπογραφικών με εμπειρικές. Για παράδειγμα, η αρχική σειρά μετρήσεων στο υπό εξέταση βαγόνι της συγκεκριμένης διπλωματικής, που έλαβε χώρα στα ναυπηγεία του Σκαραμαγκά, αφορούσε μετρήσεις μηκών σε διατομές του βαγονιού με χρήση μετροταινίας και μετρήσεις υψομετρικών διαφορών στο πλαίσιό του (σασί) με χρήση χωροβάτη (βλ. Παράρτημα Α).

### **2.2.3 Φωτογραμμετρική μέθοδος**

Η φωτογραμμετρία είναι η μέθοδος με την οποία αποκτώνται μετρητικές πληροφορίες από φωτογραφίες και αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη τεχνική στις αποτυπώσεις ατυχημάτων.

Με τη χρήση, πλέον, ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών λαμβάνονται φωτογραφίες του υπό εξέταση οχήματος. Αυτές πρέπει να έχουν επικαλυπτόμενα οπτικά πεδία, ώστε μετά την επεξεργασία τους να προκύψει η τρισδιάστη (στερεοσκοπική) μετρητική πληροφορία. Με τη διαδικασία αυτή απαιτούνται κοινά σημεία (στόχοι) - τουλάχιστον τρία- ανά ζεύγος επικαλυπτόμενων λήψεων. Ο τριγωνισμός θα δώσει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου σε αυθαίρετο ή άλλο σύστημα, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ταχύτητα και η δυνατότητας εκτέλεσης των εργασιών από το γραφείο.

Στην εικόνα 2.1 φαίνεται η χρήση φωτογραμμετρικών στόχων στην αποτύπωση ατυχήματος.



**Εικόνα 2.1 :** Χρήση φωτογραμμετρικών στόχων σε αποτύπωση ατυχήματος  
([www.iwitnessphoto.com](http://www.iwitnessphoto.com)).

#### 2.2.4 Βιομηχανική Γεωδαισία

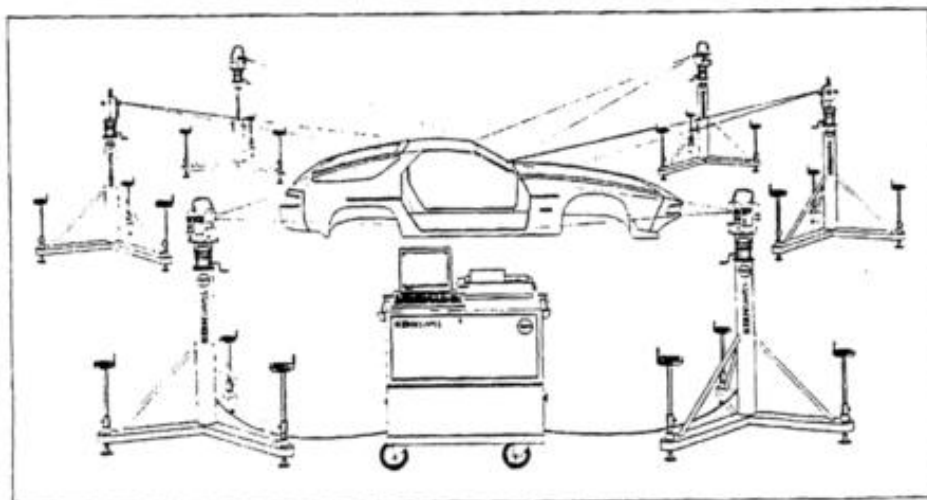
Η βιομηχανική γεωδαισία είναι μια «εξειδίκευση» της κλασσικής γεωδαισίας, η οποία δημιουργήθηκε από την ανάπτυξη της τεχνολογίας στη βιομηχανία και την ανάγκη για πιο ακριβή έλεγχο των βιομηχανικών παραγώγων. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσα από τον προσδιορισμό των συντεταγμένων XYZ, σημείων πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, και τη σύγκρισή τους με τις πρότυπες τιμές του κατασκευαστή (Δογγούρης, 2005).

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων του αντικειμένου χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι.

- Μέθοδος πολικών συντεταγμένων. Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία μετρώνται οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες αλλά και κεκλιμένα μήκη από ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων ως προς το άγνωστο.
- Μέθοδος της εμπροσθοτομίας. Σε αυτή την περίπτωση μετρώνται μόνο γωνίες (οριζόντιες και κατακόρυφες) από δύο γνωστά σημεία ως προς το άγνωστο. Η κλίμακα του δικτύου ορίζεται από την απόσταση ανάμεσα στα δύο γνωστά σημεία.

Η μέθοδος πολικών συντεταγμένων εφαρμόζεται όταν χρησιμοποιούνται total stations και laser trackers ενώ, η μέθοδος της εμπροσθοτομίας εφαρμόζεται με συστήματα δύο ή και περισσότερων θεοδολίχων. Επίσης στη βιομηχανική γεωδαισία μπορεί να χρησιμοποιηθούν συστήματα φωτογραμμετρίας και laser scanners.

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται ο έλεγχος αμαξώματος αυτοκινήτου με τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας, στην οποία γίνεται χρήση συστήματος έξι θεοδολίχων.



**Εικόνα 2.2 :** Μέθοδος εμπροσθοτομίας με χρήση συστήματος έξι θεοδολίχων (Δογγούρης, 2005).

### 2.2.5 Παραδείγματα χρήσης των μεθόδων

Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη για τη σύγκριση της ακρίβειας διαφόρων μεθόδων αποτύπωσης ατυχημάτων, μετρήθηκαν οι φθορές οχημάτων με εμπειρικές, συμβατικές τοπογραφικές και φωτογραμμετρικές μεθόδους (Randles et al., 2010).

Αρχικά τοποθετήθηκαν στα οχήματα ειδικοί στόχοι σε σημεία τα οποία περιέγραφαν τη ζημιά. Στη συνέχεια αυτά τα σημεία μετρήθηκαν με τις τρεις προαναφερθείσες τεχνικές.

- Για την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου έγινε χρήση μετροταινίας.
- Για την εφαρμογή των φωτογραμμετρικών τεχνικών χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες των οχημάτων από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Photomodeler για την επεξεργασία τους, η

οποία οδήγησε στη δημιουργία του 3D μοντέλου κάθε οχήματος. Σε αυτά τα μοντέλα έγιναν οι μετρήσεις των σημείων.

- Για την εφαρμογή της συμβατικής τοπογραφικής μεθόδου τα σημεία μετρήθηκαν με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι και οι τρεις μέθοδοι είναι σε θέση να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για τη ζημιά των οχημάτων.

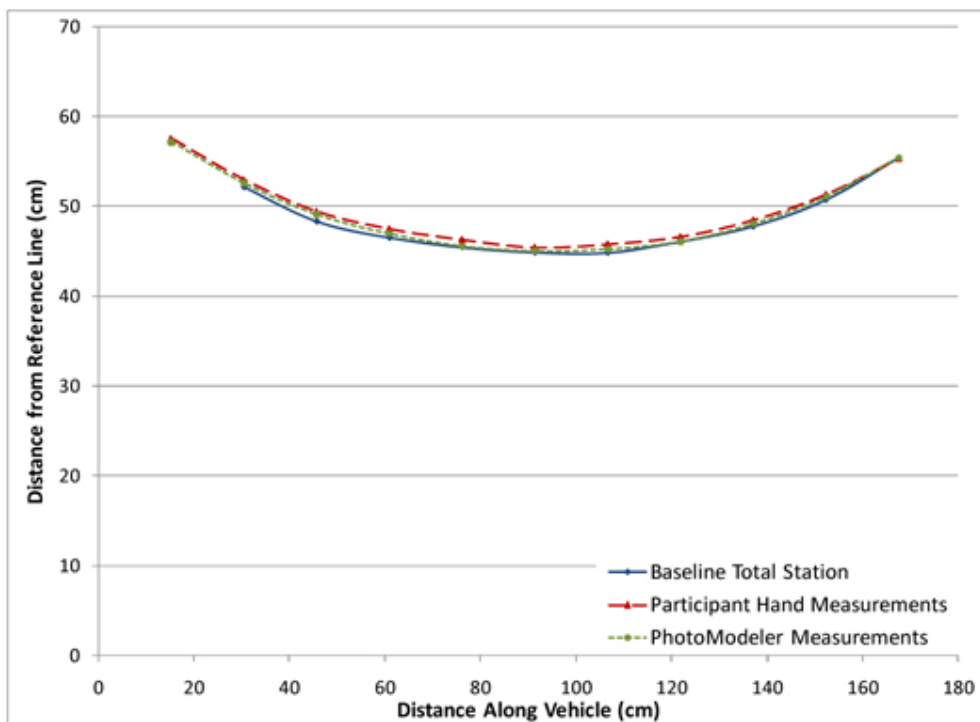
Οι μέσες διαφορές ανάμεσα στις τοπογραφικές και τις εμπειρικές μεθόδους ήταν τις τάξεως των  $0.6 \pm 1.4$  cm και ανάμεσα στις φωτογραμμετρικές και τις τοπογραφικές, της τάξεως των  $0.1 \pm 1.0$  cm .

Στην εικόνα 2.3 φαίνονται τα οχήματα που εξετάστηκαν με τις τρεις μεθόδους αποτύπωσης.

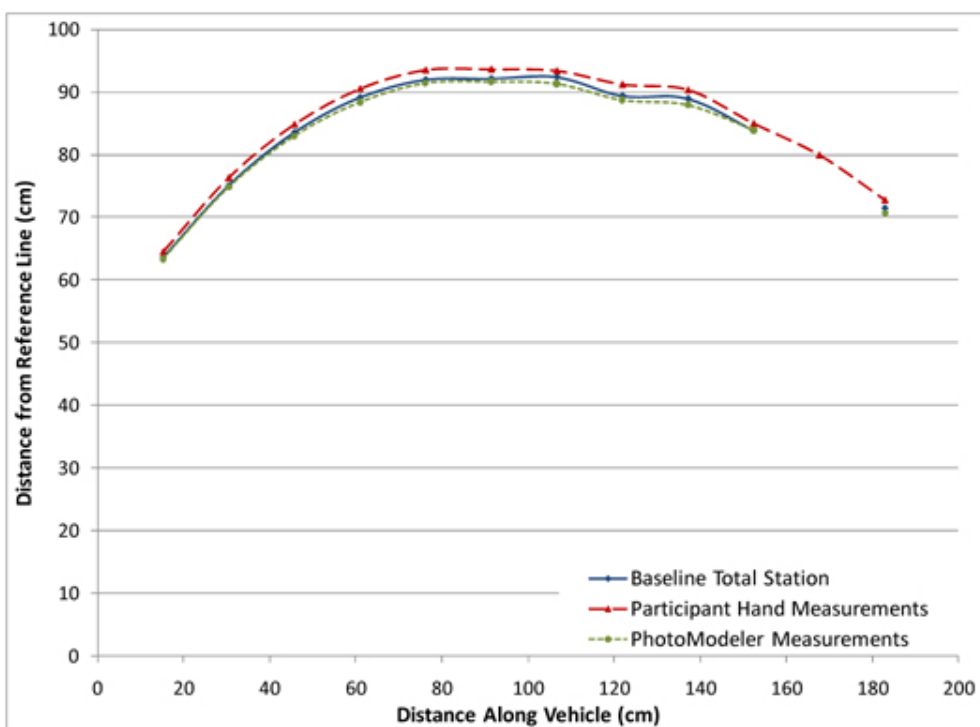


**Εικόνα 2.3 :** Τα οχήματα που μετρήθηκαν με τις τρεις μεθοδολογίες (Randles et al., 2010).

Ενδεικτικά αποτελέσματα των συγκρίσεων παρουσιάστηκαν στη μορφή των παρακάτω διαγραμμάτων (2.1.α,β). Η μπλε γραμμή περιγράφει τις μετρήσεις του total station, η κόκκινη τις μετρήσεις τις μετροταινίας και η πράσινη τις μετρήσεις από το λογισμικό της φωτογραμμετρίας. Κατά τον τρόπο αυτό φαίνονται σε δισδιάστατη μορφή οι αποκλίσεις των μεθόδων.



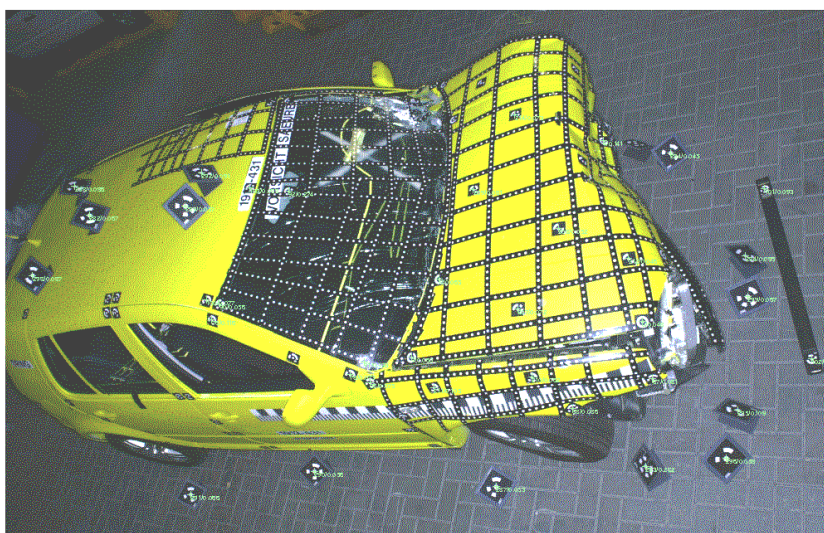
Διάγραμμα 2.1.α



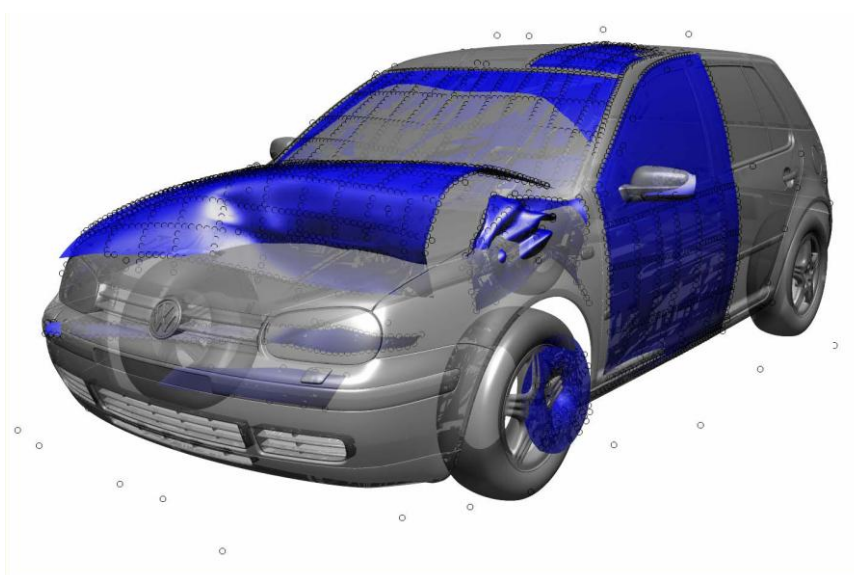
Διάγραμμα 2.1β

**Διάγραμμα 2.1 :** Ενδεικτικά αποτελέσματα των αποκλίσεων που προέκυψαν από τη σύγκριση των μεθόδων (Randles et al., 2010).

Επίσης, σε έρευνα που διεξήχθη για την ποσότητα της ενέργειας που απορροφά ένα όχημα σε ένα ατύχημα, με σκοπό την κατασκευή ασφαλέστερων οχημάτων, χρησιμοποιήθηκαν φωτογραμμετρικές τεχνικές για τη μέτρηση των φθορών. Στην εικόνα 2.4.α φαίνεται το αυτοκίνητο που μελετήθηκε με τοποθετημένους τους στόχους και στην 2.4.β η τρισδιάστατη πληροφορία που εξήχθη από τις μετρήσεις συγκριτικά για πριν και μετά το ατύχημα (Behring et al., 2011).



Εικόνα 2.4.α



Εικόνα 2.4.β

**Εικόνα 2.4 :** Συγκριτικά αποτελέσματα πριν και μετά το ατύχημα με χρήση φωτογραμμετρικών τεχνικών (Behring et al., 2001).

## 2.3 Άλλες τεχνικές

Εκτός από τις προαναφερθείσες βασικές μεθοδολογίες μέτρησης των φθορών σε ένα όχημα, υπάρχουν και άλλες τεχνικές, λιγότερο διαδεδομένες, οι οποίες μπορούν να δώσουν αντίστοιχα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από αυτές.

- Αισθητήρες οπτικών ινών. Αποτελεί σύστημα παρακολούθησης, το οποίο εφαρμόζεται στη ναυπηγική και αεροναυπηγική, και εγκαθίσταται μόνιμα πάνω στο σκάφος με σκοπό την παρατήρηση οποιασδήποτε μεταβολής στη μορφή του (Κοτσιδής 2012).
- Σύστημα ProCam και DPS. Τρισδιάστατα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούν κάμερες υψηλής ανάλυσης και ειδικά λογισμικά. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε ελέγχους ασφάλειας οχημάτων ([www.aicon3d.com](http://www.aicon3d.com)).
- Σύστημα Crossfire. Σύστημα μέτρησης μηκών με συνδυασμό τεχνολογίας laser αλλά και εμπειρικών μεθόδων. Χρησιμοποιείται συνήθως στην αποκατάσταση φθορών αυτοκινήτων ([www.crossfiresystem.com](http://www.crossfiresystem.com)).
- Καλίμπρα. Εξειδικευμένο σύστημα φανοποίησης το οποίο χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση του πλαισίου του οχήματος (Εικόνα 2.5). Οι πιο πρόσφατες καλίμπρες διαθέτουν αποθηκευμένες πρότυπες συντεταγμένες οχημάτων και χρησιμοποιούν μετρικά συστήματα laser για τον εντοπισμό φθορών, όπως και υδραυλικά συστήματα επαναφοράς του πλαισίου στην αρχική του θέση.



**Εικόνα 2.5 :** Καλίμπρα ελέγχου του πλαισίου μοτοσυκλέτας ([www.moto-terzidis.gr](http://www.moto-terzidis.gr)).

## 2.4 Επίγειος σαρωτής laser

Η τεχνολογία του Laser αποτελεί μια μέθοδο συλλογής τρισδιάστατης πληροφορίας, η οποία τα τελευταία χρόνια διαδίδεται όλο και περισσότερο λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Οι επίγειοι σαρωτές χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εργασιών, μερικές από τις οποίες είναι οι εξής:

- Αποτυπώσεις μνημείων
- Οδοποιία
- Έλεγχος μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων
- Διάνοιξη σηράγγων
- Αποτυπώσεις ατυχημάτων
- Αρχαιολογία
- Βιομηχανική Γεωδαισία
- Αντίστροφη μηχανική (reverse engineering)
- Αποτυπώσεις σπηλαίων

Η σάρωση του αντικειμένου γίνεται από απόσταση η οποία μπορεί να κυμαίνεται από μισό μέτρο έως και ένα χιλιόμετρο, ανάλογα με το είδος του σαρωτή (long range, medium range, short range) , και άρα δεν απαιτείται επαφή με το αντικείμενο (Lerma et al., 2008). Οι ακτίνες που εκπέμπουν τα όργανα είναι χαμηλής ισχύος και κατά αυτόν τον τρόπο δεν είναι σε θέση να βλάψουν την κατάσταση του αντικειμένου που σαρώνεται, κάτι που αποτελεί ένα σημαντικό τους πλεονέκτημα σε περιπτώσεις σάρωσης ευαίσθητων αντικειμένων (πχ. πολιτιστικής κληρονομιάς). Έτσι, μέσα από τη σάρωση χιλιάδων σημείων το δευτερόλεπτο (ανάλογα με το είδος του σαρωτή) προκύπτει ένα «νέφος σημείων» το οποίο, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εργασίας, επεξεργάζεται μέχρι την τελική μορφή της μοντελοποιημένης επιφάνειας. Αυτή η επεξεργασία γίνεται σε ειδικά λογισμικά.

Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών laser χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες.

- Time of flight
- Phase Based
- Triangulation



Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας κάθε σαρωτή επηρεάζεται και η ακρίβειά του καθώς και οι αποστάσεις (range) για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ενδεικτικά στον πίνακα 2.1 ακολουθούν οι ακρίβειες και οι μέγιστες αποστάσεις για κάθε αρχή λειτουργίας σαρωτή.

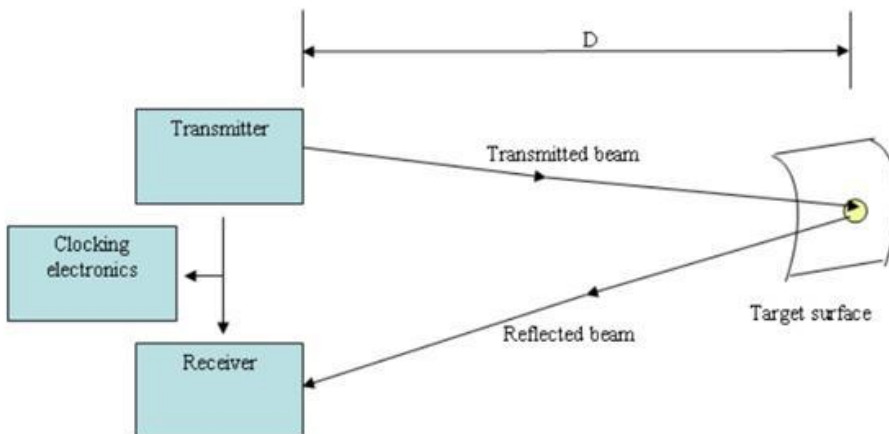
Scanner Type	Range (m)	Accuracy (mm)
Time of Flight	< 100	< 10
	< 1000	< 20
Phase Based	<100	<10
Triangulation	< 5	< 1

**Πίνακας 2.1 :** Ακρίβειες και εύρος χρήσης για κάθε αρχή λειτουργίας σάρωσης (Siderberry 2007).

#### 2.4.1 Time of flight

Σε αυτήν τη μέθοδο εκπέμπεται το σήμα από το όργανο και, αφού ανακλάται στην πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, επιστρέφει πίσω. Έτσι, μετρίεται ο χρόνος από την εκπομπή έως τη λήψη του σήματος, και με δεδομένη την ταχύτητα του φωτός υπολογίζεται η απόσταση του σημείου από το όργανο. Από το λογισμικό του οργάνου επίσης μετρώνται οι γωνίες σάρωσης της κάθε ακτίνας, με την χρήση των οποίων υπολογίζονται οι πολικές συντεταγμένες της σαρωμένης επιφάνειας. Τέλος, καταγράφεται από το όργανο η ένταση  $i$  της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα από τις πολικές συντεταγμένες να γίνεται μετάβαση σε πληροφορία  $(x,y,z,i)$  για κάθε σημείο.

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η αρχή λειτουργίας time of flight.



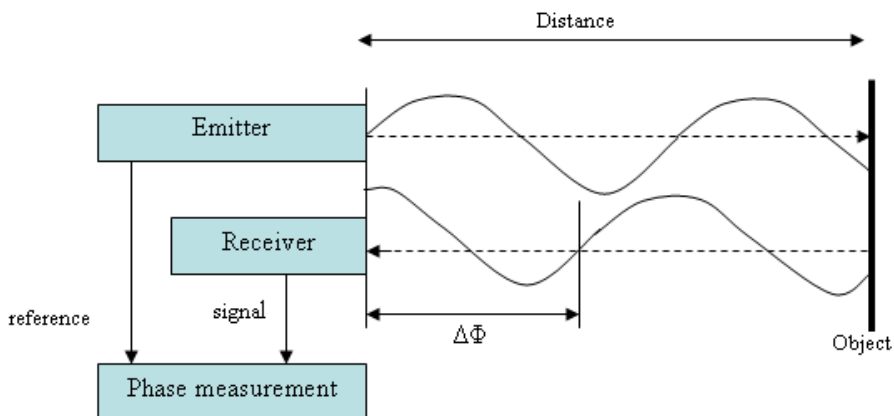
**Σχήμα 2.1 :** Η αρχή λειτουργίας time of flight (Lerma et al., 2008).

### 2.4.2 Phase based

Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν διαφέρει ιδιαίτερα από την τεχνολογία Time of flight και είναι η ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται στα total stations, τα ψηφιακά θεοδόλιχα και τα ιντερφερόμετρα.

Σύμφωνα με αυτή την αρχή λειτουργίας, μετρείται από το λογισμικό του οργάνου η διαφορά φάσης του εκπεμπόμενου και του επιστρεφόμενου σήματος, μέσα από την οποία υπολογίζεται η απόσταση της σαρωμένης επιφάνειας.

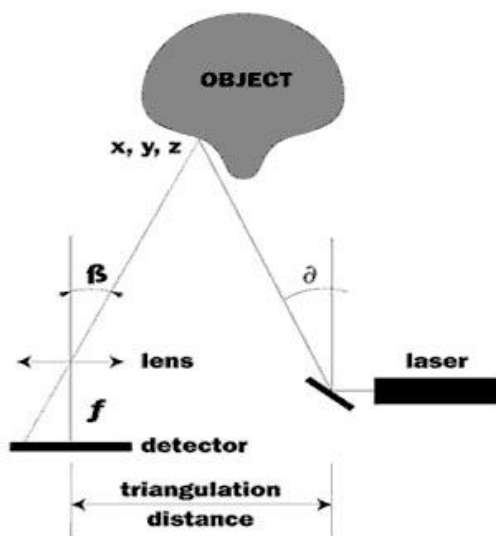
Αυτής της τεχνολογίας σαρωτές είναι σε θέση να παρέχουν ακριβέστερες και ταχύτερες σαρώσεις, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μικρότερες αποστάσεις (Siderberry, 2007). Η αρχή λειτουργίας τους φαίνεται στο σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2 :** Η αρχή λειτουργίας phase based (Lerma et al., 2008).

### 2.4.3 Μέθοδος τριγωνισμού

Η μέθοδος ονομάζεται έτσι εξαιτίας του τριγώνου που δημιουργείται από τον πομπό της ακτίνας laser, την επιφάνεια που σαρώνεται και μια ψηφιακή κάμερα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Ο πομπός της ακτίνας και η κάμερα βρίσκονται πάνω σε δύο θέσεις γνωστών συντεταγμένων μιας βάσης. Κατά αυτόν τον τρόπο η κάμερα εντοπίζει και καταγράφει το αποτύπωμα της ακτίνας laser πάνω στο αντικείμενο. Οι τρισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες αυτού του σημείου υπολογίζονται από την επίλυση του τριγώνου.



**Σχήμα 2.3 :** Η αρχή λειτουργίας του τριγωνισμού (Siderberry, 2007).

Η μέθοδος του τριγωνισμού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ πομπού και αντικειμένου, καθώς η ακρίβεια μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης, αλλά παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα από τις άλλες δύο μεθόδους επίγειας σάρωσης και ενδείκνυται για αποτυπώσεις μικρών αντικειμένων στα οποία χρειάζεται να αναδειχθούν λεπτομέρειες.

### 2.4.4 Ακρίβεια σάρωσης

Σύμφωνα με τον Lerma Garcia (2008) τα σφάλματα του laser scanner μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε :

- Αυτά που οφείλονται στο όργανο, όπως η αβεβαιότητα μέτρησης μηκών και γωνιών.

- Αυτά που οφείλονται στο αντικείμενο προς αποτύπωση. Για παράδειγμα, η ανακλαστικότητα του υλικού της επιφάνειας που σαρώνεται.
- Αυτά που οφείλονται σε περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία, υγρασία.
- Στα μεθοδολογικά σφάλματα. Παράγοντες που μπορεί να δημιουργήσουν περεταίρω θόρυβο στις μετρήσεις όπως η λάθος επιλογή πυκνότητας σάρωσης.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα σφάλματα των σαρωτών laser μπορούν να αναζητηθούν για παράδειγμα στους Vosselman and Hans-Gred Maas (2010), Yuriy Reshetyuk (2009), Remondino (2010), Boehler and Marbs (2003), Lerma et al., (2008).

#### 2.4.5 Παραδείγματα χρήσης laser scanner

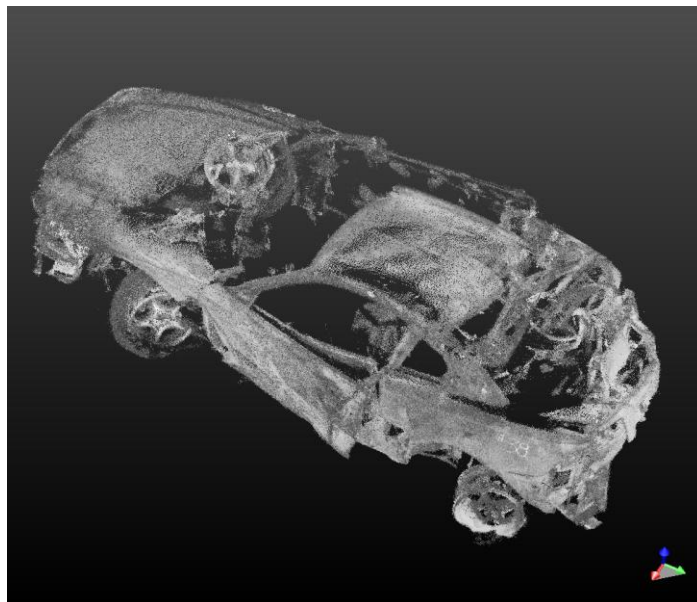
Υπάρχουν αρκετές διεθνείς εταιρείες, οι οποίες εξειδικεύονται στην αποτύπωση ατυχημάτων με τη μέθοδο της τρισδιάστατης επίγειας σάρωσης. Έτσι, καταλήγουν σε αναλυτικά αποτελέσματα της ζημιάς των οχημάτων, αλλά και στη μελέτη των αιτιών του ατυχήματος, όπως και στην αναπαράστασή του.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που έπρεπε να γίνει αναπαράσταση της ανατροπής ενός οχήματος, το total station αποδείχθηκε περιοριστικό λόγω ταχύτητας συλλογής δεδομένων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε επίγειος σαρωτής τεχνολογίας διαφοράς φάσης (Phase Based). Το νέφος σημείων που προέκυψε από την σάρωση φαίνεται εικόνα 2.6.



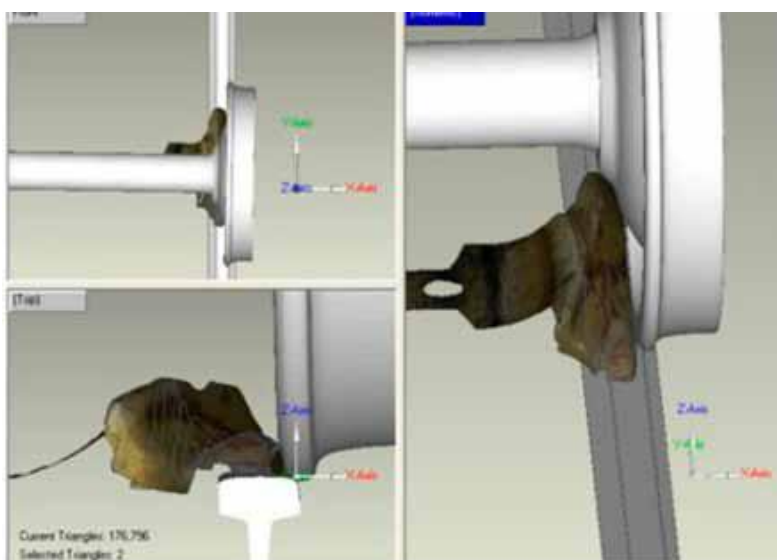
**Εικόνα 2.6 :** Νέφος σημείων αυτοκινήτου που έχει υποστεί ζημιά  
([www.gilbertengineering.net](http://www.gilbertengineering.net)).

Στο επόμενο παράδειγμα φαίνεται το νέφος σημείων που πάρθηκε από ολοσχερώς κατεστραμμένο αυτοκίνητο επίσης με την τεχνολογία επίγειας σάρωσης (Εικόνα 2.7). Η πυκνότητα σάρωσης είναι ανά 5mm.



**Εικόνα 2.7 :** Νέφος σημείων κατεστραμμένου αυτοκινήτου ([www.axrecon.com](http://www.axrecon.com)).

Επιπρόσθετα, η τεχνολογία του laser scanner χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση του εκτροχιασμού ενός βαγονιού, το οποίο τελικά συγκρούστηκε με άλλο επιβατικό βαγόνι. Στην εικόνα 2.8 φαίνεται σε μοντελοποιημένη μορφή η αιτία εκτροχιασμού.



**Εικόνα 2.8 :** Αναπαράσταση του εκτροχιασμού βαγονιού ([www.jrla.net](http://www.jrla.net)).

Στη συνέχεια φαίνεται η αποτύπωση ενός αεροσκάφους το οποίο καταστράφηκε σε ατύχημα. Στην πρώτη φωτογραφία (2.9.α) φαίνεται το εσωτερικό της καμπίνας του αεροσκάφους και στη δεύτερη (2.9.β) το νέφος σημείων που συνέλεξε ο σαρωτής.



Εικόνα 2.9.α



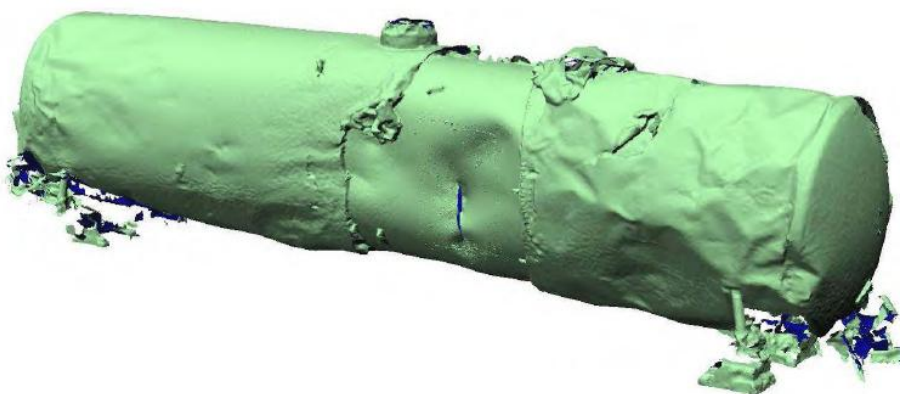
Εικόνα 2.9.β

**Εικόνα 2.9 :** Η καμπίνα κατεστραμμένου αεροσκάφους (2.9.α) και το νέφος σημείων της (2.9.β) ([www.sparpointgroup.com](http://www.sparpointgroup.com)).

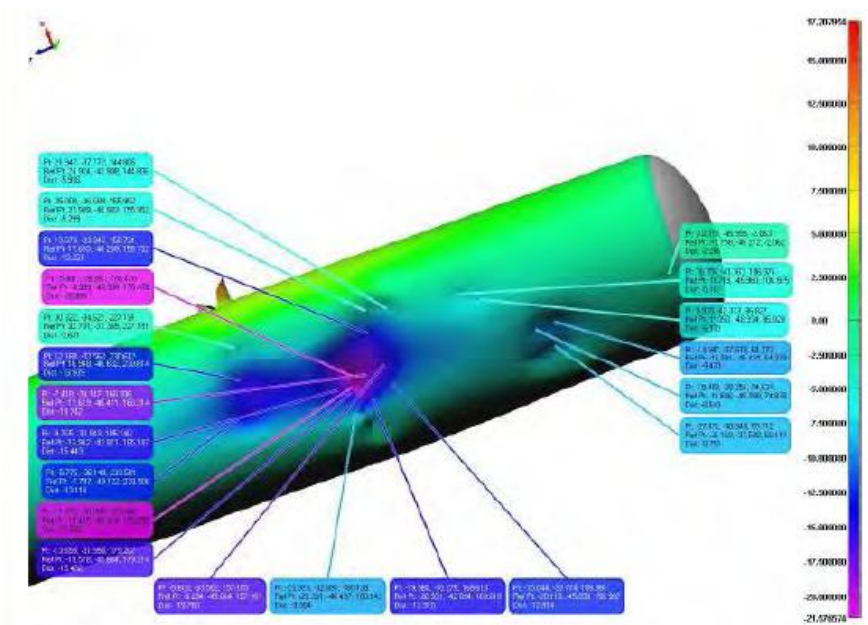
Τέλος, παρουσιάζεται η αποτύπωση ενός βυτιοφόρου βαγονιού που υπέστη εκτροχιασμό. Στην πρώτη εικόνα (2.10.α) φαίνεται η φωτογραφία του βαγονιού, στη δεύτερη (2.10.β) η μοντελοποιημένη επιφάνειά του, και στην τρίτη (2.10.γ) παρουσιάζεται το επίπεδο της ζημιάς μέσα από χρωματική διαφοροποίηση ανάλογα με την απόκλιση από το πρότυπο (πριν το ατύχημα).



Εικόνα 2.10.α



Εικόνα 2.10.β



Εικόνα 2.10.γ

**Εικόνα 2.10 :** Το εκτροχιασμένο βυτιοφόρο βαγόνι (2.10.α), η μοντελοποιημένη επιφάνειά του (2.10.β) και η χρωματική ανάλυση των φθορών του (2.10.γ) ([www.sparpointgroup.com](http://www.sparpointgroup.com)).

#### **2.4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επίγειας laser σάρωσης.**

Συνολικά αξιολογώντας τη μέθοδο της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης αναφέρονται τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

##### Πλεονεκτήματα

- Άμεση παραγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας.
- Μικρός χρόνος εργασιών πεδίου.
- Δυνατότητα εκτέλεσης των εργασιών πεδίου χωρίς επαφή με το αντικείμενο.
- Αξιόπιστα αποτελέσματα αυξημένης ακρίβειας ακόμα και για λεπτομερή αντικείμενα.

##### Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος αγοράς εξοπλισμού.
- Ανάγκη εξειδίκευσης για την χρήση του οργάνου και των λογισμικών.
- Μεγάλος όγκος δεδομένων που απαιτούν χρόνο επεξεργασίας αλλά και ισχυρούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές.



## **Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογή αποτύπωσης**

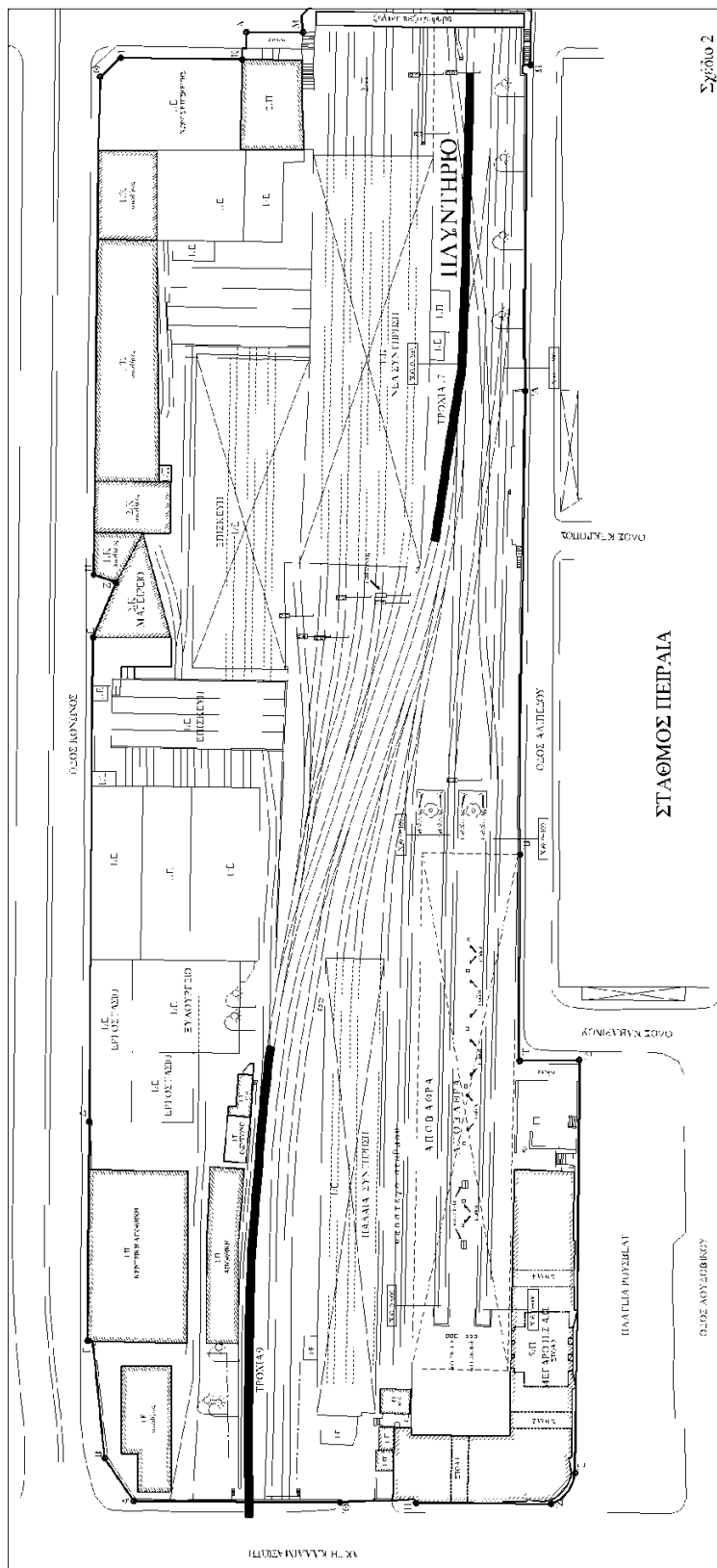
### **3.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η εφαρμογή αποτύπωσης των παραμορφώσεων του οχήματος λόγω σύγκρουσης. Αρχικά αναφέρεται το ιστορικό του ατυχήματος και περιγράφεται το αντικείμενο (σιδηροδρομικό όχημα) της αποτύπωσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σχεδιασμός των εργασιών πεδίου, η υλοποίησή τους, και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

### **3.2 Ιστορικό του ατυχήματος**

Την 22α Φεβρουαρίου 2008, ημέρα Παρασκευή και περί ώρα 12 και 30 μμ, στο αμαξοστάσιο (χώρος στάθμευσης και ελιγμών) του Σταθμού Πειραιά του ΗΣΑΠ, συρμός έξι οχημάτων 11ης παραλαβής με σύνθεση 3125-3213-3126-3157-3229-3158, ενώ βρισκόταν σε διαδικασία εσωτερικού καθαρισμού του στην τροχιά T17 στο πλυντήριο οχημάτων, κινήθηκε χωρίς να επιβαίνει επ' αυτού Ηλεκτροδηγός, προς την τροχιά T16. Στη συνέχεια, παραβιάζοντας (αλλάζοντας θέση) αλλαγές τροχιάς, κατευθύνθηκε στην τροχιά T9, διανύοντας απόσταση 300 μέτρων περίπου. Κατόπιν προσέκρουσε με ταχύτητα στο τοίχιο περίφραξης που βρίσκεται στο τέρμα της τροχιάς αυτής. Στη συνέχεια παρασύροντας μέρος του τοιχίου, συνέχισε την πορεία του προς την οδό Καλλιμασιώτη και το πρώτο όχημα (3125) εξήλθε προς αυτή.

Από ανθρώπινα λάθη ο συρμός είχε και τις 7 ασφαλιστικές διατάξεις του εκτός λειτουργίας με αποτέλεσμα όταν η καθαρίστρια καθαρίζοντας το χειριστήριο κίνησε (κατά λάθος) το μοχλό Πορείας – Πέδης, ο συρμός ξεκίνησε φθάνοντας την ταχύτητα των 40 Km / h και με αυτή παρέσυρε το τοίχιο περίφραξης. Το τοίχιο ήταν υπολογισμένο να συγκρατεί τον συρμό όταν αυτός κινείται με ταχύτητα το πολύ 15 Km/h, διότι ο κανονισμός προβλέπει ότι η κίνηση των συρμών σε χώρους ελιγμών και σε αμαξοστάσια δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 10 Km/h. Ο συρμός όμως κινήθηκε με ταχύτητα 40 Km/h, με αποτέλεσμα να παρασύρει το τοίχιο και να συνεχίσει την πορεία του, σταματώντας μέσα στη οδό Καλλιμασιώτη (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 : Σχεδιάγραμμα της κίνησης του συρμού που προκάλεσε το ατύχημα στο αμαξοστάσιο του Πειραιά.

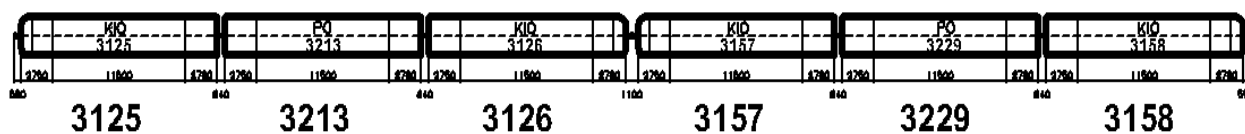
Αποτέλεσμα των ανωτέρω ήταν να προκληθεί ο θάνατος ενός ατόμου που βρισκόταν επί του πεζοδρομίου της οδού Καλλιμασιώτη και ο ελαφρύς τραυματισμός των έξι καθαριστριών που εργάζονταν εντός του συρμού αυτού. Επίσης, προκλήθηκαν υλικές ζημιές επί δύο σταθμευμένων αυτοκινήτων και σοβαρές ζημιές επί των οχημάτων του συρμού. Τέλος, καταστράφηκε το τοιχίο επί του οποίου ο συρμός προσέκρουσε καθώς και μέρος του αναβαθμού κίνησης προσωπικού.

### 3.3 Το αντικείμενο αποτύπωσης

Από τα έξι βαγόνια του συρμού που έλαβε μέρος στο παραπάνω ατύχημα τα τρία πρώτα (οχήματα 3125, 3113, 3126) υπέστησαν μεγάλες καταστροφές και σε καμία περίπτωση δεν ήταν επισκευάσιμα, το τέταρτο (3157) υπέστη αρκετές ζημιές αλλά κρίθηκε επισκευάσιμο, και τα δύο τελευταία (3229,3158) δεν υπέστησαν καθόλου φθορές. Με βάση αυτά κρίθηκε σκοπιμότερο να αποτυπωθεί το τέταρτο βαγόνι (3157), οι ζημιές του οποίου, σύμφωνα με τα πορίσματα των υπεύθυνων του ΗΣΑΠ και των Ελληνικών Ναυπηγείων, ήταν αναλυτικά οι εξής:

- Πλήρης καταστροφή του αμαξώματος στην περιοχή του διαμερίσματος ηλεκτροδηγού με εκτεταμένες μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις από την μετώπη του οχήματος έως τα ανοίγματα των πρώτων θυρών επιβατών.
- Εκτεταμένες ζημιές – καταστροφές σε όλο τον εξοπλισμό του διαμερίσματος ηλεκτροδηγού.
- Το πλαίσιο (σασί) του αμαξώματος παρουσιάζει σοβαρές μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις στη μετωπική εγκάρσια δοκό που είναι ειδικά διαμορφωμένη και ως βάση στήριξης του αυτόματου συνδέσμου του οχήματος. Επίσης, μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις υπάρχουν και στις διαμήκεις δοκούς του πλαισίου στην περιοχή πλησίον της εγκάρσιας μετωπικής δοκού. Το υπόλοιπο αμάξωμα παρουσιάζει μια ελαφρά κλίση προς την αριστερή πλευρά (πλευρά Σταθμαρχείο).
- Πλήρης καταστροφή : του αυτόματου συνδέσμου μαζί με την βάση του, των ηλεκτρικών ζευκτῆρων του και των καλωδιώσεών τους και του μηχανήματος κλιματισμού του διαμερίσματος ηλεκτροδηγού.

Η σειρά των οχημάτων του συρμού φαίνονται στην εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1 :** Η σειρά των οχημάτων του συρμού που έλαβε μέρος στο ατύχημα.

Σημειώνεται ότι οι συρμοί αποτελούνται από κινητήρια (ΚΙΟ) και ρυμουλκούμενα (ΡΟ) οχήματα. Ο συρμός του ατυχήματος ήταν 11<sup>ης</sup> παραλαβής. Γενικά στοιχεία αυτής της κατηγορίας συρμών του ΗΣΑΠ παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

• Μήκος Οχήματος ΚΙΟ , ΡΟ (χωρίς τους συνδέσμους)	17.000 mm
• Μήκος ημισυρμού (χωρίς τους συνδέσμους)	52.280 mm
• Μήκος ημισυρμού (με τους συνδέσμους)	53.380 mm
• Μήκος συρμού (χωρίς τους συνδέσμους)	105.660 mm
• Μήκος συρμού (με τους συνδέσμους)	106.760 mm
• Πλάτος οχήματος	2.780 mm
• Ύψος οχήματος από σιδηροτροχιά (χωρίς φορτίο)	3.620 mm
• Μέγιστη δυνατή ταχύτητα συρμού	80 Km / h
• Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα συρμού	70 Km / h
• Μέγιστη επιτάχυνση συρμού	a = 1,0 m <sup>2</sup> / sec
• Μέγιστη επιβράδυνση συρμού	b = 1,1 m <sup>2</sup> / sec
• Μέγιστη χωρητικότητα επιβατών	
Καθήμενοι ΚΙΟ	33 άτομα
Καθήμενοι ΡΟ	42 άτομα
Καθήμενοι συρμού (33+42+33) + (33+42+33) =	216 άτομα
Σύνολο επιβατών συρμού (με 5 άτομα / m <sup>2</sup> )	1.004 άτομα
• Απόβαρο Συρμού (περίπου)	180 tn
Το κάθε όχημα ΚΙΟ ή ΡΟ έχει 4 δίφυλλες πόρτες ανά πλευρά.	

**Πίνακας 3.1 :** Γενικά στοιχεία των οχημάτων 11<sup>ης</sup> παραλαβής του ΗΣΑΠ.

Στις φωτογραφίες 3.2.α,β,γ φαίνεται το σκηνικό του ατυχήματος με τα οχήματα του συρμού που έλαβαν μέρος και τον περιβάλλοντα χώρο. Στην φωτογραφία 3.2.δ φαίνεται το προς αποτύπωση βαγόνι (3157) στον χώρο του ατυχήματος και στην 3.2.ε στον χώρο στάθμευσής του, μετά το ατύχημα.



Εικόνα 3.2.α



Εικόνα 3.2.β



Εικόνα 3.2.γ



Εικόνα 3.2.δ

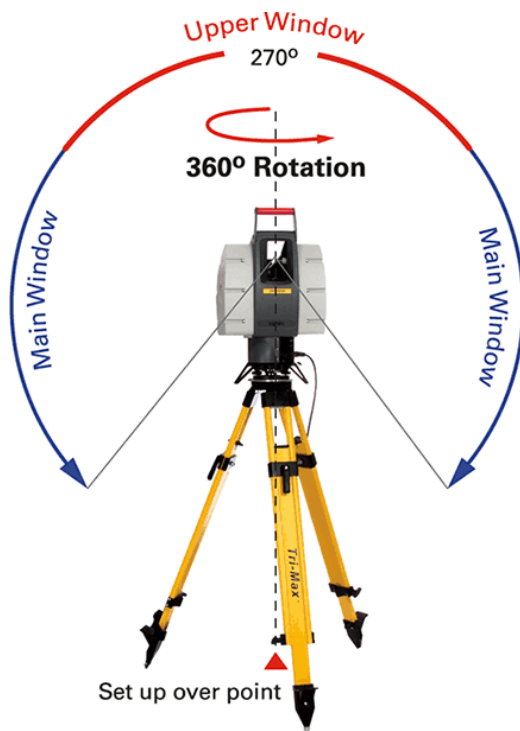


Εικόνα 3.2.ε

**Εικόνα 3.2 :** Το σκηνικό του ατυχήματος (3.2.α,β,γ) και το προς μελέτη βαγόνι (3.2.δ,ε).

### 3.4 Ο επίγειος σαρωτής Leica Scanstation 2

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος τρισδιάστατος σαρωτής της Leica , Scanstation 2. Ο συγκεκριμένος σαρωτής αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο όργανο επίγειας σάρωσης, λόγω της ταχύτητάς, της ακρίβειας και της εμβέλειας του. Εκτός της τρισδιάστατης σάρωσης αντικειμένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν συμβατικό total station, εκτελώντας εργασίες όπως όδευση, αφού έχει τη δυνατότητα στόχευσης μεμονωμένου σημείου. Επίσης διαθέτει ενσωματωμένη ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία της σάρωσης αφού από αυτές τις φωτογραφίες ο χρήστης επιλέγει την προς αποτύπωση περιοχή. Ο σαρωτής παρέχει τη δυνατότητα κέντρωσης και οριζοντίωσης πάνω από συγκεκριμένο σημείο με τη βοήθεια τρικόχλιου και σφαιρικής αεροστάθμης. Ο χειρισμός γίνεται από φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος συνδέεται με τον σαρωτή, και μέσα από το πρόγραμμα Cyclone της Leica δίνονται όλες οι απαραίτητες εντολές. Η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει είτε από ειδικές συμβατές μπαταρίες της ίδιας εταιρίας , είτε άμεσα με ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα 3.3 :** Ο επίγειος σαρωτής Leica Scanstation 2 ([www.leica-geosystemssolutionscenters.com](http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com)).

Ο αρχή λειτουργίας του σαρωτή είναι η “time of flight” (βλ. ενότητα 2.4.1). Το οπτικό του πεδίο είναι 360° στην οριζόντια διεύθυνση και 270° στην κατακόρυφη. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3, ο σαρωτής διαθέτει 2 παράθυρα, το κυρίως (main window) και το πάνω (upper window), πίσω από τα οποία βρίσκεται το σύστημα των περιστρεφόμενων καθρεπτών το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σωστή στόχευση κάθε σημείου και τη σάρωση του. Η ταχύτητα του σαρωτή μπορεί να φτάσει στα 50.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση χρήσης του άνω παραθύρου (upper window), για παράδειγμα στη σάρωση ενός τούνελ, τότε η ταχύτητα μειώνεται αισθητά. Η εμβέλεια μπορεί να φτάσει στα 300 μέτρα και η αβεβαιότητά του είναι 6mm σε απόσταση 50m. Η ελάχιστη δυνατή απόσταση σάρωσης μεταξύ 2 σημείων είναι 1mm.

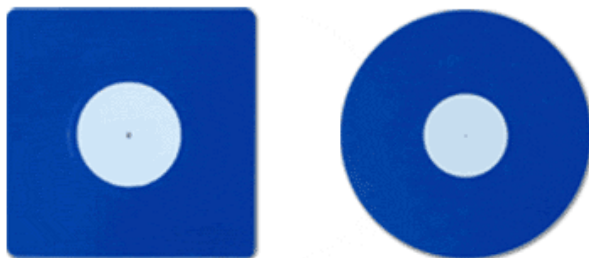
Στον πίνακα 3.2 τα σημαντικότερα στοιχεία του σαρωτή.

<b>Ακρίβεια Μέτρησης Θέσης</b>	6mm
<b>Ακρίβεια Μοντελοποιημένης Επιφάνειας</b>	2mm
<b>Ακρίβεια Μέτρησης Στόχου</b>	2mm
<b>Γωνιακή Ακρίβεια</b>	60mrad οριζόντια και κατακόρυφα
<b>Χρώμα ακτίνας</b>	Πράσινο
<b>Εύρος Λειτουργίας</b>	360° οριζόντια 270° κατακόρυφα
<b>Ταχύτητα Σάρωσης</b>	έως 50.000 σημεία/sec
<b>Μέγιστη Πυκνότητα Σάρωσης</b>	1mm οριζόντια και κατακόρυφα
<b>Εμβέλεια</b>	έως 300m για 90% ανακλαστικότητα επιφάνειας
<b>Βάρος</b>	18.5 kg
<b>Θερμοκρασία Λειτουργίας</b>	Από 0°C έως 40° C

**Πίνακας 3.2 :** Κύρια χαρακτηριστικά σαρωτή Leica Scanstation 2.



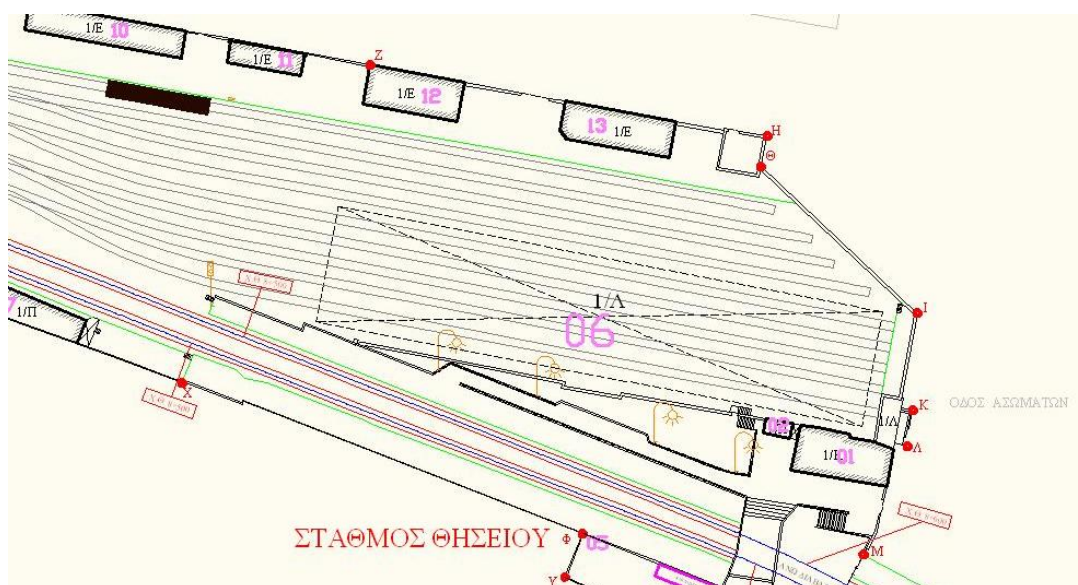
Τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο ειδικός τρίποδας του οργάνου και οι ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι. Υπάρχουν διάφορα είδη στόχων, οι οποίοι είναι συμβατοί και αναγνωρίσιμοι από το όργανο όπως σφαιρικοί, ημισφαιρικοί, επίπεδοι. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν 14 τετράγωνοι, επίπεδοι στόχοι διαστάσεων 3"x3" και 4 κυκλικοί, επίσης επίπεδοι, ακτίνας 6" (Εικόνα 3.4).



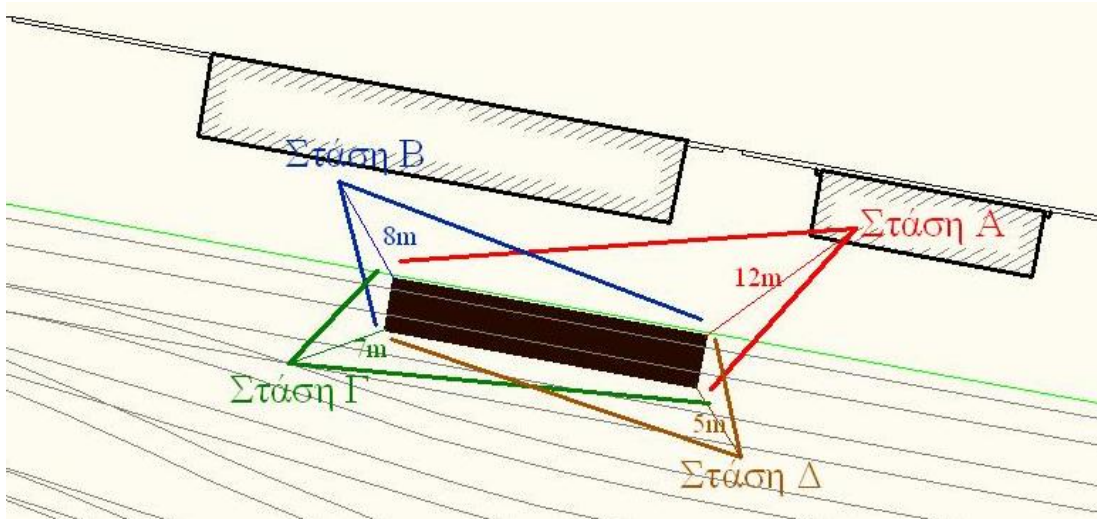
**Εικόνα 3.4 :** Τετραγωνικός , επίπεδος στόχος 3"x3" (αριστερά) και κυκλικός , επίπεδος στόχος 6"(δεξιά) (www.leica-geosystems.com).

### 3.5 Σχεδιασμός εργασιών πεδίου

Το προς εξέταση βαγόνι βρισκόταν σε ειδικό χώρο εναπόθεσης (αμαξοστάσιο), ιδιοκτησίας του ΗΣΑΠ ακριβώς δίπλα στον σταθμό του Θησείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Επιλέχθηκε να γίνουν τέσσερις σαρώσεις, μία σε κάθε γωνία του βαγονιού, ώστε να υπάρχει πληρότητα στην αποτύπωσή του (Σχήμα 3.3).



**Σχήμα 3.2 :** Το αμαξοστάσιο δίπλα στον σταθμό του Θησείου.



**Σχήμα 3.3 :** Σκαρίφημα θέσεων σάρωσης και οπτικού τους πεδίου.

Μία εκ των τεσσάρων σαρώσεων και συγκεκριμένα η πρώτη (Στάση Α), επιλέχθηκε να γίνει από την ταράτσα ενός μονοόροφου κτιρίου που υπήρχε στο πεδίο εργασίας. Αυτό συνέβη ώστε να σαρωθεί και η οροφή του βαγονιού και να είναι πλήρες το τελικό αποτέλεσμα.



**Εικόνα 3.5 :** Σάρωση βαγονιού από την οροφή κτιρίου.

Από τις τέσσερις θέσεις σάρωσης που περιγράφηκαν προηγούμενα προκύπτουν τέσσερα ξεχωριστά νέφη σημείων. Αυτά θα πρέπει στη συνέχεια να συνενωθούν σε ένα κοινό σύστημα αξόνων, ώστε να δημιουργηθεί το συνολικό μοντέλο του αντικειμένου.

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο χρειάζονται τουλάχιστον 3 κοινά σημεία ανά ζεύγος, τα οποία μπορούν να είναι είτε ομόλογα (όπως γωνίες ή άλλα ευδιάκριτα σημεία στο επικαλυπτόμενο τμήμα) είτε ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι τους οποίους αναγνωρίζει αυτόματα ο σαρωτής. Η διαδικασία ονομάζεται registration (συνένωση) και αναλύεται στην ενότητα 4.2.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε να τοποθετηθούν ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι, ώστε να υπάρχει μικρότερο σφάλμα στη διαδικασία της συνένωσης, αφού αυτοί αναγνωρίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια από το λογισμικό συγκριτικά με τα ομόλογα σημεία. Όλοι οι στόχοι τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του βαγονιού. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν από πέντε στην πίσω και μπροστά πλευρά και από οκτώ στην δεξιά και αριστερά. Χρησιμοποιήθηκαν περισσότεροι από τους ελάχιστα απαιτούμενους διότι πολλοί σαρώθηκαν με μεγάλο σφάλμα (βλ. ενότητα 4.2).

Σημειώνεται ότι στο πίσω μέρος των παραθύρων τοποθετήθηκε χαρτί εφημερίδας ώστε να αποφευχθεί ο θόρυβος στις μετρήσεις, αφού χωρίς αυτό οι ακτίνες θα διαπερνούσαν τα παράθυρα σαρώνοντας το εσωτερικό του βαγονιού. Επίσης, στο μπροστινό τμήμα όπου το τζάμι και η πόρτα της καμπίνας του οδηγού είχαν καταστραφεί ολοσχερώς τοποθετήθηκαν κομμάτια ξύλου κόντρα πλακέ για τον ίδιο λόγο (Εικόνα 3.6).



**Εικόνα 3.6 :** Το βαγόκι πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την τοποθέτηση χαρτιού και κόντρα πλακέ.

### 3.6 Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων

Οι εργασίες πεδίου πραγματοποιήθηκαν στις 3/5/2012 και διήρκησαν συνολικά περίπου 5 ώρες. Οι θέσεις σάρωσης που υλοποιήθηκαν ήταν τέσσερις και η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ίδια για όλες.

Το σύστημα αναφοράς κάθε φορά ήταν αυθαίρετο. Δεν υπήρχε ανάγκη εξάρτησης από κάποιο γνωστό σημείο, αφού η αποτύπωση αφορούσε αποκλειστικά το βαγόνι. Οπότε, τα σημεία όπου στερεώθηκε ο τρίποδας επιλέχθηκαν επίσης αυθαίρετα, με μοναδικό κριτήριο να παρέχουν κατάλληλη σταθερότητα για την τοποθέτηση του σαρωτή. Στη συνέχεια γινόταν η σύνδεση με την παροχή ρεύματος και με τον φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, αφού από αυτόν δίνονται όλες οι εντολές λειτουργίας του οργάνου. Αμέσως μετά τη σύνδεση με το ρεύμα το όργανο πραγματοποιεί ορισμένες περιστροφές καλιμπράροντας έτσι το σύστημα των καθρεπτών του. Όταν ανάψει το πράσινο λαμπάκι “ready”, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία. Πρώτα δημιουργήθηκε κατάλληλα ονομασμένη βάση δεδομένων (database) με την εντολή “Configure->Create database”. Στη συνέχεια για κάθε στάση δημιουργήθηκε ξεχωριστό project στο Cyclone navigator. Έπειτα ακολουθεί η λήψη φωτογραφιών από τον σαρωτή. Αφού ρυθμιστεί η φωτεινότητα της κάμερας μέσα από το “Image->Adjust Exposure”, με την εντολή “Get image” λαμβάνονται φωτογραφίες από το οπτικό του πεδίο. Στην κάτω δεξιά γωνία της οθόνης φαίνεται ο εναπομείνας χρόνος ολοκλήρωσης της φωτογράφισης.

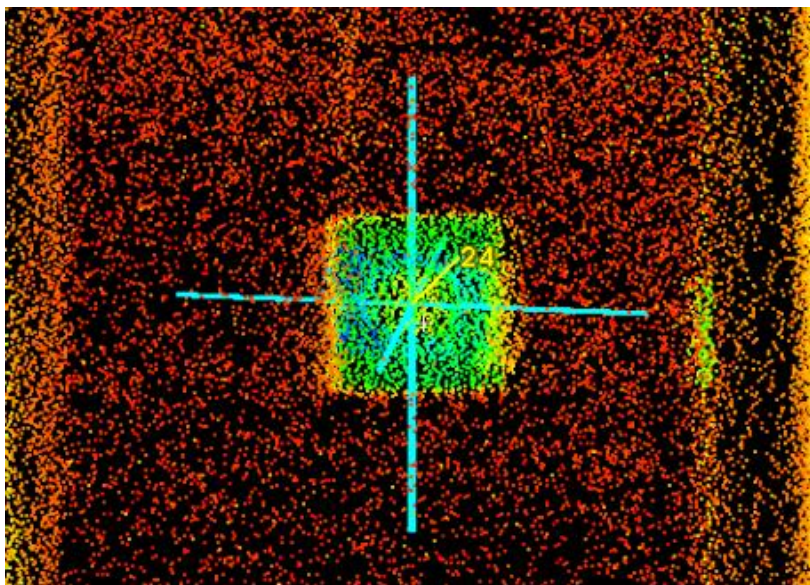


Εικόνα 3.7 : Διαδικασία σάρωσης του βαγονιού.

Όταν έχουν ληφθεί όλες οι απαιτούμενες φωτογραφίες, ο χρήστης μέσω ειδικού παραθύρου επιλέγει ακριβώς την περιοχή που επιθυμεί να σαρωθεί. Μέσα από την εντολή “Probe” ρυθμίζεται η πυκνότητα της σάρωσης, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα στα σημεία του νέφους. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η πυκνότητα ρυθμίστηκε στα 2mm για τις ανάγκες αποτύπωσης της λεπτομέρειας του αντικειμένου και η κάθε σάρωση διαρκούσε περίπου 20 λεπτά.

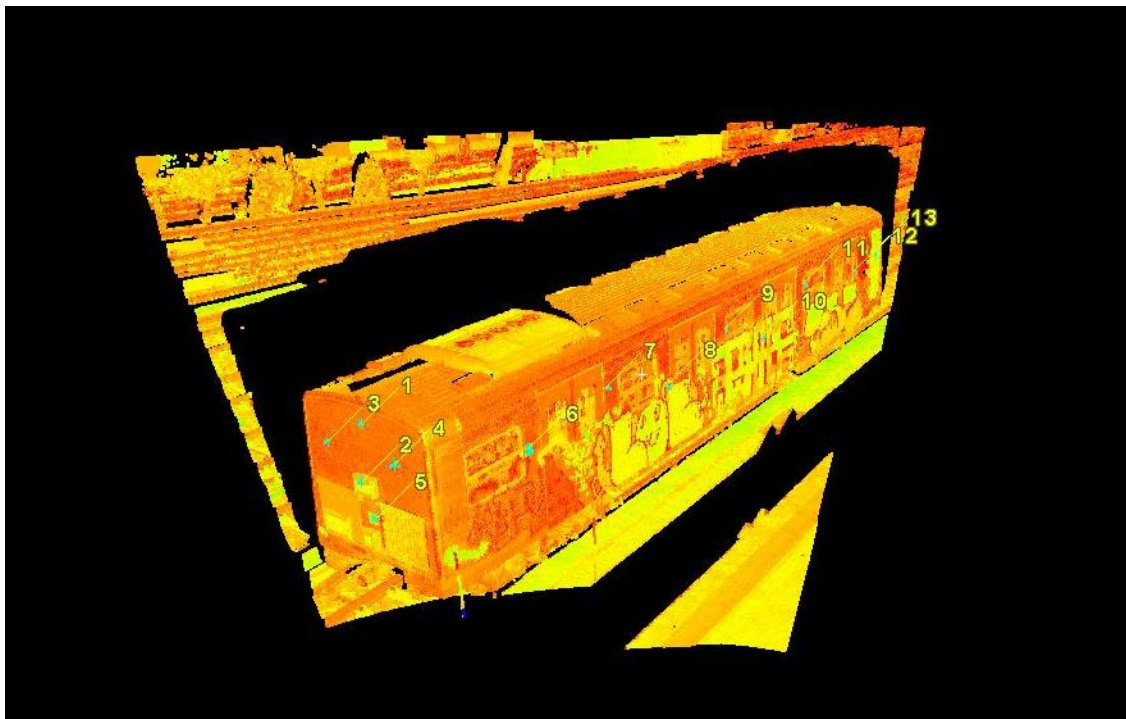
Επόμενο βήμα ήταν η σάρωση των ανακλαστικών στόχων. Από το παράθυρο Modelspace του Cyclone, ο χρήστης επιλέγει είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα τους στόχους που φαίνονται από την συγκεκριμένη στάση. Στη συνέχεια αυτοί ονομάζονται κατάλληλα, ώστε να αναγνωριστούν αυτόματα από το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία της συνένωσης, και τέλος, με την εντολή “acquire targets” σαρώνονται. Κάθε στάση «έβλεπε» 13 στόχους (5 στη «μικρή» και 8 στη «μεγάλη» πλευρά του βαγονιού αντίστοιχα) και η λεπτομερής σάρωσή τους διαρκούσε 5-10 λεπτά από κάθε στάση.

Στην εικόνα 3.8 φαίνεται ένα παράδειγμα σάρωσης στόχου και ο προσδιορισμός του κέντρου του από το Cyclone.

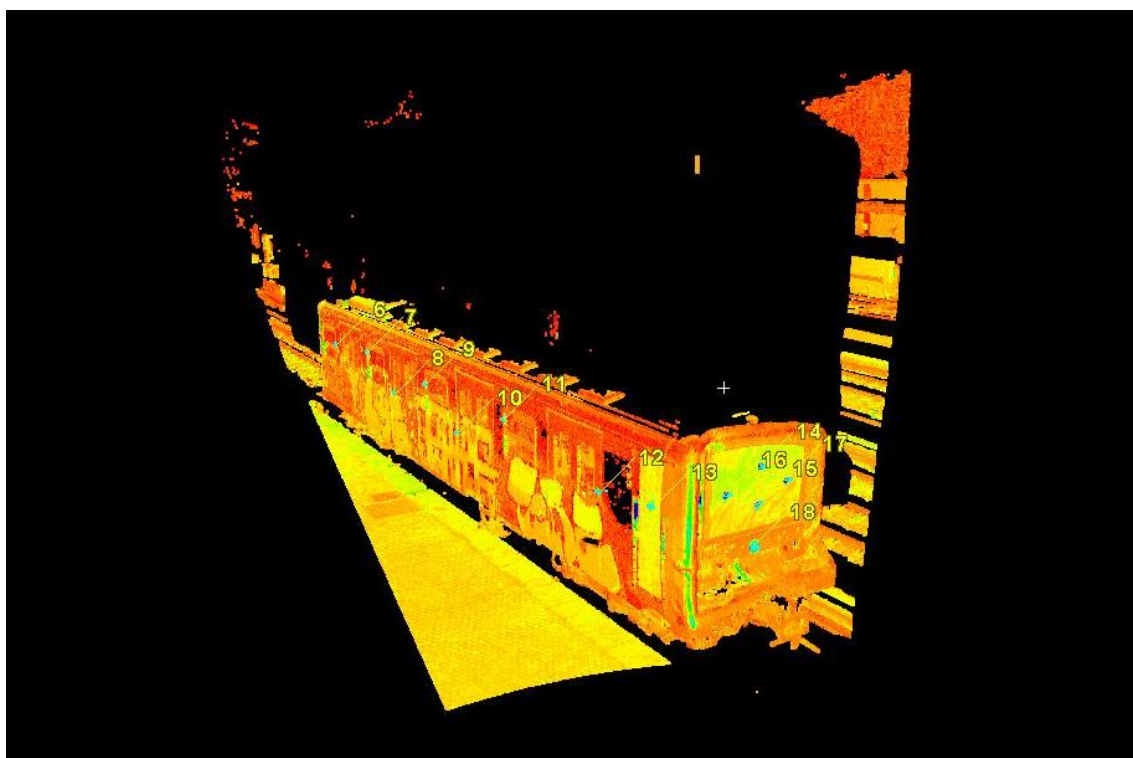


**Εικόνα 3.8 :** Λεπτομερής σάρωση του στόχου 24 και προσδιορισμός του κέντρου από το Cyclone.

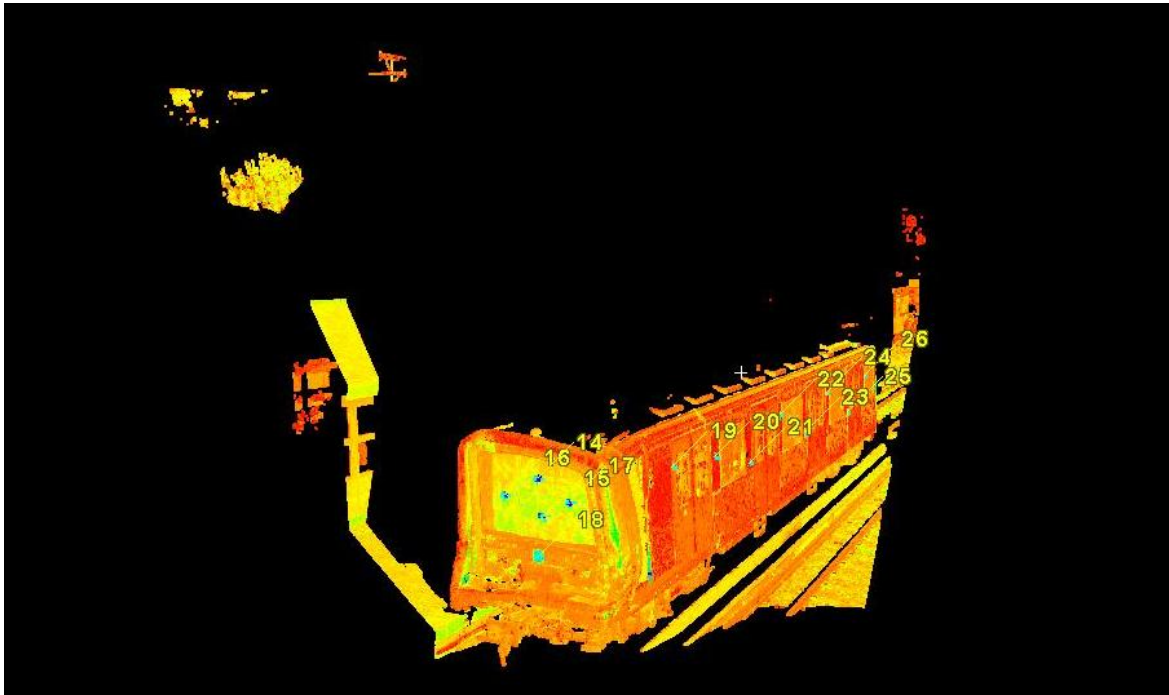
Ο συνολικός αριθμός σημείων που προέκυψαν είναι 22.239.924 για την στάση Α, 18.968.838 για την Β, 27.489.349 για την Γ και 24.540.463 για την Δ. Στις εικόνες 3.9.α,β,γ,δ φαίνονται τα παράγωγα των τεσσάρων σαρώσεων.



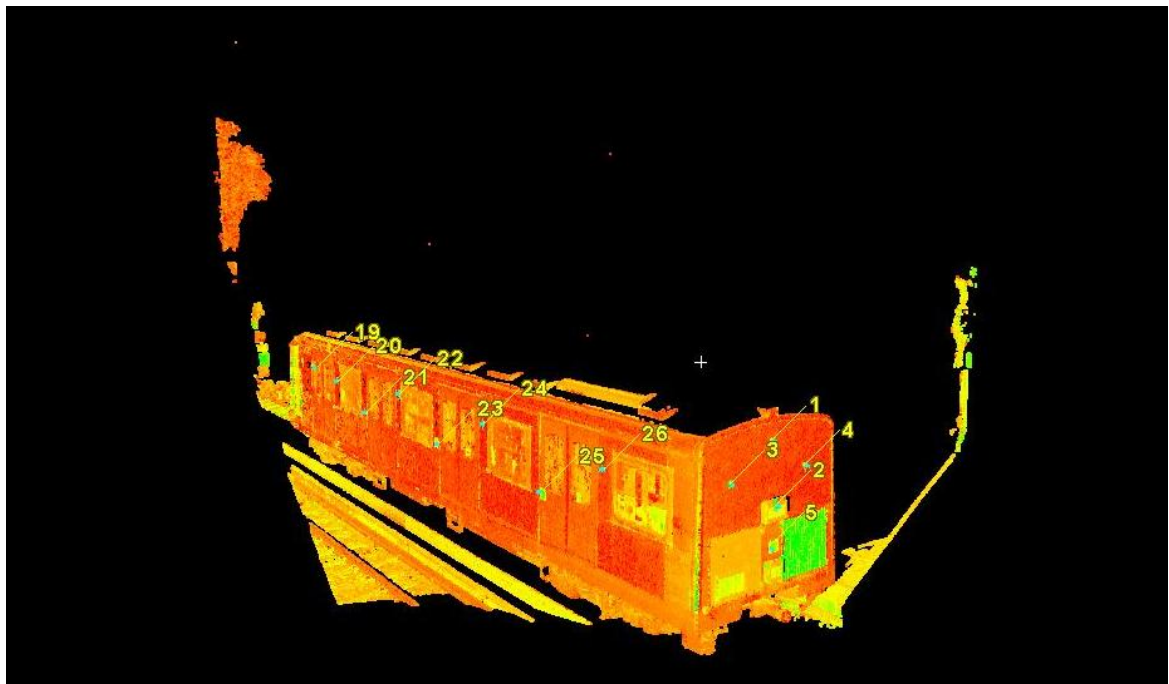
Εικόνα 3.9.α



Εικόνα 3.9.β



Εικόνα 3.9.γ



Εικόνα 3.9.δ

**Εικόνα 3.9 :** Τα παράγωγα νέφη σημείων από τις τέσσερις θέσεις σάρωσης.

## Κεφάλαιο 4 : Επεξεργασία δεδομένων

### 4.1 Εισαγωγή

Μετά τη σάρωση του βαγονιού ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων, ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο του. Για την εν λόγω επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Cyclone 7.0.3 και Geomagic v12. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία συνένωσης των νεφών, ο καθαρισμός του συνολικού νέφους από τον θόρυβο, και η επεξεργασία του έως την παραγωγή της τελικής μοντελοποιημένης επιφάνειας.

### 4.2 Συνένωση των νεφών

Η σάρωση του βαγονιού έγινε από 4 στάσεις του οργάνου (βλ. ενότητα 3.5). Κάθε στάση υλοποιούνταν σε τυχαίο σημείο, οπότε και σε αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων. Με τη διαδικασία της συνένωσης (registration) επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν ορθότερη μετακίνηση και στροφή των νεφών, ώστε να αναφέρονται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

Η συνένωση μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

- Με τη χρήση ειδικών στόχων που αναγνωρίζονται αυτόματα από το λογισμικό (target registration). Σε αυτή την περίπτωση για κάθε συνένωση χρειάζονται τουλάχιστον 3 κοινοί στόχοι, με τη χρήση των οποίων η μια από τις δύο σαρώσεις μετασχηματίζεται κατάλληλα, ώστε να αναφέρεται στο σύστημα αναφοράς της δεύτερης. Επειδή οι στόχοι σαρώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια από το νέφος σημείων, συνήθως αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια συνένωσης. Στο τέλος της διαδικασίας δίνεται από το λογισμικό αναφορά για το σφάλμα κάθε στόχου.
- Με τη χρήση ομόλογων σημείων (cloud registration). Έχοντας οπωσδήποτε πάνω από 30% επικάλυψη στα νέφη που πρόκειται να συνενωθούν, ο χρήστης επιλέγει τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία. Τέτοια μπορούν να είναι



συνήθως γωνίες αντικειμένων ή άλλα ευδιάκριτα και στις δύο σαρώσεις σημεία. Με βάση αυτά εκτελείται από το λογισμικό αλγόριθμος ταύτισης των νεφών (αλγόριθμος κοντινότερου σημείου ICP) και στη συνέχεια παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) της συνένωσης.

- Με γεωαναφορά (georeference). Με γνωστές τις συντεταγμένες τουλάχιστον τριών κοινών σημείων–στόχων, σε κάποιο σύστημα αναφοράς, τα νέφη μετατίθενται και στρέφονται κατάλληλα, ώστε να αναφέρονται σε αυτό. Η διαδικασία είναι παρόμοια με την πρώτη περίπτωση, δηλαδή με την χρήση στόχων, με τη διαφορά ότι στην παρούσα περίπτωση δεν διατηρείται ως «μητρικό» το σύστημα αναφοράς του ενός νέφους, αλλά μετασχηματίζονται και τα δύο ως προς το τρίτο σύστημα, δηλαδή αυτό των γνωστών στόχων.

Σε κάθε περίπτωση χρειάζονται τουλάχιστον τρία σημεία. Αυτό δικαιολογείται διότι ο βαθμός ελευθερίας κατά τη διαδικασία της συνένωσης είναι έξι αφού οι άγνωστοι είναι οι τρεις μεταθέσεις και οι τρεις στροφές γύρω από τους άξονες X, Y, Z. Κατά αυτόν τον τρόπο ένα νέφος, με βάση τις δεσμεύσεις από τα τρία σημεία που αναφέρθηκαν, μετακινείται και στρέφεται στον χώρο, χωρίς φυσικά να αλλάζει η γεωμετρία του.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αυτόματης αναγνώρισης στόχων, όπως και είχε σχεδιαστεί αρχικά, αφού οι στόχοι σαρώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τα υπόλοιπα σημεία και έτσι τα αποτελέσματα της συνένωσης είναι πιο ακριβή.

Υπήρχαν τέσσερα νέφη σημείων από τις τέσσερις θέσεις σάρωσης, οπότε η διαδικασία της συνένωσης εφαρμόστηκε τρεις φορές.

Μετά από δοκιμές φάνηκε ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα δίνει ο εξής συνδυασμός : Πρώτα συνενώθηκε η σάρωση Β, με τη Γ, και μετά το σύνολό τους με τη Δ. Τέλος, το σύνολο των τριών συνενώθηκε με την Α, δηλαδή τη σάρωση της οροφής (βλ. Σχήμα 3.3). Επιλέχθηκε να συνενωθεί τελευταία η σάρωση της οροφής διότι λόγω της μεγαλύτερης απόστασής της από το αντικείμενο, αλλά κυρίως λόγω των δυσμενέστερων γωνιών σάρωσης, παρουσίασε τα μεγαλύτερα προβλήματα στην ταύτιση των στόχων. Έτσι, συνενώνοντας την τελευταία, είχε διαθέσιμους

περισσότερους στόχους (και από τις 2 πλευρές του βαγονιού), ώστε να υπάρχει η δυνατότητα απόρριψης όσων δεν πληρούν την απαιτούμενη ακρίβεια.

Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι κοινοί στόχοι των θέσεων σάρωσης.

Θέσεις Σάρωσης		Κοινοί στόχοι
A	Δ	1,2,3,4,5
A	B	6,7,8,9,10,11,12,13
B	Γ	14,15,16,17,18
Γ	Δ	19,20,21,22,23,24,25,26

**Πίνακας 4.1** : Οι κοινοί στόχοι των θέσεων σάρωσης.

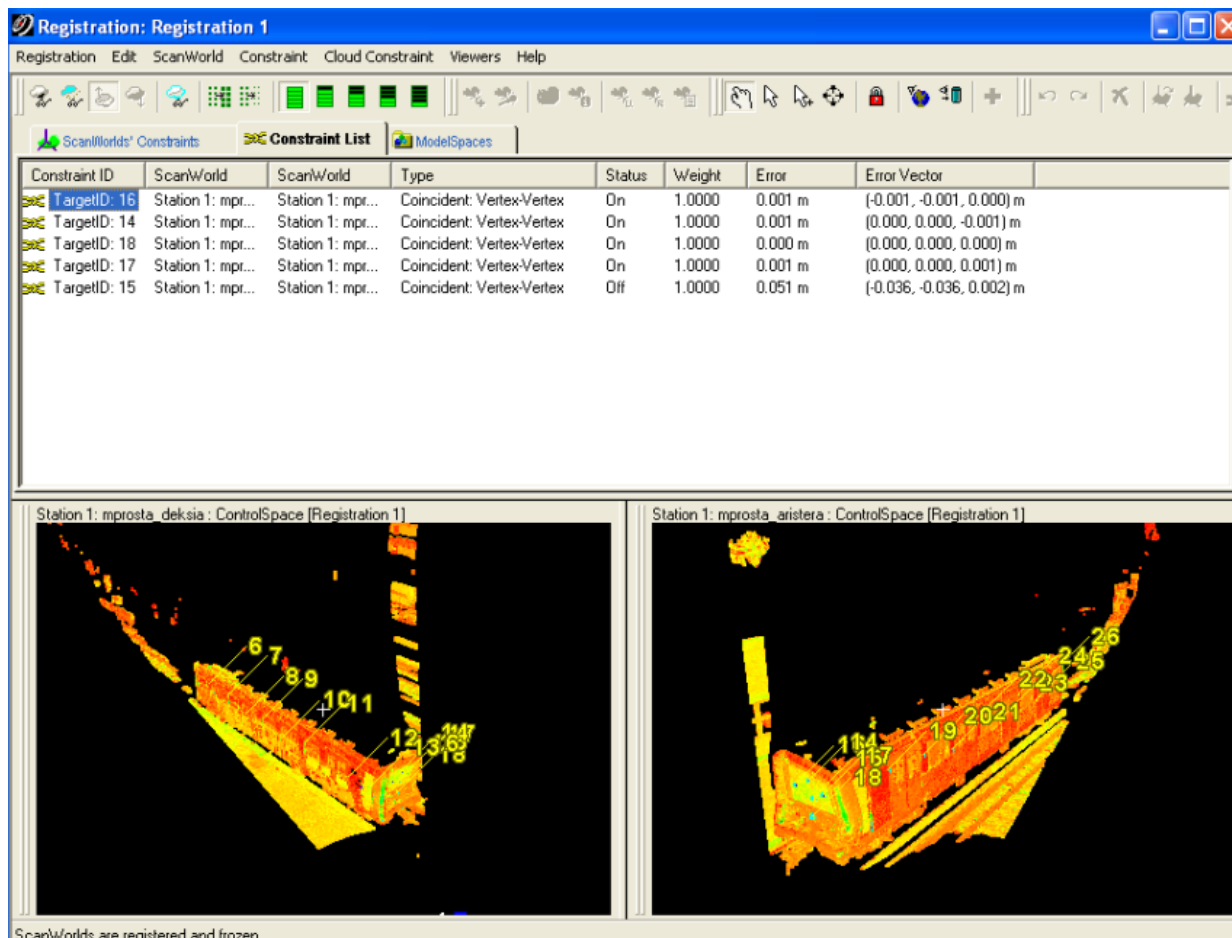
Με επιλογή της βάσης δεδομένων στην οποία βρίσκονται οι μετρήσεις, μέσα από την εντολή “configure->databases” εμφανίζονται στο κεντρικό παράθυρο “navigator” του Cyclone, τα scanworlds των τεσσάρων σαρώσεων. Έπειτα από την επιλογή “create->registration” ενεργοποιείται το παράθυρο της συνένωσης. Εκεί ο χρήστης επιλέγει τις σαρώσεις που επιθυμεί να συνενωθούν μέσα από την εντολή “scanworld->add scanworld”.

Επόμενο βήμα είναι η εντολή “constraints->auto add constraint” με την οποία εμφανίζονται οι κοινοί στόχοι των δύο scanworlds. Παράλληλα, με ενεργοποίηση της επιλογής “modelspace->control space”, εμφανίζονται οι δύο σαρώσεις σε κάθε ένα από τα παράθυρα, ώστε ο χρήστης να μπορεί να ελέγχει τους στόχους που θα ταυτιστούν ή να επιλέξει ομόλογα σημεία σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη μέθοδος συνένωσης.

Στη συνέχεια επιλέγεται η εντολή “registration->register” οπότε και οι κοινοί στόχοι ταυτίζονται μεταξύ τους. Από το λογισμικό δίνεται το υπολογισμένο σφάλμα κάθε στόχου. Αν αυτό είναι μη αποδεκτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απενεργοποιήσει τον αντίστοιχο στόχο. Οι απενεργοποιημένοι στόχοι παύουν να λαμβάνουν μέρος στη συνένωση και, επιλέγοντας ξανά την εντολή register, επαναλαμβάνεται η διαδικασία μόνο με τους ενεργοποιημένους στόχους.

Στην εικόνα 4.1 φαίνεται το παράθυρο της συνένωσης στο λογισμικό Cyclone. Οι τέσσερις πρώτοι στόχοι είναι ενεργοποιημένοι (status on) ενώ ο τελευταίος έχει

απενεργοποιηθεί από τον χρήστη (status off) γιατί παρουσιάζει μη ικανοποιητικό σφάλμα (error).



**Εικόνα 4.1 :** Το παράθυρο της συνένωσης στο λογισμικό Cyclone.

Μετά από δοκιμές και την επιλογή των στόχων που παρέχουν την πιο ακριβή συνένωση, επιλέγεται “registration->create scanworld/freeze registration” και “registration->create and open model space” για να δημιουργηθεί το συνενωμένο αρχείο.

Επιλέγοντας “registration->Show diagnostics” το λογισμικό παρέχει αναφορά για το μέσο σφάλμα των ενεργοποιημένων (enabled constraints) και των απενεργοποιημένων (disabled constraints) στόχων, όπως και το διάνυσμα του σφάλματος για κάθε στόχο ξεχωριστά. Το κάθε αρχείο αναφοράς αποθηκεύεται σε μορφή \*.txt .

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται συνολικά όλες οι αναφορές που έδωσε το λογισμικό για κάθε συνένωση και κάθε στόχο αναλυτικά.

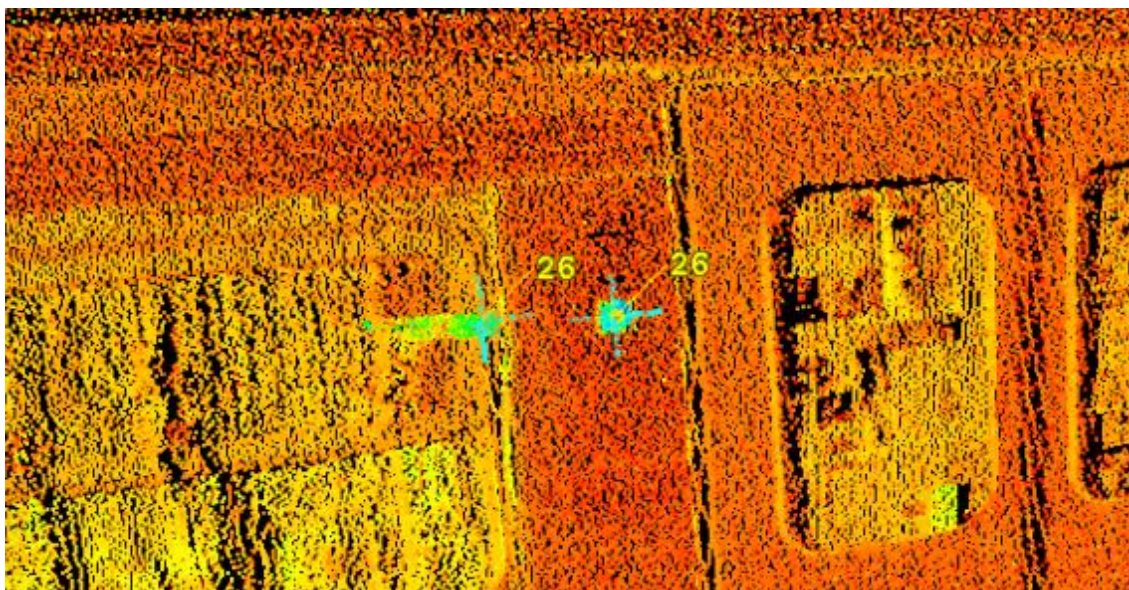
Scanworlds :	B	+	Γ	
Όνομα Στόχου	Βάρος	On/Off	Σφάλμα(m)	Διάνυσμα Σφάλματος (m)
14	1.000	on	0.001	( 0.000, 0.000, -0.001)
15	1.000	off	0.051	(-0.036, -0.036, 0.002)
16	1.000	on	0.001	(-0.001, -0.001, 0.000)
17	1.000	on	0.001	( 0.000, 0.000, 0.001)
18	1.000	on	0.000	( 0.000, 0.000, 0.000)
Mean absolute error for enabled constraints (m)				0.001
Mean absolute error for disabled constraints (m)				0.051

Scanworlds :	B-Γ	+	Δ	
Όνομα Στόχου	Βάρος	On/Off	Σφάλμα(m)	Διάνυσμα Σφάλματος (m)
19	1.000	off	0.268	( 0.000, -0.267, 0.020)
20	1.000	off	0.050	(-0.001, 0.022, -0.045)
21	1.000	on	0.001	( 0.000, 0.001, 0.000)
22	1.000	off	0.117	(-0.015, 0.116, -0.007)
23	1.000	on	1.002	( 0.000, 0.002, 0.000)
24	1.000	on	0.002	( 0.000, -0.002, 0.000)
25	1.000	on	0.001	( 0.000, -0.001, 0.000)
26	1.000	off	0.214	(-0.043, 0.202, 0.053)
Mean absolute error for enabled constraints (m)				0.001
Mean absolute error for disabled constraints (m)				0.162

Scanworlds :	B-Γ-Δ	+	A	
Όνομα Στόχου	Βάρος	On/Off	Σφάλμα(m)	Διάνυσμα Σφάλματος (m)
1	1.000	off	0.031	( 0.030, 0.001, -0.007)
2	1.000	on	0.002	( 0.000, -0.002, 0.000)
3	1.000	on	0.001	( 0.000, -0.001, 0.000)
4	1.000	off	0.034	(-0.026, -0.008, 0.021)
5	1.000	off	0.155	( 0.151, 0.007, -0.036)
6	1.000	off	0.139	( 0.022, 0.105, 0.089)
7	1.000	off	0.369	( 0.041, -0.365, -0.036)
8	1.000	off	0.309	( 0.043, -0.293, -0.087)
9	1.000	off	0.062	( 0.020, -0.057, -0.016)
10	1.000	off	0.030	( 0.006, -0.027, -0.011)
11	1.000	on	0.003	( 0.000, 0.003, 0.000)
12	1.000	off	0.075	( 0.007, -0.074, 0.010)
13	1.000	off	0.181	(-0.010, -0.180, 0.002)
Mean absolute error for enabled constraints (m)				0.002
Mean absolute error for disabled constraints (m)				0.138

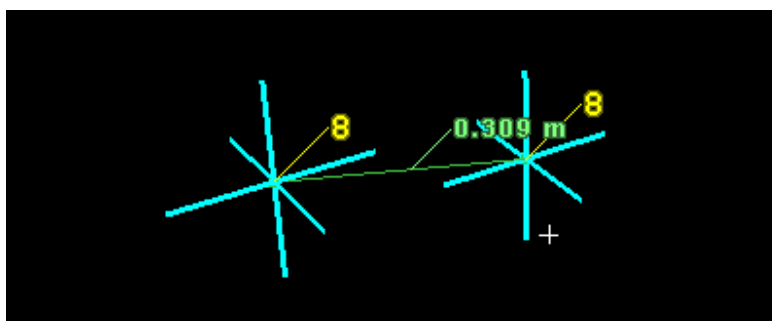
**Πίνακας 4.2 :** Τα σφάλματα κάθε στόχου στη συνένωση των νεφών.

Το σφάλμα των ενεργοποιημένων στόχων δεν ξεπερνούσε τα 3mm, ενώ στους απενεργοποιημένους παρατηρείται σφάλμα έως και 37cm. Τέτοιου μεγέθους αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται είτε σε λάθος επιλογή σημείου από τον χειριστή του οργάνου κατά τη διάρκεια της σάρωσης, είτε σε λάθος αναγνώριση του στόχου από το σαρωτή λόγω δυσμενών συνθηκών όπως οξείες γωνίες σάρωσης, μεγάλες αποστάσεις, διερχόμενα αντικείμενα. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται παράδειγμα χονδροειδούς σφάλματος στη σάρωση των στόχων.



**Εικόνα 4.2 :** Χονδροειδές σφάλμα στο στάδιο της αναγνώρισης και σάρωσης των στόχων, κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.

Τέλος, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της απόκλισης κάθε στόχου στον χώρο από την εντολή “registration->view interim results” (Εικόνα 4.3).

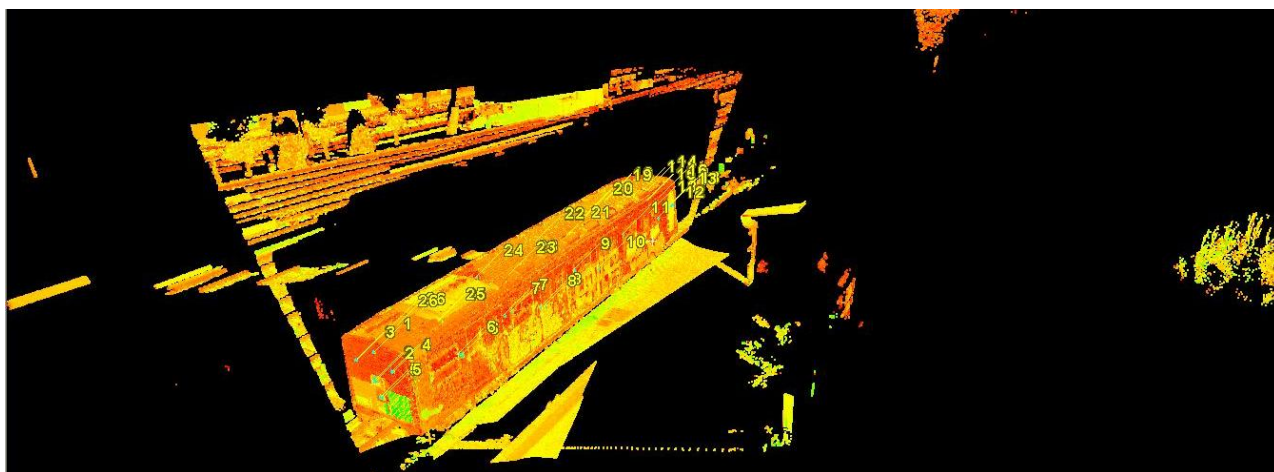


**Εικόνα 4.3 :** Η επιλογή View interim Results του λογισμικού Cyclone κατά τη διαδικασία της συνένωσης.

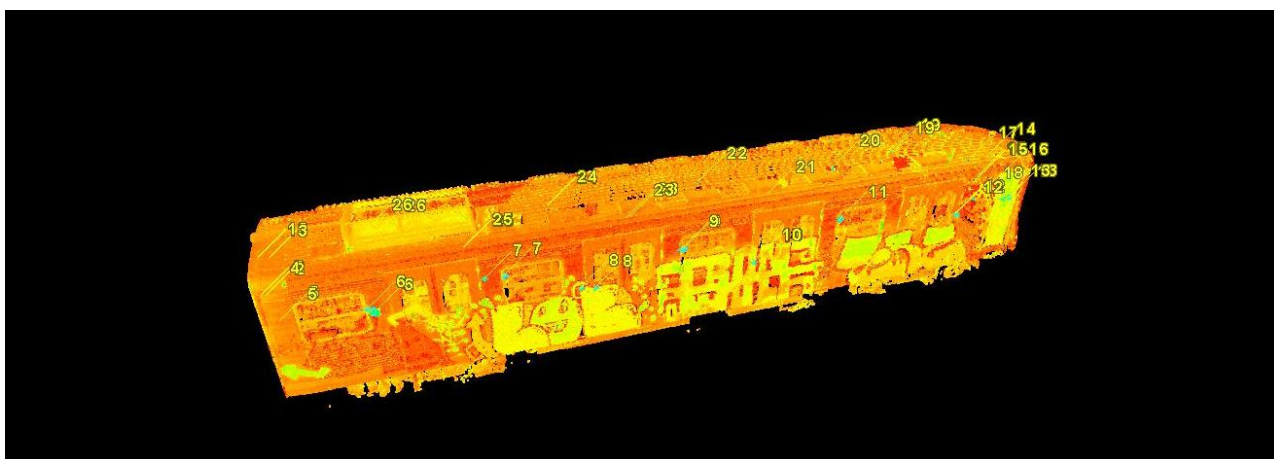
### 4.3 Καθαρισμός θορύβου στο Cyclone

Μετά τη συνένωση των νεφών ακολουθεί ένας πρώτος καθαρισμός του συνολικού πλέον νέφους με την αφαίρεση περιττών σημείων. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αναπόφευκτα αποτυπώνονται και σημεία που δεν ανήκουν στο αντικείμενο μελέτης. Τέτοια σημεία περιγράφουν τριγύρω δένδρα, την αποβάθρα, διπλανές σιδηροτροχιές ή και κτίρια, και πρέπει να αφαιρεθούν. Αυτό συμβαίνει με την επιλογή “fence->delete” από το επιλεγμένο modelspace του τελικού νέφους. Κατά αυτόν τον τρόπο τα σημεία μειώνονται από 93.238.574 σε 70.905.565.

Στην εικόνα 4.4 φαίνεται το νέφος πριν και μετά τον καθαρισμό στο Cyclone.



Εικόνα 4.4 α



Εικόνα 4.4 β

**Εικόνα 4.4 :** Το νέφος σημείων πριν (4.14 α) και μετά (4.14 β) τον καθαρισμό στο Cyclone.

#### 4.4 Εισαγωγή του νέφους στο Geomagic

Επόμενο βήμα μετά τη συνένωση των νεφών ήταν η εισαγωγή του συνολικού νέφους σημείων στο Geomagic για να ακολουθήσει η διαδικασία της μοντελοποίησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο παρουσιάστηκε πρόβλημα λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων. Συγκεκριμένα, ήταν αδύνατον αυτά να εισαχθούν απευθείας στο πρόγραμμα.

Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος έγινε διαχωρισμός του νέφους στο Cyclone σε 5 τμήματα των 15 εκατομμυρίων σημείων περίπου το καθένα. Μέσα από την επιλογή “copy fenced to new model space” το επιλεγμένο κάθε φορά τμήμα του βαγονιού μεταφέρεται σε διαφορετικό Model space, ώστε να εξαχθεί αυτόνομα.

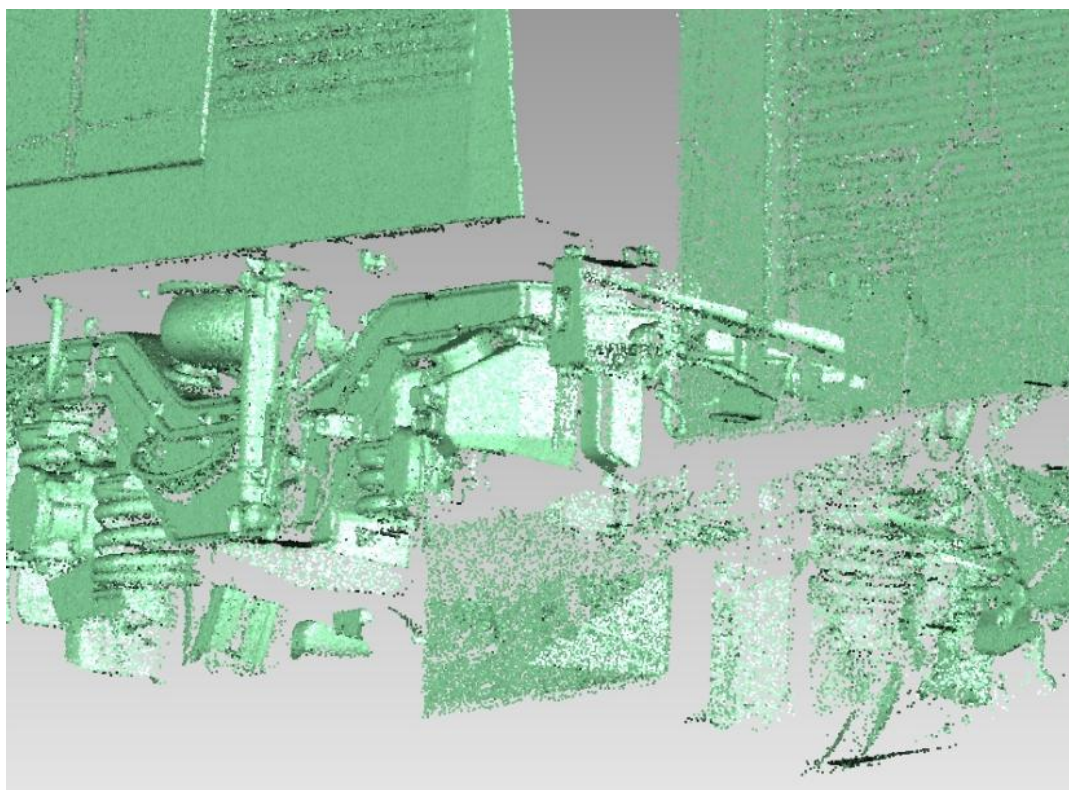
Κατά αυτόν τον τρόπο διαχωρίστηκαν το μπροστά τμήμα, το πίσω τμήμα, το αριστερά, το δεξιά και η οροφή. Η εξαγωγή του καθενός έγινε σε μορφή \*.xyz, την οποία και αναγνωρίζει το Geomagic. Η επεξεργασία κάθε τμήματος έγινε ξεχωριστά με τα εργαλεία του προγράμματος και στη συνέχεια συνενώθηκαν όλα μαζί στο ενιαίο αποτέλεσμα (βλ.ενότητα 4.6). Συγκεκριμένα, η αριστερή και η δεξιά πλευρά, πέρα από τον πρώτο διαχωρισμό στο Cyclone, χωρίστηκαν ξανά σε τρία κομμάτια, η κάθε μία μετά την εισαγωγή τους στο Geomagic. Αυτό συνέβη για μεγαλύτερη ευκολία επεξεργασίας των αρχείων αλλά και καλύτερα αποτελέσματα, αφού το Geomagic γενικά διαχειρίζεται καλύτερα αρχεία ως 5 εκατομμυρίων σημείων.(Lerma et al., 2008).

#### 4.5 Βελτιστοποίηση νέφους και αφαίρεση θορύβου

Μετά την εισαγωγή του νέφους των σημείων στο Geomagic, ακολούθησε η βελτιστοποίησή του, ώστε να υπάρξει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στην παραγωγή της μοντελοποιημένης επιφάνειας. Ήταν λοιπόν απαραίτητη η αφαίρεση θορύβου από τα δεδομένα. Στο Cyclone είχε γίνει μια πρώτη αφαίρεση των περιττών σημείων, η οποία όμως έπρεπε να συνεχιστεί με τα εξειδικευμένα εργαλεία του Geomagic.

Πρώτο βήμα μετά την εισαγωγή ενός νέφους σημείων στο Geomagic είναι η εφαρμογή της εντολής “Points->shade” αφού στην αρχή το νέφος φαίνεται μαύρο και ο χρήστης μπορεί να διακρίνει μόνο το περίγραμμά του. Μετά την εφαρμογή της εντολής τα σημεία χρωματίζονται με πράσινο και είναι πλέον ευδιάκριτες όλες οι λεπτομέρειες του νέφους. Έπειτα ακολουθεί η μείωση του θορύβου είτε χειροκίνητα είτε με τη χρήση αλγορίθμων.

Αρχικά διαγράφηκαν σημεία τα οποία δεν ανήκαν στην επιφάνεια του βαγονιού και δεν ήταν εμφανής ο διαχωρισμός τους στο Cyclone. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων σημείων ήταν όλο το σασί του βαγονιού, αφού δεν υπήρχε καθόλου πληροφορία για την ένωσή του με το υπόλοιπο αντικείμενο. Επίσης, τα δεδομένα ήταν ελλιπή, αφού μεγάλο κομμάτι του αντικειμένου βρισκόταν πίσω από την ηλεκτροφόρο σιδηροτροχιά, με αποτέλεσμα να μην έχει σαρωθεί (Εικόνα 4.5). Αυτό φυσικά ήταν αναμενόμενο από την επιλογή των θέσεων σάρωσης, απλά έγινε πιο εμφανές μετά το διαχωρισμό των δεδομένων στα θεματικά επίπεδα. Η διαγραφή αυτών των σημείων έγινε με την επιλογή τους και το πλήκτρο delete.



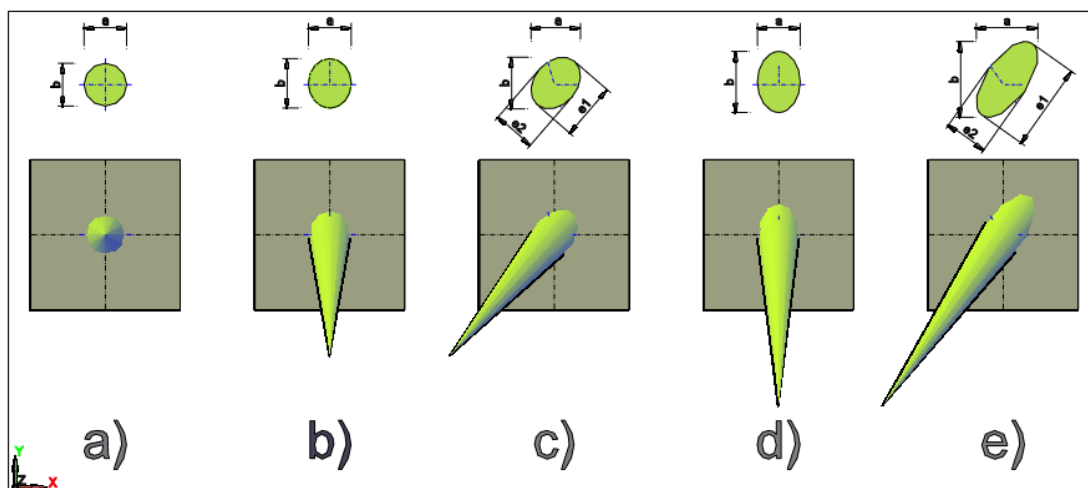
**Εικόνα 4.5 :** Ελλιπή δεδομένα στο σασί του βαγονιού τα οποία διαγράφηκαν.



Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εντολή το “select outliers”. Ο αλγόριθμος αυτός επιλέγει όλα τα σημεία τα οποία απέχουν κάποια απόσταση από το αντικείμενο, με βάση πάντα ένα επίπεδο ευαισθησίας που του ορίζει ο χρήστης.

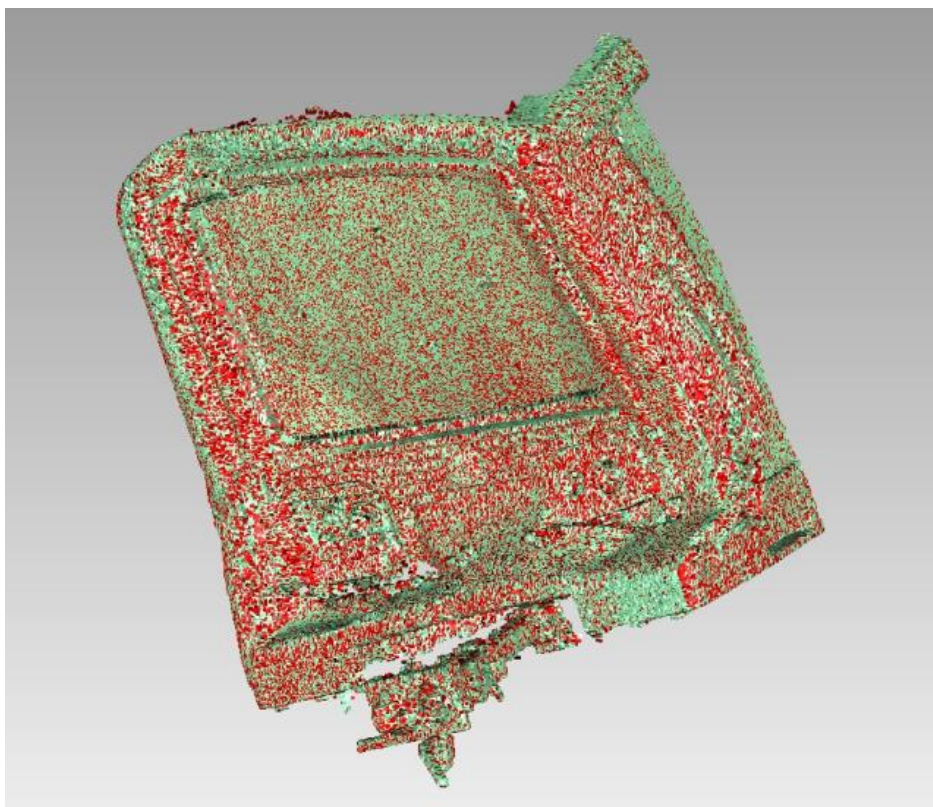
Γενικά, κύρια αιτία του θορύβου είναι οι γυαλιστερές επιφάνειες, τα ιδιαίτερα ανακλαστικά υλικά (μέταλλο, μάρμαρο, ασβεστολιθικά πετρώματα) καθώς και οι οξείες γωνίες σάρωσης. Σε αυτή την εφαρμογή, το υλικό κατασκευής του βαγονιού είναι το μέταλλο, κάτι που δημιουργεί θλάση της ακτίνας του laser. Αυτό σημαίνει ότι η ακτίνα διαχέεται και επιστρέφει ένα μικρό της μέρος ή και καθόλου στο όργανο δημιουργώντας θόρυβο στο νέφος.

Στην εικόνα 4.6 φαίνεται το αποτύπωμα της ακτίνας του σαρωτή ανάλογα με τη γωνία σάρωσης. Οι οξείες γωνίες σάρωσης, λοιπόν, δημιουργούν αποτύπωμα μειωμένης ακρίβειας, το οποίο θα δημιουργήσει «θορυβώδεις» μετρήσεις.



**Εικόνα 4.6 :** Αποτύπωμα της ακτίνας laser ανάλογα με τη γωνία σάρωσης (Lerma et al., 2008).

Στο Geomagis το νέφος των σημείων παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα. Με κόκκινο παρουσιάζονται τα επιλεγμένα κάθε φορά σημεία. Στην εικόνα 4.7 φαίνονται τα επιλεγμένα ως θόρυβος σημεία από το εργαλείο “select outliers” με επίπεδο ευαισθησίας την προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα τιμή 67% για το μπροστινό τμήμα.



**Εικόνα 4.7 :** Επιλεγμένα ως θόρυβος σημεία από το εργαλείο “select outliers” .

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόστηκε 3-4 φορές σε κάθε επιμέρους τμήμα με ευαισθησία 60-80% κάθε φορά, ώστε να απαλειφθεί μεγάλο κομμάτι του θορύβου χωρίς παράλληλα να χαθεί ουσιώδης πληροφορία.

Επόμενο βήμα ήταν η εντολή “reduce noise”. Αυτό το εργαλείο υλοποιεί ένα θεωρητικό επίπεδο και μετακινεί στις στατιστικά σωστές θέσεις τα σημεία που αποκλίνουν, με βάση τις ρυθμίσεις που επιλέγει ο χρήστης. Ανάλογα με το αντικείμενο επεξεργασίας ο χρήστης επιλέγει ανάμεσα σε 3 πιθανούς αλγορίθμους (free form shapes , prismatic shapes-conservative , prismatic shapes-aggressive). Ο “free form shapes” αφορά σχήματα ελεύθερης μορφής και δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στο ανάγλυφο του αντικειμένου. Ο “prismatic shapes-conservative” διατηρεί την οξύτητα των χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου και προσπαθεί να εφαρμόσει πάνω του γεωμετρικές επιφάνειες όπως σφαίρες, επίπεδα, κώνους. Τέλος, ο “prismatic shapes-aggressive” λειτουργεί παρόμοια με τον προηγούμενο, εφαρμόζει όμως μεγαλύτερη αφαίρεση θορύβου, καταλήγοντας σε ένα ομαλότερο αποτέλεσμα.

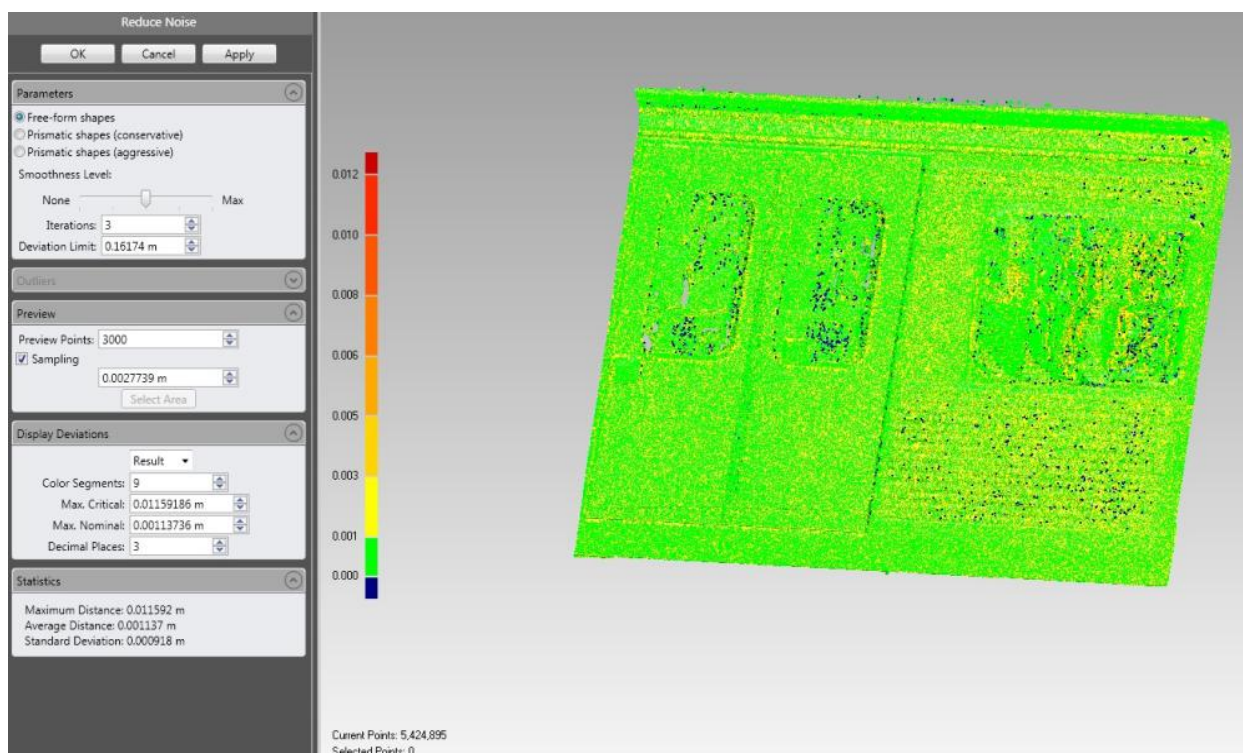
Έπειτα ρυθμίζεται το επίπεδο ομαλότητας (smoothness level) σε μια κλίμακα από 0 έως 4, ο αριθμός των επαναλήψεων (iterations) και το όριο πάνω από το οποίο ένα σημείο δεν επιτρέπεται να μετακινηθεί, δηλαδή, το όριο απόκλισης αναγλύφου (deviation limit).

Τέλος, από το παράθυρο “outliers” του εργαλείου υπάρχει η επιλογή select ή delete των σημείων που απέχουν παραπάνω από μια καθορισμένη απόσταση (threshold) και δεν μετακινούνται.

Πριν την εφαρμογή της εντολής υπάρχει η δυνατότητα προεπισκόπησης (preview) του αποτελέσματος. Για ένα δείγμα των σημείων το λογισμικό υπολογίζει την εφαρμογή τριγώνων με βάση την επιλεγμένη μείωση θορύβου, ώστε ο χρήστης να μπορεί να κρίνει αν το αποτέλεσμα θα είναι ικανοποιητικό ή θα χρειάζεται περαιτέρω μείωση.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ο free form shapes για όλα τα τμήματα του βαγονιού, αφού αφορά γενικές μορφές σχημάτων και δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Το επίπεδο ομαλότητας (smoothness level) ρυθμιζόταν στο 2-3 ανάλογα με το εκάστοτε θεματικό επίπεδο και οι επαναλήψεις (iterations) στο 3-4. Γενικά παράγονται καλύτερα αποτελέσματα θέτοντας τις επαναλήψεις του αλγορίθμου σε μεγαλύτερο βαθμό από το επίπεδο ομαλότητας (Lerma et al., 2008). Τέλος στο deviation limit το λογισμικό θέτει μόνο του μια τιμή λαμβάνοντας υπ’όψιν το μοντέλο, η οποία διατηρήθηκε σε όλα τα τμήματα ως βέλτιστη.

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου το λογισμικό παρουσιάζει χρωματική ανάλυση της μετακίνησης των σημείων. Επίσης, παρουσιάζει στατιστικά αποτελέσματα, τα οποία δείχνουν τη μέγιστη μετακίνηση που υπέστη κάποιο σημείο (maximum distance), τη μέση μετακίνηση όλων των σημείων (average distance), και την τυπική τους απόκλιση (standard deviation), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8.



**Εικόνα 4.8 :** Αναφορά για τη μετακίνηση των σημείων με σκοπό την απαλοιφή του θορύβου.

Τελευταίο στάδιο πριν την παραγωγή των τριγώνων της μοντελοποιημένης επιφάνειας ήταν η μείωση των σημείων. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε ήταν το “uniform sample”. Σύμφωνα με αυτό το εργαλείο, το λογισμικό μειώνει τα σημεία με βάση μια δοσμένη απόσταση η οποία αφορά τις ομαλές επιφάνειες. Παράλληλα, ο χρήστης επιλέγει το πόση σημασία επιθυμεί να δοθεί στο ανάγλυφο μέσα από την επιλογή *curvate priority* η οποία έχει διακύμανση από 1 έως 11, ώστε να υπολογιστεί από το λογισμικό αναλόγως η ελάχιστη απόσταση μείωσης σημείων για τις περιοχές με ανάγλυφο.

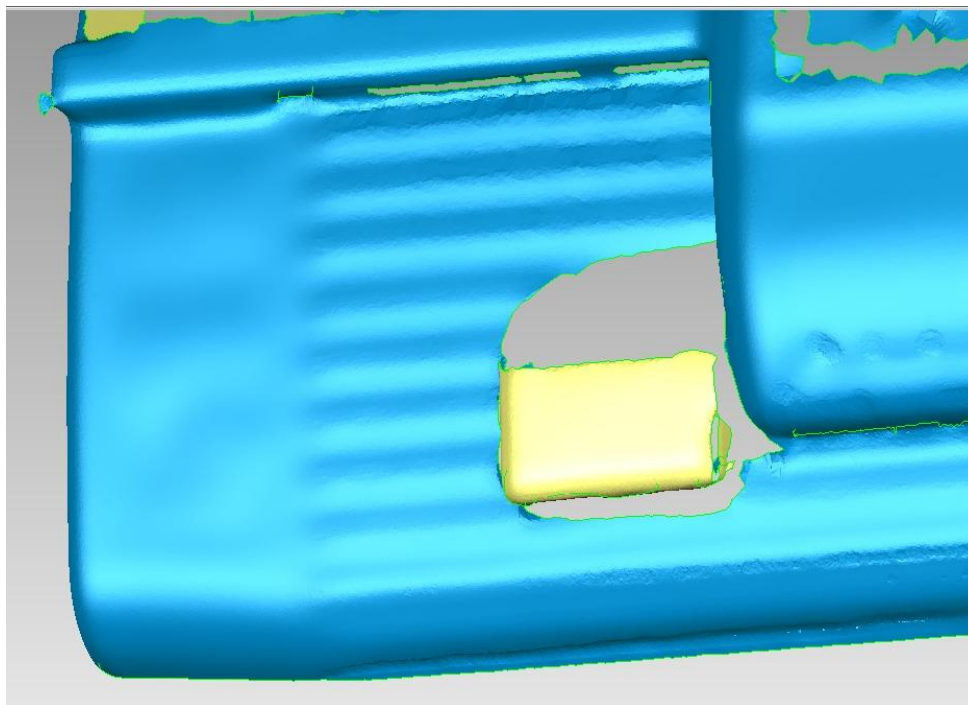
Κατά αυτόν τον τρόπο σε όλα τα τμήματα το *curvate priority* τέθηκε στο μέγιστο (*max*) και η απόσταση ανά την οποία το λογισμικό διατηρούσε σημεία (*absolute spacing*) κυμαινόταν από 2 έως 5 mm ανάλογα με το θεματικό επίπεδο και την προεπιλεγμένη τιμή που έδινε το πρόγραμμα. Έτσι, τα σημεία μειώνονταν στο 10% περίπου κάθε φορά, κάνοντας το αρχείο πιο εύκολα διαχειρίσιμο κατά το στάδιο παραγωγής τριγώνων από το πρόγραμμα, και παράλληλα διατηρώντας πάντα την απαραίτητη πληροφορία, ώστε να μην χαθεί το ανάγλυφο.

## 4.6 Διαδικασία της μοντελοποίησης

Μετά τη βελτιστοποίηση του νέφους των σημείων, επόμενο στάδιο ήταν η παραγωγή τριγώνων από αυτό με την επιλογή “wrap” του Geomagic. Το πρόγραμμα για κάθε σημείο του νέφους δημιουργεί κατά μέσο όρο 2 τρίγωνα. Για κάθε θεματικό επίπεδο εφαρμόστηκε ξεχωριστά η εντολή wrap. Τα μοντέλα που παρήχθησαν παρουσίαζαν πολλά προβλήματα, η αντιμετώπιση των οποίων αναλύεται παρακάτω. Τα κομμάτια, μετά την αυτόνομη επεξεργασία τους, συνενώθηκαν όλα μαζί σε ένα ενιαίο μοντέλο.

Μετά την παραγωγή των τριγώνων, το λογισμικό παρουσιάζει με μπλε χρώμα τα τρίγωνα της εξωτερικής επιφάνειας και με κίτρινο αυτά της εσωτερικής. Σε πολλά σημεία παράλα αυτά έχουν σχηματιστεί λάθος προσανατολισμένα τρίγωνα τα οποία χρειάζονται διόρθωση. Με την εντολή “flip normals” αντιστρέφουμε τον προσανατολισμό των τριγώνων όπου είναι απαραίτητο.

Στην εικόνα 4.9 φαίνεται ένα παράδειγμα λάθος προσανατολισμένων τριγώνων από το λογισμικό.

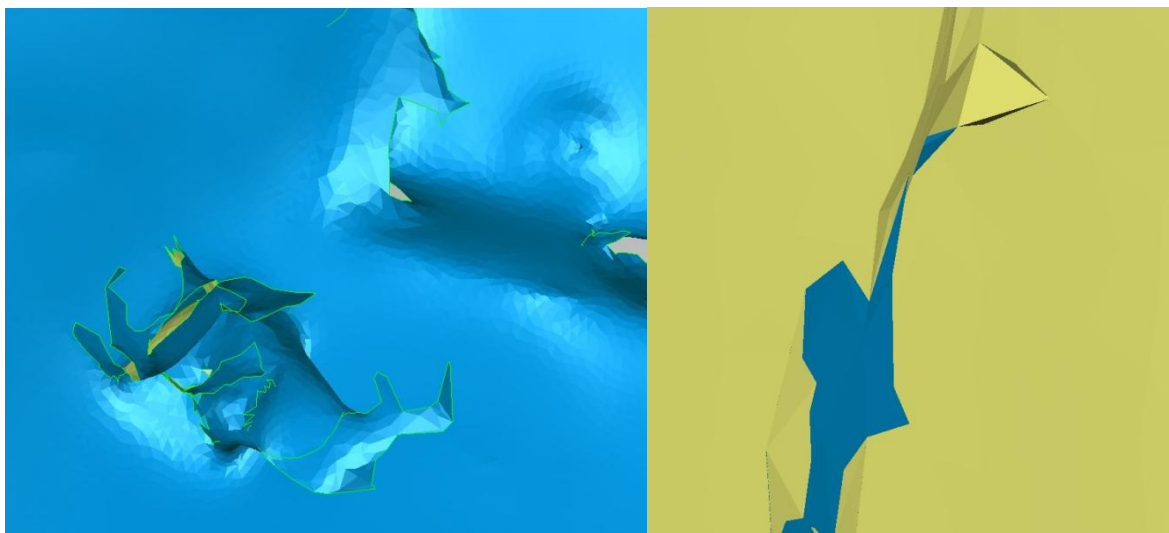


**Εικόνα 4.9 :** Παράδειγμα λάθος προσανατολισμένων τριγώνων.

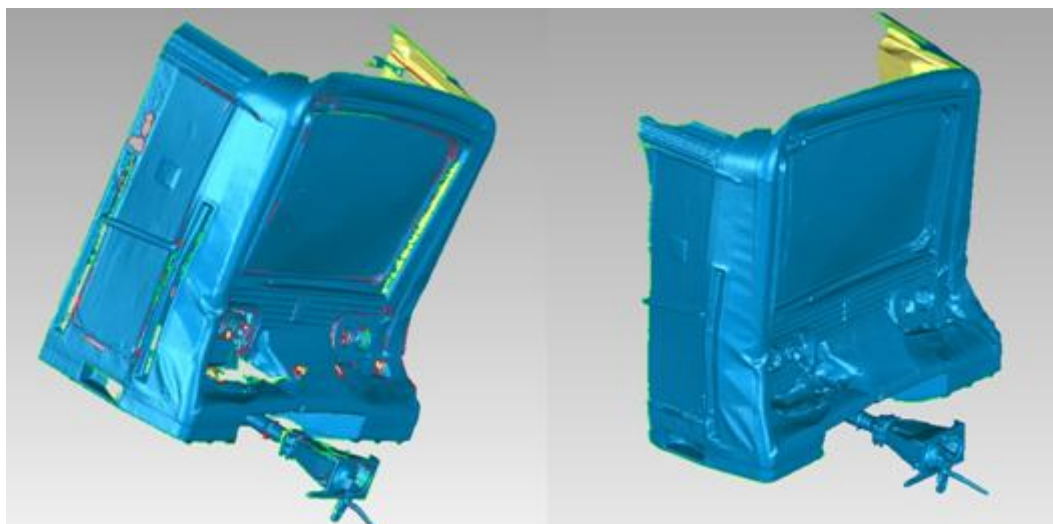
Ένα δεύτερο πρόβλημα του μοντέλου ήταν τα επικαλυπτόμενα τρίγωνα τα οποία έπρεπε να διαγραφούν, όπως επίσης και διάφορα κενά που είχαν προκύψει στο μοντέλο λόγω έλλειψης πληροφορίας. Η συμπλήρωση των κενών έγινε με την εντολή “Polygons->Fill holes”. Η συγκεκριμένη εντολή παρέχει 3 επιλογές για την συμπλήρωση της πληροφορίας. Η επιλογή “curvature” λαμβάνει υπ’όψιν την καμπυλότητα των τριγώνων που βρίσκονται γύρω από το κενό συμπληρώνοντας το κατά αντίστοιχο τρόπο. Η επιλογή “tangent” επίσης λαμβάνει υπ’όψιν την καμπυλότητα των κοντινών τριγώνων, γεμίζοντας αυτή τη φορά το κενό εφαπτομενικά. Τέλος η επιλογή “flat” γεμίζει το κενό τοποθετώντας μια επίπεδη επιφάνεια. Κάθε φορά, με βάση το οπτικό αποτέλεσμα, επιλεγόταν η κατάλληλη μέθοδος συμπλήρωσης.

Επίσης το εργαλείο “fill holes” δίνει τη δυνατότητα, εκτός από τη συμπλήρωση οπών, τη δημιουργία γεφυρών, ώστε να συμπληρωθούν και κενά τα οποία δεν έχουν κλειστό σχήμα. Τέλος, υπάρχει η επιλογή “fill all” ή “single fill”, έτσι ώστε για οικονομία χρόνου όλες οι μικρές οπές να συμπληρωθούν αυτόματα και ο χρήστης να διαχειριστεί χειροκίνητα τα μεγαλύτερα κενά για καλύτερα αποτελέσματα.

Στην εικόνα 4.10 φαίνονται δύο παραδείγματα επικαλυπτόμενων τριγώνων στη διαδικασία της μοντελοποίησης, και στην εικόνα 4.11 το μπροστινό τμήμα πριν και μετά τη συμπλήρωση των κενών.



**Εικόνα 4.10 :** Παραδείγματα επικαλυπτόμενων τριγώνων.



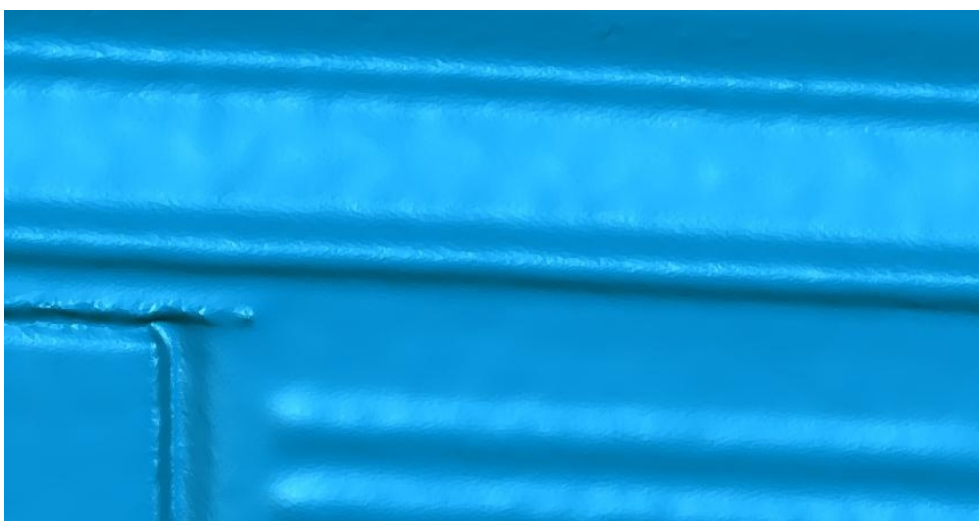
**Εικόνα 4.11 :** Το μπροστινό τμήμα πριν και μετά τη συμπλήρωση των κενών.

Σημειώνεται πως το ανάγλυφο της μοντελοποιημένης επιφάνειας πάνω στα παράθυρα έχει προκύψει είτε λόγω του χαρτιού που είχε κολληθεί στο πίσω μέρος είτε λόγω ενός διαφανούς πλαστικού που υπήρχε πάνω σε κάποια από αυτά, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.12.



**Εικόνα 4.12 :** Το ανάγλυφο της μοντελοποιημένης επιφάνειας λόγω του χαρτιού και του διαφανούς πλαστικού που υπήρχε στα τζάμια.

Τελευταίο βήμα πριν τη συνένωση όλων των επιμέρους μοντελοποιημένων τμημάτων ήταν η μείωση των τριγώνων. Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων έπρεπε να εφαρμοστεί αυτή η μείωση για να είναι τα αρχεία εύκολα διαχειρίσιμα από το πρόγραμμα και να μπορεί να εκτελεστεί η συνένωσή τους. Με την επιλογή “decimate” κάθε κομμάτι μειωνόταν στο 20% των αρχικών του τριγώνων διατηρώντας την επιλογή quality στο μέγιστο. Έτσι, γινόταν η επιθυμητή μείωση του όγκου πληροφορίας, αλλά χωρίς να χάνεται ιδιαίτερη λεπτομέρεια από το μοντέλο (Εικόνα 4.13.α,β).



Εικόνα 4.13.α



Εικόνα 4.13.β

**Εικόνα 4.13 :** Η μοντελοποιημένη επιφάνεια πριν (4.13.α) και μετά (4.13.β) την εφαρμογή της μείωσης των τριγώνων.

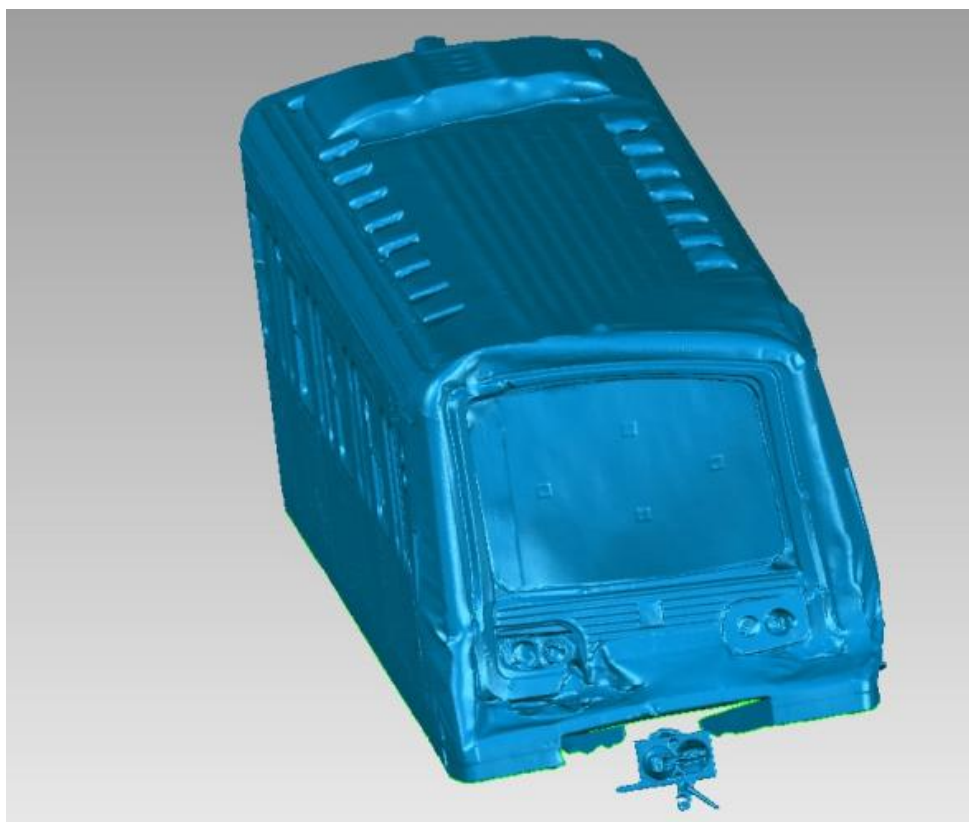


Τέλος, γινόταν ένωση κάθε τμήματος με τα διπλανά του χρησιμοποιώντας την εντολή “combine” και παράλληλα εφαρμόζοντας την επιλογή “stitch”. Έπειτα έπρεπε να διορθωθούν ξανά τα προβληματικά τρίγωνα στα σημεία της ένωσης, αφού πολλές φορές ήταν επικαλυπτόμενα ή προέκυπταν κενά. Αυτό συνέβαινε είτε με τις μεθόδους που αναλύθηκαν νωρίτερα είτε με την επιλογή “rewrap” στην περιοχή της ένωσης, η οποία επανασχεδιάζει τη δομή των τριγώνων.

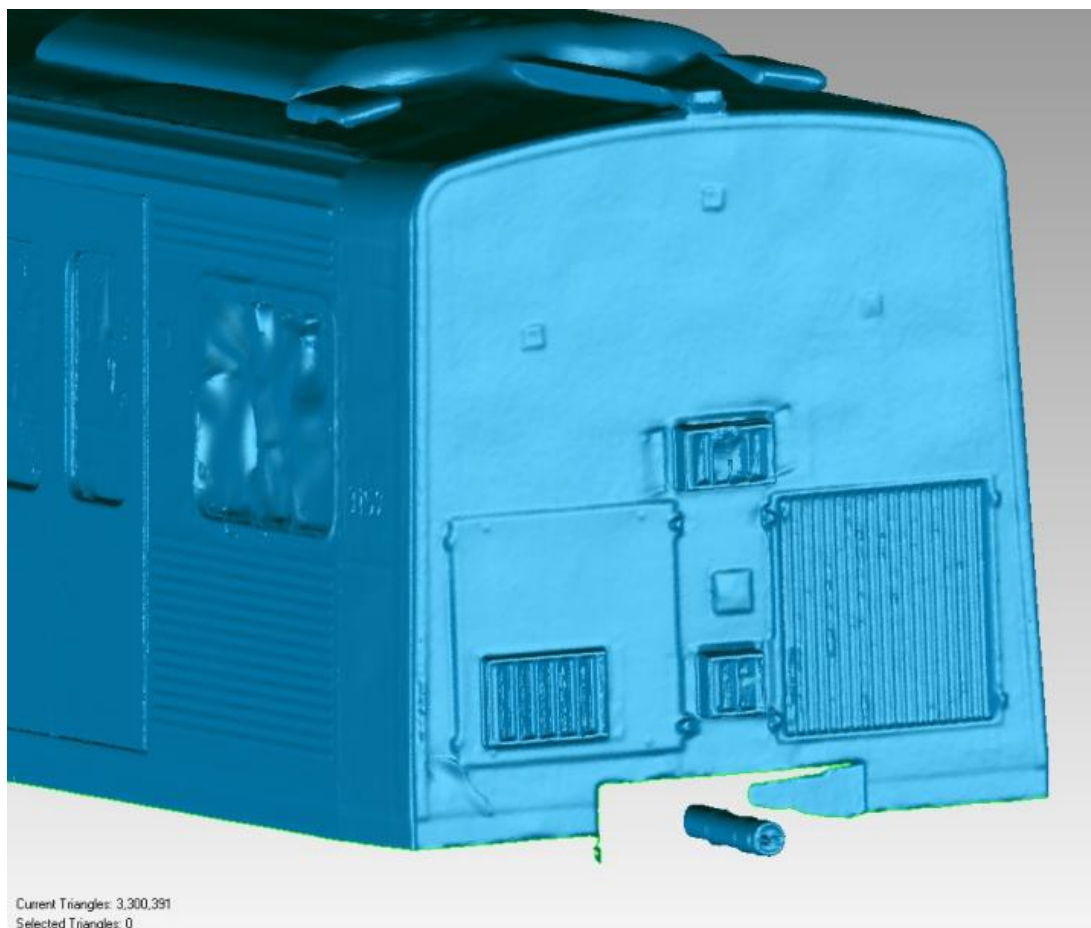
Μετά την ένωση όλων των τμημάτων εφαρμόστηκε το εργαλείο “mesh doctor” το οποίο αναλύει όλο το μοντέλο ψάχνοντας για κάθε είδους προβληματικά τρίγωνα, τα οποία και διορθώνει αυτόματα.

Η χρήση του συγκεκριμένου αυτοματοποιημένου εργαλείου θα μπορούσε να εφαρμοστεί και από την αρχή, αλλά είναι καλύτερο να εφαρμόζεται στα τελευταία στάδια της μοντελοποίησης, μετά από την εφαρμογή όλων των άλλων επιλογών, καθώς έτσι τα αποτελέσματα που δίνει είναι πιο ποιοτικά.

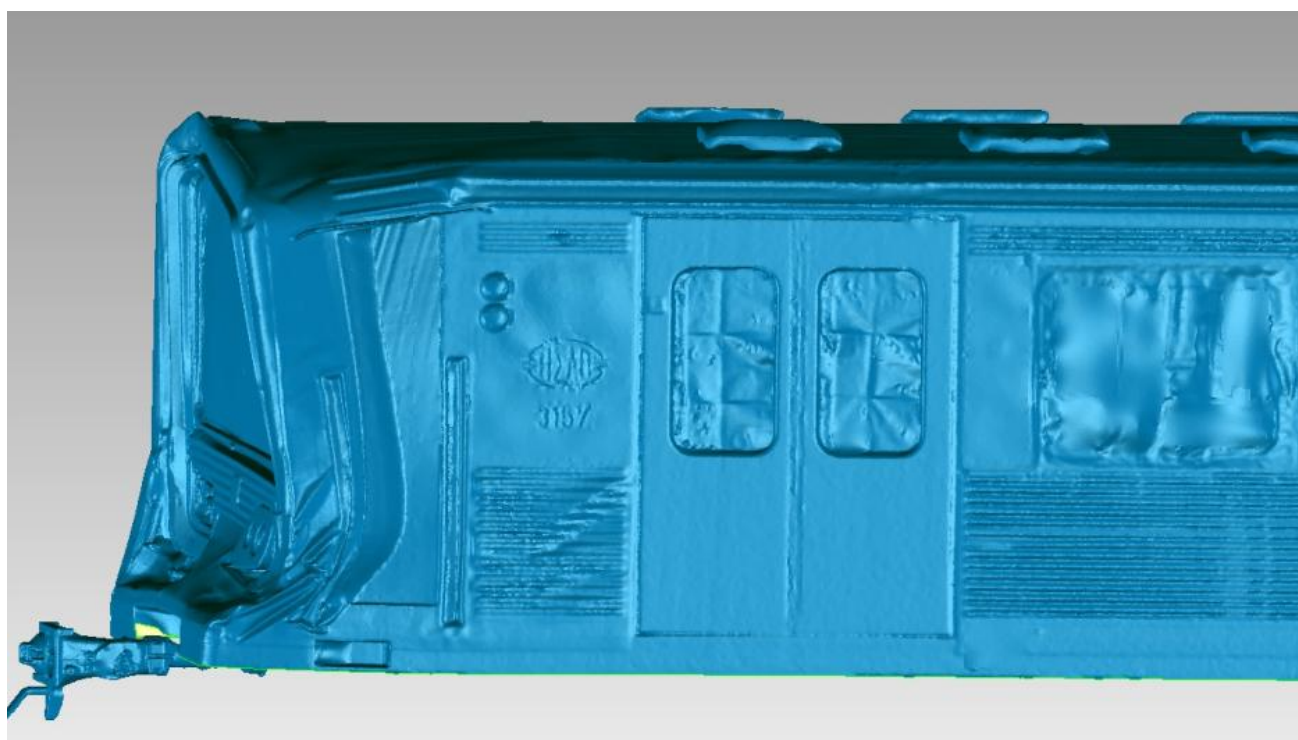
Στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνα 4.14) παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο του βαγονιού το οποίο αποτελείται από 3,300,391 τρίγωνα.



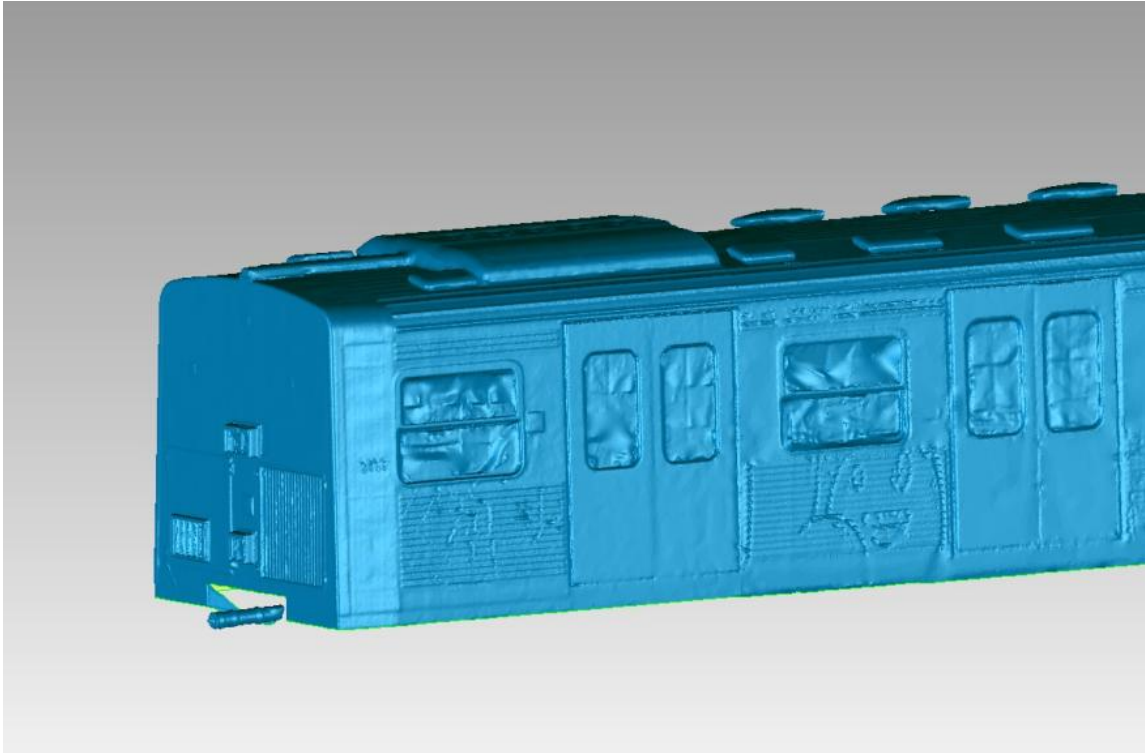
Εικόνα 4.14 α



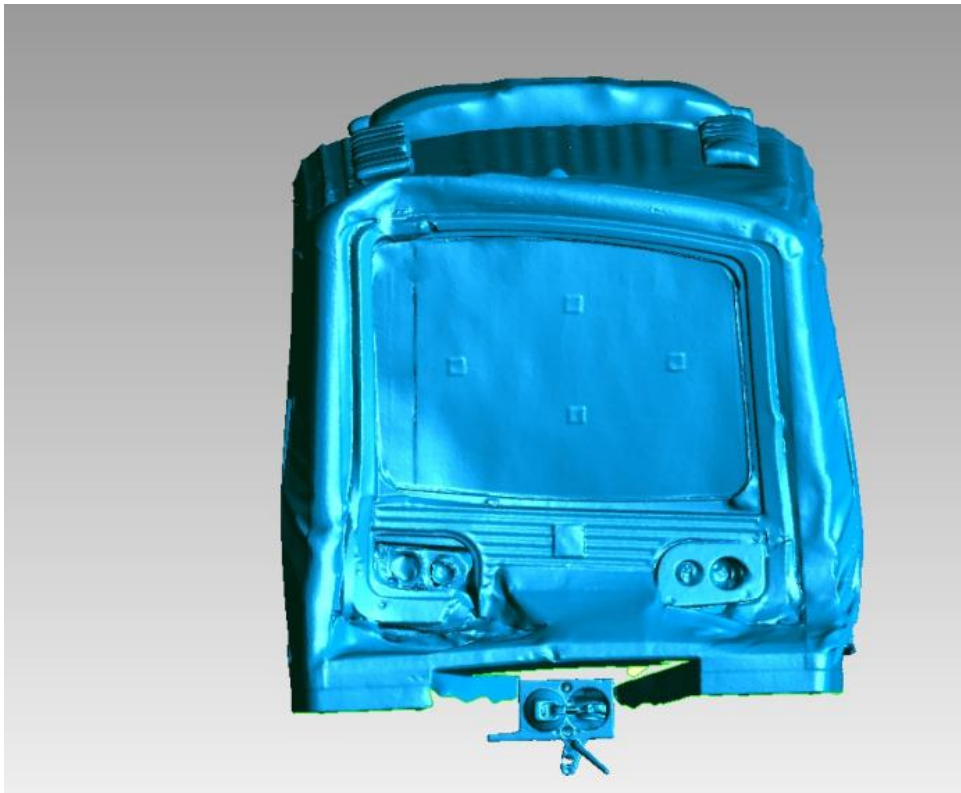
Εικόνα 4.14 β



Εικόνα 4.14 γ



Εικόνα 4.14 δ

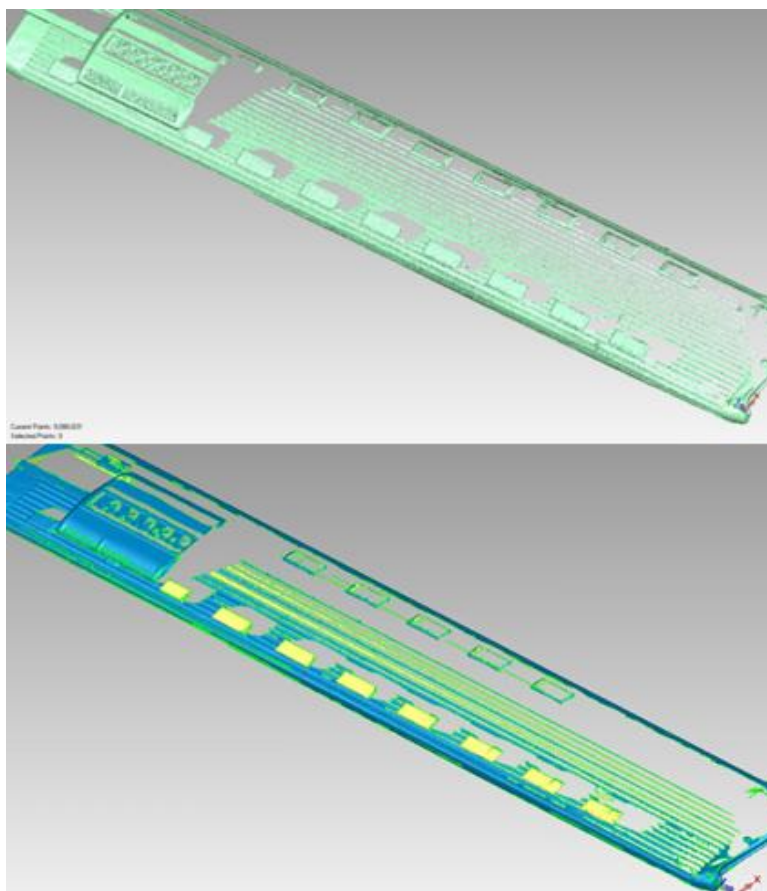


Εικόνα 4.14 ε

**Εικόνα 4.14 :** Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο του βαγονιού.

## 4.7 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη μοντελοποίηση

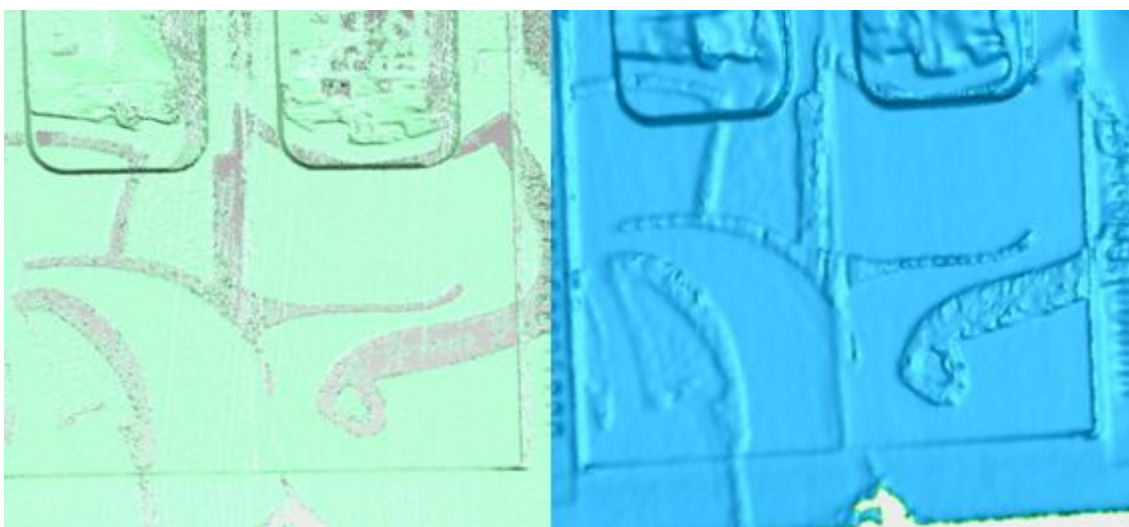
Εκτός από αυτά που αναλύθηκαν στην ενότητα 4.6, τα οποία αποτελούν συνήθη προβλήματα στη μοντελοποίηση αντικειμένων, σημαντικό πρόβλημα παρουσίασε η οροφή του βαγονιού, αφού στον χώρο που έγιναν οι μετρήσεις υπήρχε η δυνατότητα για μόνο μία θέση σάρωσης που να λαμβάνει σημεία της οροφής. Αυτό σε συνδυασμό με την καμπυλότητα της και τη γυαλιστερή της επιφάνεια δημιούργησε πολλά κενά στο μοντέλο. Επίσης κενά δημιουργήθηκαν σε αντικείμενα που βρίσκονταν στη «σκιά του σαρωτή» δηλαδή κρύβονταν από άλλα, πάλι λόγω της μη επικάλυψης από άλλη θέση σάρωσης (Εικόνα 4.15). Αυτά τα κενά συμπληρώθηκαν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο με βάση τα εργαλεία του Geomagic, αλλά πάλι το αποτέλεσμα δεν ανταποκρίνεται παντού στην πραγματικότητα, αφού η έλλειψη πληροφορίας ήταν αισθητή. Βέβαια αυτό επηρέασε μόνο αισθητικά το αποτέλεσμα και όχι την ποιότητα της μετρητικής πληροφορίας που πάρθηκε από το μοντέλο.



**Εικόνα 4.15 :** Τα κενά στο νέφος σημείων της οροφής (άνω) και η αρχική μοντελοποιημένη επιφάνεια που δημιουργήθηκε από αυτά (κάτω).

Παρόμοιο πρόβλημα παρουσίασαν τα σημεία της επιφάνειας που ήταν βαμμένα με μαύρο χρώμα. Βασικό παράδειγμα τέτοιων σημείων είναι όλο το περίγραμμα του γκράφιτι όπως και τα αυτοκόλλητα με το λογότυπο του ΗΣΑΠ που είχε το βαγόνι. Το μαύρο χρώμα έχει πολύ χαμηλή τιμή ανακλαστικότητας, με αποτέλεσμα η ακτίνα laser να μην επιστρέφει στο όργανο, ειδικά αν πρόκειται για υπό γωνία σάρωση.

Το πρόβλημα που έγινε πιο εμφανές κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης είναι ότι σε όλο το περίγραμμα του γκράφιτι υπάρχει κενό στα σημεία, με αποτέλεσμα, προσπαθώντας το λογισμικό να συμπληρώσει αυτά τα κενά, το γκράφιτι να προκύπτει σαν ανάγλυφο πάνω στο βαγόνι, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16.

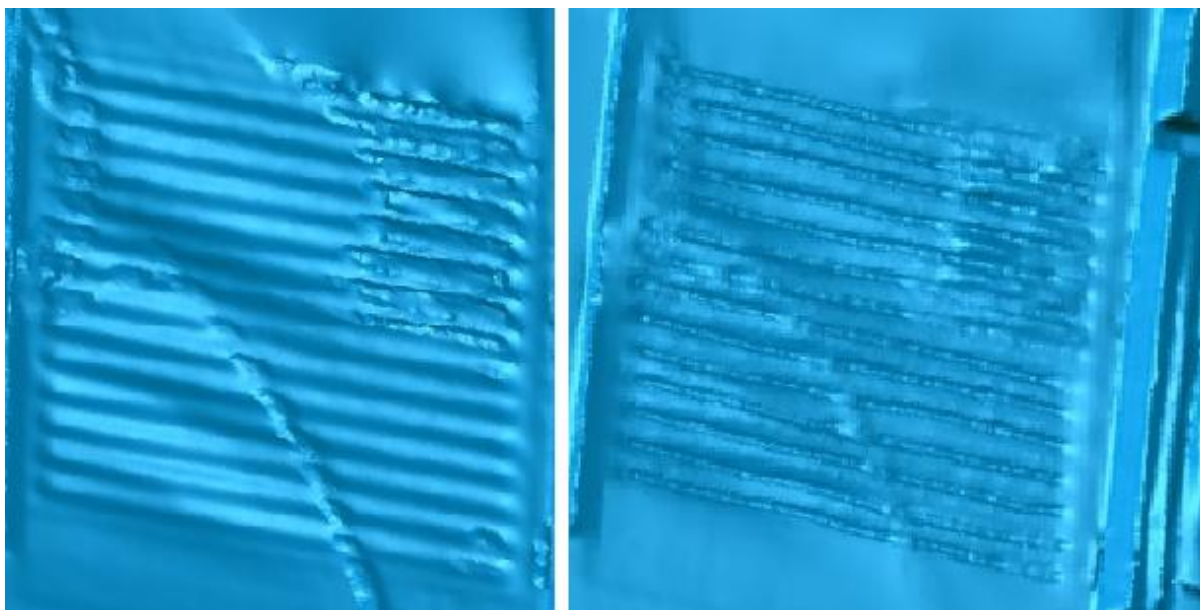


**Εικόνα 4.16 :** Το νέφος σημείων σε περιοχή με μαύρο περίγραμμα στο γκράφιτι (αριστερά), και η μοντελοποιημένη επιφάνεια που προέκυψε από αυτό (δεξιά).

Αυτό το πρόβλημα ήταν δυνατόν να αντιμετωπισθεί στις λείες επιφάνειες του βαγονιού με την χρήση της εντολής “Polygons->Relax”. Με αυτό το εργαλείο εξομαλύνονται οι επιφάνειες με αποτέλεσμα να χάνεται η αίσθηση του ανάγλυφου στα επιθυμητά σημεία. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν θα είχε νόημα να εφαρμοστεί στις περιοχές του βαγονιού που περιέγραφαν ούτως ή άλλως κάποιο ανάγλυφο και είχαν τα κενά λόγω του γκράφιτι, διότι έτσι θα χανόταν όλη η πληροφορία τους και το αποτέλεσμα θα ήταν λανθασμένο αλλά και ανομοιογενές σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια.

Έγιναν διάφορες δοκιμές με το εργαλείο “sculpt” του Geomagis το οποίο έχει την δυνατότητα να επανασχεδιάζει το ανάγλυφο σε ένα μοντέλο προσθέτοντας ή αφαιρώντας «εξογκώματα», αλλά τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά.

Στην εικόνα 4.17 παρουσιάζεται η χρήση του εργαλείου “sculpt” στα σημεία που παρουσίασαν πρόβλημα, τα αποτελέσματα της οποίας δεν κρίθηκαν ικανοποιητικά.



**Εικόνα 4.17 :** Εφαρμογή του εργαλείου sculpt σε προβληματικές περιοχές με ανάγλυφο, η οποία όμως δεν απέδωσε αποδεκτά αποτελέσματα.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έπρεπε να έχει γίνει εξ αρχής διαφορετικός σχεδιασμός στις θέσεις σάρωσης ή μετέπειτα συμπλήρωσή τους, με περισσότερες «μετωπικές» σαρώσεις στις περιοχές που υστερούσαν. Δηλαδή, θέσεις σάρωσης που να παρέχουν καλύτερη επικάλυψη στην οροφή αλλά και πιο αναλυτική περιγραφή στις μαύρες περιοχές του βαγονιού, ώστε να μειωθούν τα κενά της πληροφορίας.

Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη διπλωματική είχε εξ αρχής σκοπό να επικεντρωθεί στο μπροστινό τμήμα, το οποίο ήταν αυτό που είχε υποστεί ζημιά. Τα σημεία της οροφής ελήφθησαν μόνο για την πληρότητα του μοντέλου και η μειωμένη ακρίβεια στο ανάγλυφο της περιοχής του γκράφιτι δεν επηρέαζε τις μετέπειτα μετρήσεις που θα γίνονταν, οπότε και δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει συμπλήρωση των δεδομένων.

## Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα-Συγκρίσεις

### 5.1 Εισαγωγή

Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να αναλυθεί η διαδικασία εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας από το τρισδιάστατο μοντέλο και εν συνέχεια να γίνουν συγκρίσεις αυτών των μετρήσεων με τις πρότυπες διαστάσεις του βαγονιού αλλά και με την σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ μετά το ατύχημα.

Το Geomagic παρέχει τη δυνατότητα είτε για εξαγωγή τομών πάνω στις οποίες μπορούν να μετρηθούν μήκη, είτε για άμεση σύγκριση 2 επιφανειών με χρωματική διαφοροποίηση ανάλογα με την απόκλισή τους. Στην εφαρμογή αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 μέθοδοι σε επιμέρους τμήματα του βαγονιού.

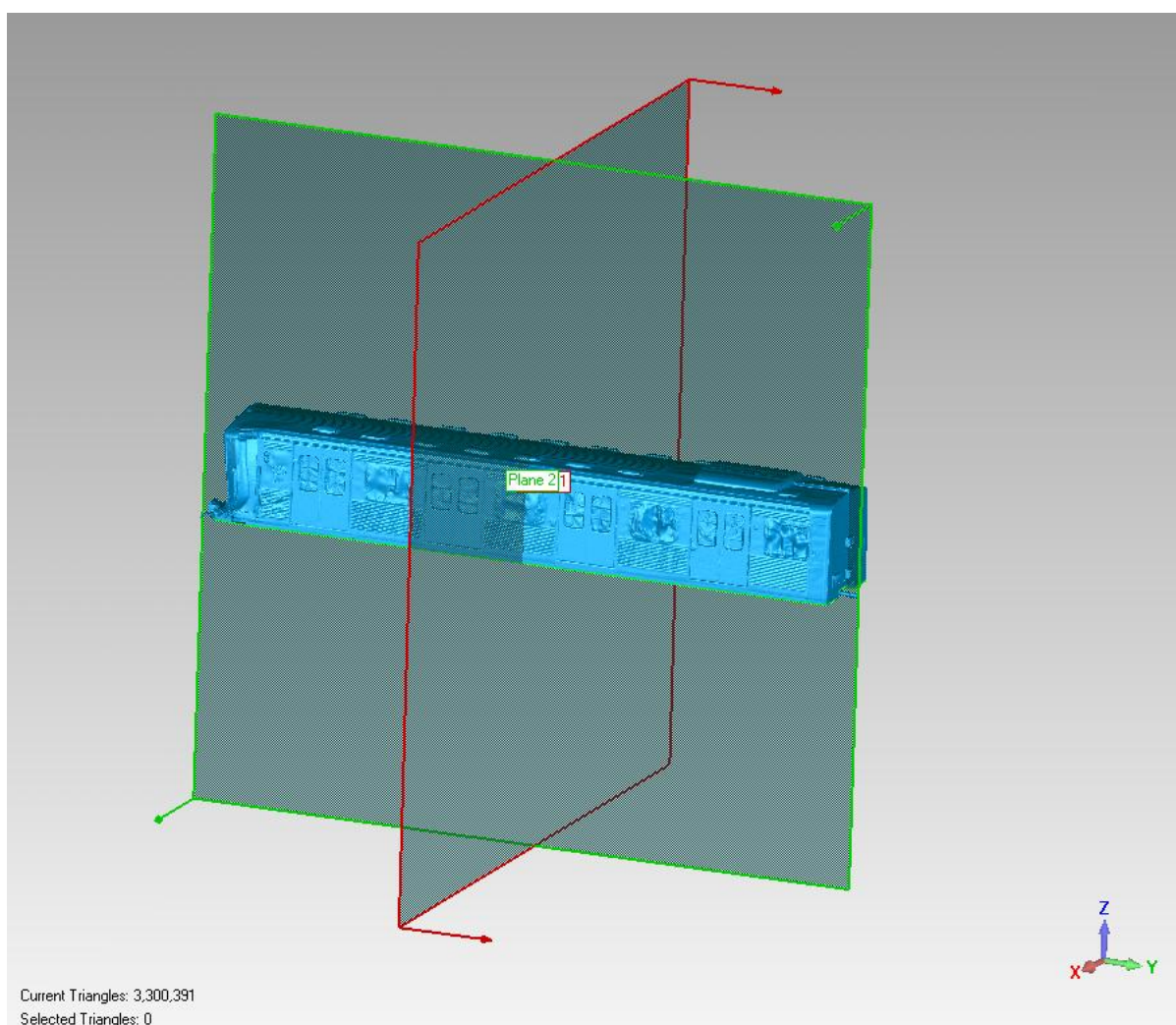
Οι μετρήσεις που είχαν γίνει από πλευράς ΗΣΑΠ μετά το ατύχημα αφορούσαν διατομές σε δέκα θέσεις κατά μήκος του βαγονιού και υψομετρικές διαφορές σε συγκεκριμένα σημεία του πλαισίου του. Οι μετρήσεις αυτές παρατίθενται στο παράρτημα Α.

Όπως είχε αναφερθεί στην ενότητα 4.5, το πλαίσιο – σασί του βαγονιού ήταν σαρωμένο ελλιπώς και δεν περιείχε μετρητική πληροφορία, οπότε και δεν ήταν δυνατή η σύγκριση με τα υπάρχοντα σχέδια. Τα δεδομένα που συγκρίθηκαν ήταν εκείνα στις δέκα θέσεις των διατομών. Επίσης, εφαρμόστηκε τρισδιάστατη σύγκριση ανάμεσα στο μοντέλο και σε ένα τρισδιάστατο σχέδιο που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον autocad σύμφωνα με τις πρότυπες διαστάσεις του βαγονιού.

### 5.2 Εξαγωγή τομών

Το πρώτο βήμα πριν την εξαγωγή τομών είναι η υλοποίηση των επιπέδων συμμετρίας, τα οποία θα λειτουργήσουν ως επίπεδα αναφοράς για τις τομές και θα εγγυηθούν για την καθετότητά τους πάνω στο αντικείμενο.

Με την εντολή “features->plane->symmetry” ανοίγει το παράθυρο του λογισμικού, στο οποίο επιλέγεται το επίπεδο συμμετρίας που θα υλοποιηθεί. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας δημιουργήθηκαν 2 επίπεδα συμμετρίας. Ένα για το επίπεδο ΧΖ και την εξαγωγή των διατομών και ένα για το επίπεδο ΧΥ και την εξαγωγή μιας μηκοτομής. Το λογισμικό υπολογίζει τη βέλτιστη εφαρμογή του επιπέδου συμμετρίας λαμβάνοντας υπ’όψιν όλη την μοντελοποιημένη επιφάνεια, ώστε να επηρεάζεται κατά το ελάχιστο δυνατόν από «ατέλειες συμμετρίας», όπως για παράδειγμα το μπροστινό τμήμα που έχει υποστεί ζημιά. Τα επίπεδα συμμετρίας φαίνονται στην εικόνα 5.1.

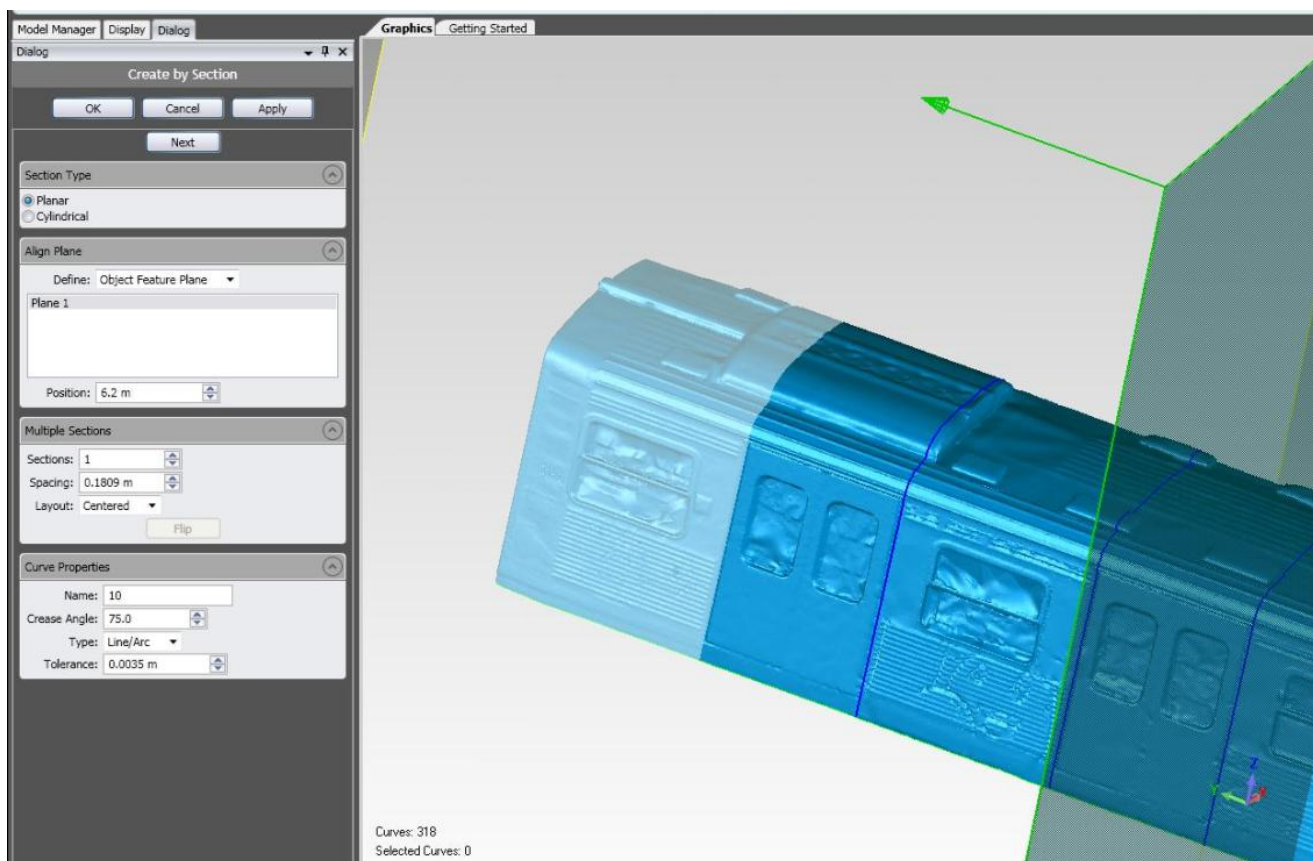


**Εικόνα 5.1 :** Τα επίπεδα συμμετρίας στο σύστημα αναφοράς του βαγονιού. Με κόκκινο παρουσιάζεται το επίπεδο των διατομών ΧΖ και με πράσινο το επίπεδο της μηκοτομής ΧΥ.

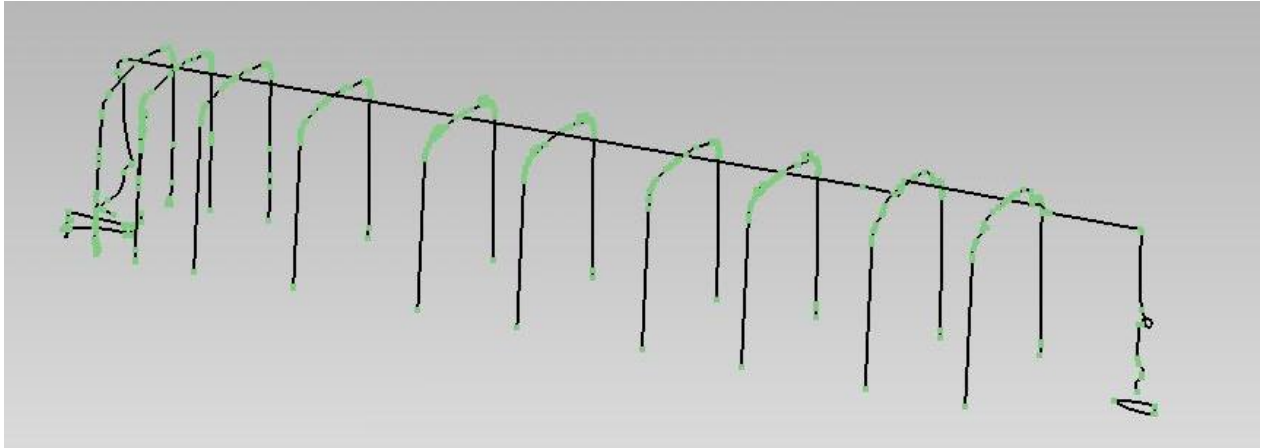


Έχοντας πλέον διαθέσιμα τα επίπεδα συμμετρίας, με χρήση του εργαλείου “curves > create by section” ενεργοποιείται το παράθυρο με τις επιλογές για την εξαγωγή τομών. Εκεί επιλέγεται το επιθυμητό επίπεδο αναφοράς από το παράθυρο “align plane” και με την επιλογή “position” γίνεται η παράλληλη μετακίνηση του επιπέδου που θα εξαχθεί η τομή από το επίπεδο συμμετρίας.

Κατά αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν χειροκίνητα δέκα διατομές στα ακραία σημεία κάθε πόρτας και μια μηκοτομή στο μέσον του πλάτους του βαγονιού. Η ανέχεια των τομών τέθηκε στα 3mm, ώστε να υπάρχει η επιθυμητή λεπτομέρεια αναγνώρισης του κατάλληλου σημείου που πρέπει να γίνει η μέτρηση, για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα με τη σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ. Στις εικόνες 5.2 και 5.3 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής τομών και τα αποτελέσματά της.



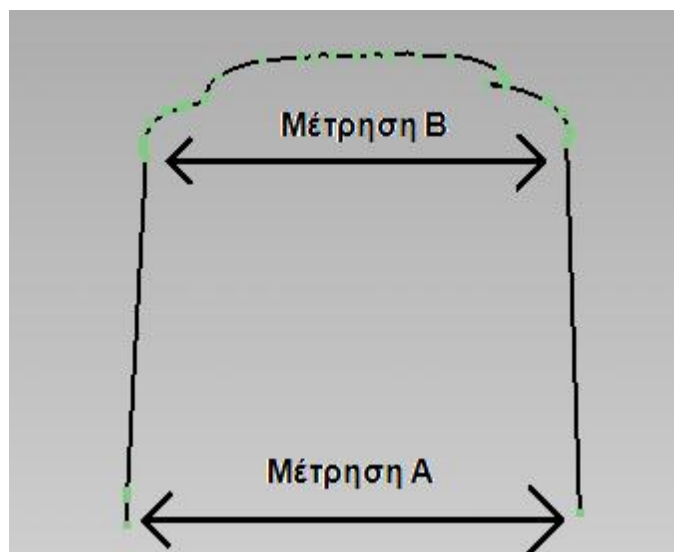
**Εικόνα 5.2 :** Η παράλληλη μετακίνηση του επιπέδου συμμετρίας για την εξαγωγή των διατομών στα επιθυμητά σημεία.



**Εικόνα 5.3 :** Οι δέκα διατομές και η μηκοτομή που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία. Οι διατομές εξήχθησαν στα δύο ακραία σημεία κάθε πόρτας και η μηκοτομή στο μέσον του πλάτους του βαγονιού.

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας οι τομές είναι διαθέσιμες για μετρήσεις με το εργαλείο “tools->measure distance”. Με αυτό το εργαλείο ο χρήστης επιλέγει 2 σημεία και το λογισμικό δίνει την απόστασή τους και τις συντεταγμένες τους στο σύστημα αναφοράς του μοντέλου.

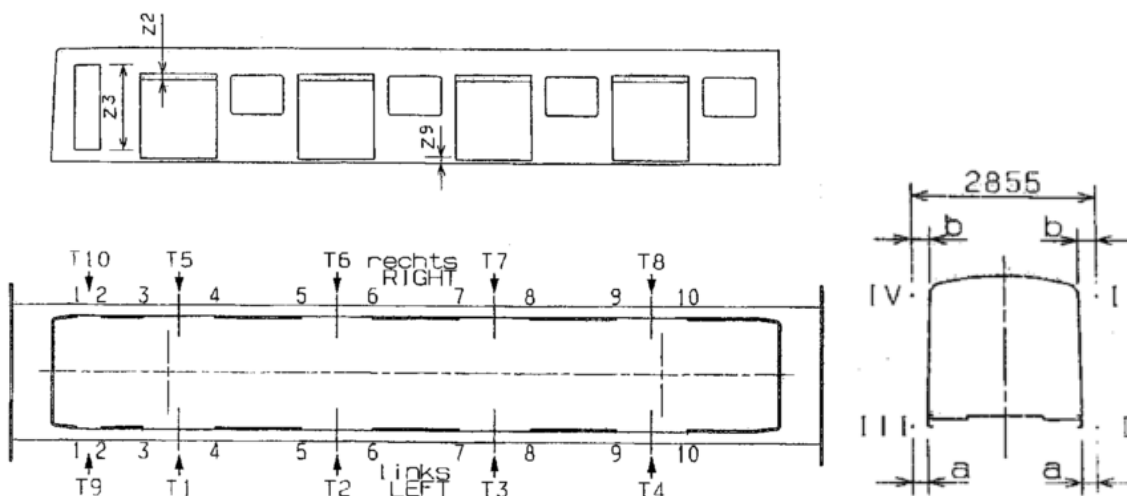
Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις σε κάθε διατομή. Μία στο χαμηλότερο σημείο τους, που αντιπροσωπεύει το χαμηλότερο σημείο του πλαισίου του βαγονιού και μία στο υψηλότερο, πριν ξεκινήσει η καμπυλότητα της οροφής, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4.



**Εικόνα 5.4 :** Τα σημεία των διατομών στα οποία έγιναν οι μετρήσεις.

Σημειώνεται πως η μεθοδολογία μέτρησης των διατομών από την πλευρά του ΗΣΑΠ ήταν η εξής :

Αρχικά υλοποιήθηκαν δύο επίπεδα από δύο τεντωμένα νήματα τα οποία βρίσκονταν σε στύλους μεταβλητού ύψους. Γνωρίζοντας με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση των δύο υλοποιημένων επιπέδων, ανάμεσα στα οποία βρίσκεται τοποθετημένο το βαγόνι, μετριέται με πήχυ του 1m η απόσταση του βαγονιού από τα επίπεδα σε κάθε πλευρά. Αυτό συμβαίνει σε δύο σημεία κατ' αντιστοιχία με τις μετρήσεις στις διατομές του μοντέλου. Συνεπώς, με αφαίρεση των μετρημένων αποστάσεων από το γνωστό μήκος που απέχουν τα δύο επίπεδα μεταξύ τους, προκύπτει το πλάτος του βαγονιού σε κάθε θέση. Στην εικόνα 5.5 φαίνονται οι θέσεις των δέκα διατομών και οι θέσεις a, b πάνω στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις. Η απόσταση των δύο επιπέδων είναι 2855 mm και οι μετρημένες αποστάσεις παρατίθενται σε χιλιοστά. Τέλος στον πίνακα 5.1 γίνεται η σύγκριση των δύο σειρών μετρήσεων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της.



Zulässige Abweichung, benachbarter Punkte ADMISSIBLE DEVIATION OF ADJOINING POINTS waagerecht HORIZONTAL max. 2 mm							
Maß DIM.	"a"	Soll NOM	50%	Maß DIM.	"b"	Soll NOM	135% <sup>18</sup>
11	48	1111	49	111	—	IV1	—
12	51	1112	50	112	152	IV2	127
13	51	1113	53	113	150	IV3	126
14	53	1114	53	114	150	IV4	127
15	52	1115	54	115	151	IV5	130
16	52	1116	54	116	152	IV6	129
17	52	1117	53	117	150	IV7	131
18	54	1118	51	118	150	IV8	132
19	53	1119	54	119	148	IV9	132
110	54	1110	51	110	150	IV10	130

Εικόνα 5.5 : Η σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ στις διατομές του βαγονιού.

## Διατομές

	Μετρήσεις Geomagic		Μετρήσεις HΣΑΠ		Διαφορές	
	a(m)	b(m)	a(m)	b(m)	a(m)	b(m)
1	2.745	-----	2.758	-----	-0.013	-----
2	2.742	2.573	2.748	2.576	-0.006	-0.003
3	2.747	2.58	2.751	2.579	-0.004	0.001
4	2.751	2.563	2.749	2.578	0.002	-0.015
5	2.749	2.579	2.749	2.574	0	0.005
6	2.739	2.567	2.749	2.574	-0.01	-0.007
7	2.756	2.581	2.75	2.574	0.006	0.007
8	2.749	2.562	2.75	2.573	-0.001	-0.011
9	2.752	2.565	2.748	2.575	0.004	-0.01
10	2.747	2.566	2.75	2.575	-0.003	-0.009

## Μηκοτομή

Μέτρηση Geomagic (m)	Πρότυπο μήκος (m)	Διαφορά (m)
16.99	17	-0.01

Πίνακας 5.1 : Σύγκριση των δύο σειρών μετρήσεων.

Η μέγιστη διαφορά που εντοπίστηκε ανάμεσα στις δύο σειρές μετρήσεων είναι 1.3cm.

Στην «άνω θέση» b της διατομής 1, λόγω της μεγάλης ζημιάς δεν υπήρχε δυνατότητα αναγνώρισης του κατάλληλου σημείου μέτρησης και έτσι δεν είχε παρθεί απόσταση στις μετρήσεις του ΗΣΑΠ.

Το RMS σφάλμα των διαφορών υπολογίζεται από τον τύπο  $\sigma = \sqrt{\frac{uu}{n-1}} = 0,008m$

όπου  $uu$  τα τετράγωνα των διαφορών (υπόλοιπα) και  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων.

Οι αποκλίσεις των δύο μεθόδων μπορεί να οφείλονται είτε στα τυπικά και συστηματικά σφάλματα της κάθε μεθόδου, είτε στη διαφορετική χρονική περίοδο που έγιναν οι μετρήσεις, αφού θα μπορούσε κατά τη μεταφορά του το βαγόνι να έχει υποστεί κάποια περεταίρω ζημιά, αλλά κυρίως στη δυσκολία ταύτισης των διατομών και του κατάλληλου σημείου μέτρησης ανάμεσα στις 2 σειρές μετρήσεων.

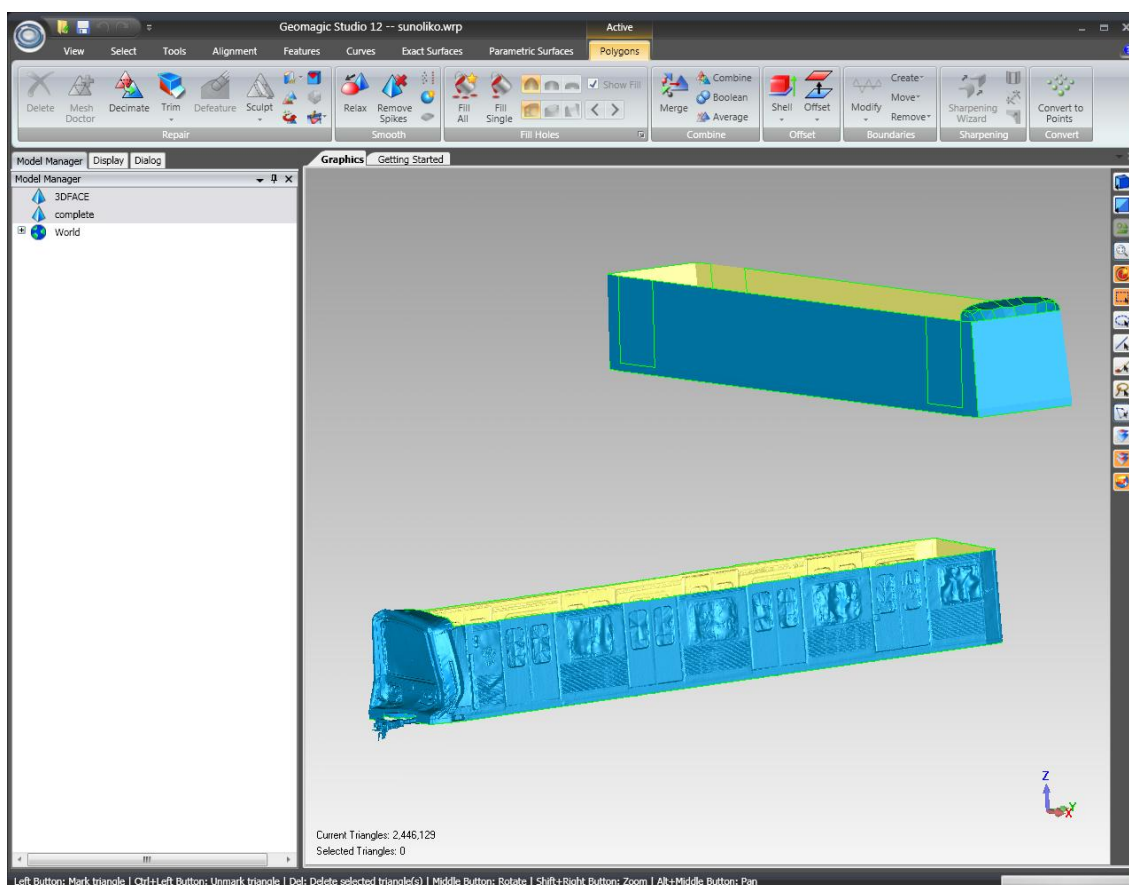
### 5.3 Τρισδιάστατη σύγκριση

Το Geomagic παρέχει τη δυνατότητα της τρισδιάστατης σύγκρισης επιφανειών, καταλήγοντας σε χρωματική διαφοροποίηση ανάλογα με την απόκλιση. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη μέθοδος κυρίως για την αναγνώριση αποκλίσεων στο μπροστινό τμήμα του βαγονιού, όπου ήταν και ιδιαίτερα δύσκολο να εφαρμοστούν επιμέρους μετρήσεις λόγω της μεγάλης ζημιάς που είχε υποστεί. Η μέθοδος παρουσίασε κάποια προβλήματα, τα οποία επηρέασαν σημαντικά την ακρίβειά της, αλλά κατέληξε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Αρχικά ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου με τις πρότυπες διαστάσεις. Αυτό δημιουργήθηκε σε περιβάλλον autocad, αλλά περιείχε μόνο τα βασικά του μεγέθη, αφού τα σχέδια που δόθηκαν από τον ΗΣΑΠ δεν περιέγραφαν λεπτομερώς όλες τις διαστάσεις που ήταν απαραίτητες. Συγκεκριμένα, το σχέδιο δεν περιείχε καθόλου πληροφορίες για το ανάγλυφο του βαγονιού, όπως και για την οροφή του (παράρτημα Β).

Μετά το σχεδιασμό του αντικειμένου, σε κάθε επιφάνεια έπρεπε να εφαρμόζεται η εντολή του autocad, "3dface", έτσι ώστε το εξαχθέν αντικείμενο να αναγνωριστεί από το Geomagic ως επιφάνεια με τρίγωνα και όχι ως αυτόνομα σημεία. Η εξαγωγή του αρχείου έγινε σε μορφή \*.dxf, την οποία και αναγνωρίζει το Geomagic. Η εισαγωγή των δύο μοντέλων στο Geomagic φαίνεται στην εικόνα 5.6.

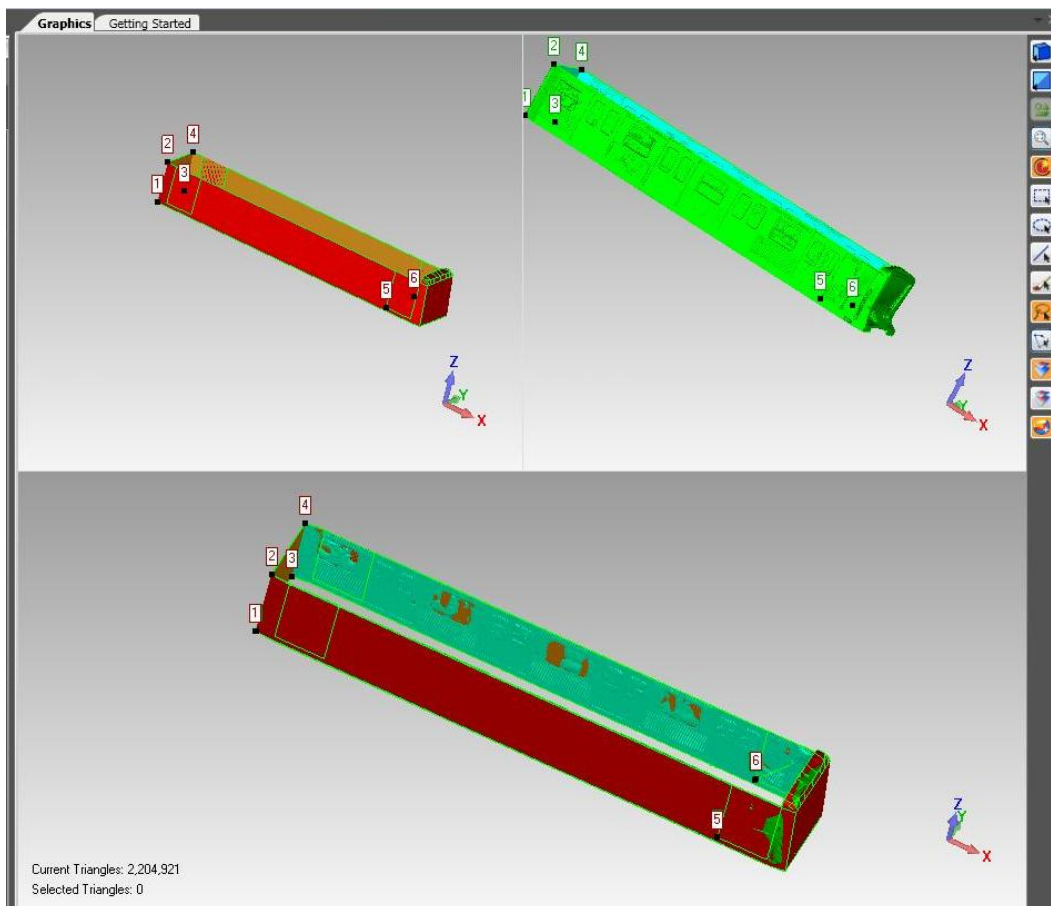
Στη συνέχεια, από το συνολικό μοντέλο που είχε προκύψει με τη σάρωση του βαγονιού, αποκόπηκε η οροφή, αφού, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 4.7, παρουσίαζε αρκετά προβλήματα λόγω έλλειψης πληροφορίας, αλλά και γιατί ούτε τα πρότυπα σχέδια έδιναν πληροφορίες για τις διαστάσεις της, οπότε η σύγκριση ήταν αδύνατη.



**Εικόνα 5.6** Η εισαγωγή του σχεδίου του autocad στο Geomagic, ώστε να γίνει η σύγκριση με το μοντέλο της σάρωσης.

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή του εργαλείου της τρισδιάστατης σύγκρισης και τον εντοπισμό αποκλίσεων είναι πρώτα η ταύτιση των δύο μοντέλων. Αυτό έγινε με την εντολή “alignment->manual registration”. Με αυτή την επιλογή εμφανίζονται τρία παράθυρα στην οθόνη του υπολογιστή. Στο πάνω δεξιά επιλέγεται το μοντέλο της σάρωσης του βαγονιού, στο πάνω αριστερά το μοντέλο του autocad και στο κάτω παράθυρο εμφανίζεται η σχετική τους θέση. Έπειτα εφαρμόστηκε η επιλογή “n-point registration”, ώστε με τη χρήση ομολόγων σημείων να γίνει η ταύτιση.

Σ’ αυτό το σημείο παρουσιάστηκε δυσκολία στην εύρεση κατάλληλων ομολόγων σημείων λόγω της μειωμένης λεπτομέρειας που είχαν τα πρότυπα σχέδια του βαγονιού. Παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν έξι σημεία τα οποία επιλέχθηκαν ως τα πιο αξιόπιστα για αυτή τη διαδικασία. Αυτά ήταν οι τέσσερις πίσω, άνω και κάτω γωνίες του βαγονιού και οι δύο κάτω γωνίες στις πόρτες του μπροστινού τμήματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7.



**Εικόνα 5.7 :** Τα ομόλογα σημεία στη διαδικασία ταύτισης των δύο μοντέλων.

Στη συνέχεια , μετά τη συνένωση των δύο μοντέλων, εφαρμόζεται η εντολή “tools->deviations” (3d-compare) μέσα στην οποία επιλέγεται ως reference το μοντέλο της σάρωσης και ως test το μοντέλο του autocad. Έτσι, θα χρησιμοποιηθεί ως «βάση» το μοντέλο της σάρωσης και θα εμφανιστούν πάνω σε αυτό οι αποκλίσεις του από το πρότυπο.

Επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση του “max deviation” με το οποίο ο χρήστης δηλώνει στο λογισμικό τη μέγιστη απόκλιση που επιθυμεί να εμφανιστεί. Έτσι μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου εμφανίζεται χρωματισμένη κάθε περιοχή του βαγονιού ανάλογα με την απόκλιση της. Με γκρι εμφανίζονται όλα εκείνα τα σημεία τα οποία απέχουν περισσότερο από το “max deviation” που τέθηκε κάθε φορά. Επίσης το πρόγραμμα δίνει αναφορά για τη μέγιστη και τη μέση απόκλιση, θετική και αρνητική, όπως και για το τυπικό τους σφάλμα.

Η αναφορά σφάλματος που δίνεται από το λογισμικό με την χρήση αυτού του εργαλείου, αποτελεί και την ποιοτική πληροφορία της ταύτισης των μοντέλων που συνέβη στο προηγούμενο βήμα. Δηλαδή αποτελεί τιμή «μέσου τετραγωνικού σφάλματος» (RMS) και υποδεικνύει την ακρίβεια με την οποία ταυτίστηκαν οι δύο επιφάνειες.

Αυτό το σφάλμα στη συγκεκριμένη εφαρμογή επηρεάζεται από τα εξής :

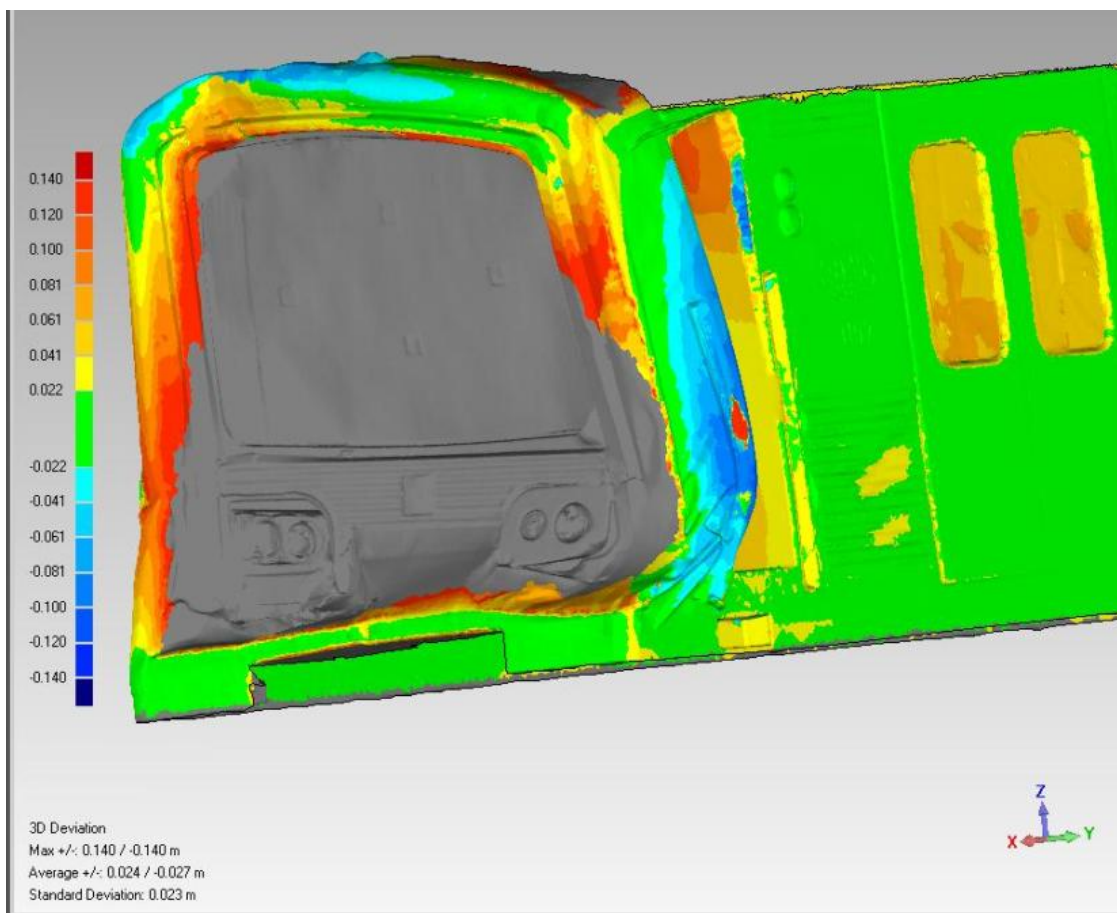
- Την ορθότητα και ακρίβεια των ομολόγων σημείων που επιλέχθηκαν κατά το στάδιο της ταύτισης (n-point manual registration).
- Από τις αποκλίσεις που έχουν τα μοντέλα λόγω του αναγλύφου, αφού τα πρότυπα σχέδια και κατ' επέκταση και το σχέδιο του autocad δεν περιείχαν καθόλου πληροφορία για το ανάγλυφο του βαγονιού.
- Από το μέγεθος της ζημιάς, το οποίο ειδικά στο μπροστά τμήμα είναι αυξημένο. Αυτό σημαίνει ότι η ταύτιση σε αυτή την περιοχή γίνεται ακόμα πιο δυσμενής και το σφάλμα αυξάνεται λόγω των μεγάλων αποκλίσεων.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα σε αυτό το στάδιο είναι αυτός «του πλησιέστερου σημείου». Ένας τέτοιος αλγόριθμος μπορεί να παρέχει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα για μικρού μεγέθους αποκλίσεις, αλλά σε εφαρμογές επιπέδου ζημιάς όπως η συγκεκριμένη, μπορεί να υπάρχουν σφάλματα. Αυτό συμβαίνει λόγω των μεγάλων αποκλίσεων που προκάλεσε το ατύχημα, αφού σε πολλές περιοχές του μπροστινού τμήματος «η μια επιφάνεια έχει εισχωρήσει μέσα στην άλλη». Έτσι, ένα σημείο του υπό εξέταση μοντέλου μπορεί να ταυτιστεί με λάθος σημείο του πρότυπου λόγω της «κοντινότερης» απόστασής τους συγκριτικά με το σωστό ομόλογό του και το αποτέλεσμα να μην είναι αξιόπιστο.

Εφαρμόζοντας δοκιμές με μικρές τιμές “max deviation”, πολλές περιοχές του βαγονιού εμφανίζονταν με χρώμα γκρι, αφού απήχαν από το πρότυπο απόσταση μεγαλύτερη από την καθορισμένη. Ταυτόχρονα όμως βελτιωνόταν και το τυπικό σφάλμα της μεθόδου. Κάτι τέτοιο είναι λογικό αφού, όπως αναφέρθηκε, το τυπικό σφάλμα αφορά μέση τιμή (RMS) και θέτοντας χαμηλή τιμή στο “max deviation”, ο αλγόριθμος δεν λάμβανε υπ' όψιν τις περιοχές μεγαλύτερης απόκλισης, βελτιώνοντας έτσι το σφάλμα ταύτισης.



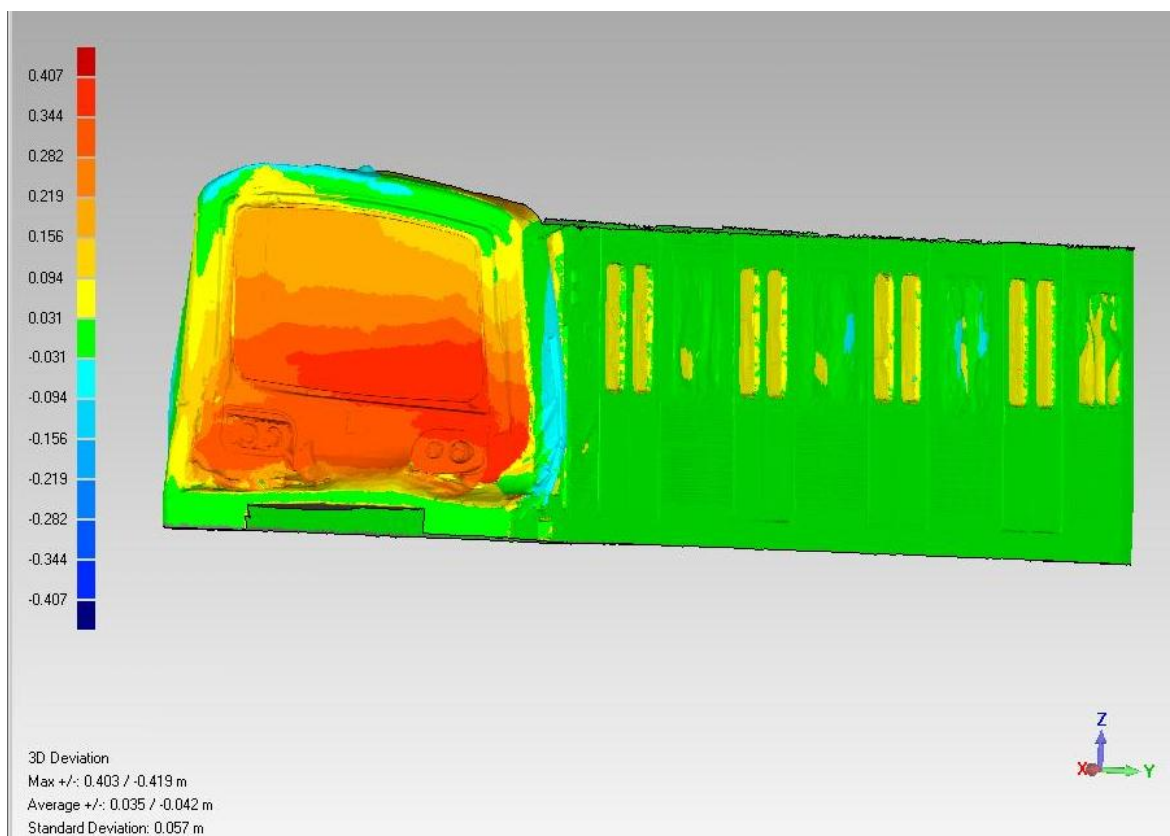
Στις φωτογραφίες 5.8 και 5.9 φαίνονται οι δοκιμές για μέγιστη απόκλιση 14cm όπου το τυπικό σφάλμα προκύπτει 2.3cm και για τελική μέγιστη απόκλιση 41cm όπου το σφάλμα προκύπτει 5.7cm αντίστοιχα.



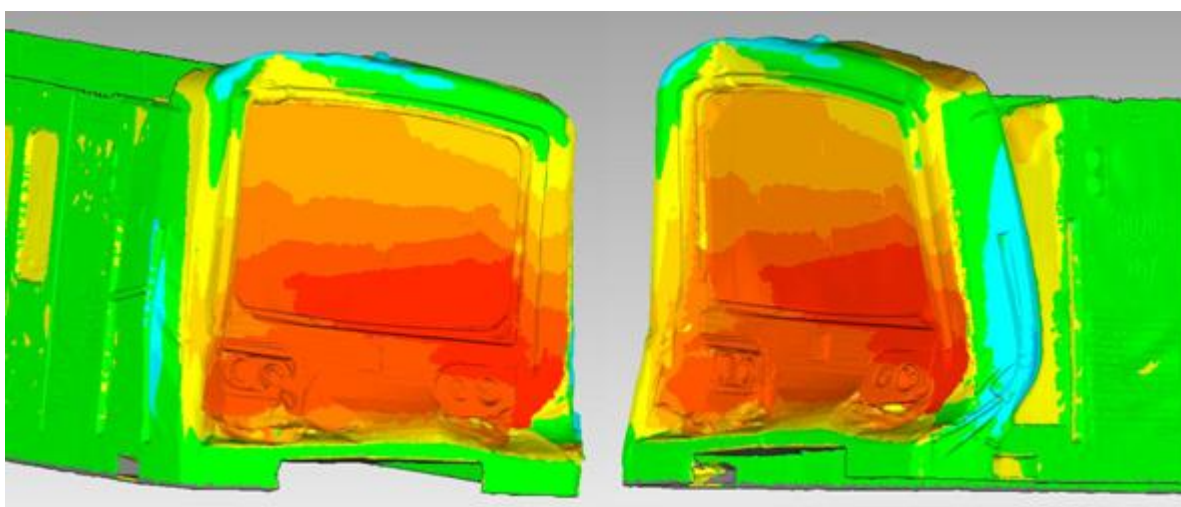
**Εικόνα 5.8 :** Δοκιμή του εργαλείου “3d compare” με μέγιστη τιμή απόκλισης 14cm. Η εμπρόσθια περιοχή του βαγονιού χρωματίζεται με γκρι γιατί απέχει μεγαλύτερη απόσταση από το πρότυπο και το σφάλμα ταύτισης των 2 μοντέλων είναι 2.3cm.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (5.8), με πράσινο είναι χρωματισμένες όλες οι περιοχές που αποκλίνουν έως 2.2cm (όσο περίπου και το σφάλμα της μεθόδου στην συγκεκριμένη περίπτωση) και εν συνεχεία με διαβαθμίσεις του μπλε φαίνονται όλες οι αρνητικές αποκλίσεις, και με διαβαθμίσεις του κόκκινου όλες οι θετικές.

Σημειώνεται ότι οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στα παράθυρα του βαγονιού δεν αφορούν ζημιά, αλλά την αδυναμία σχεδίασης τους στο πρότυπο σχέδιο λόγω έλλειψης πληροφορίας.



Εικόνα 5.9 α



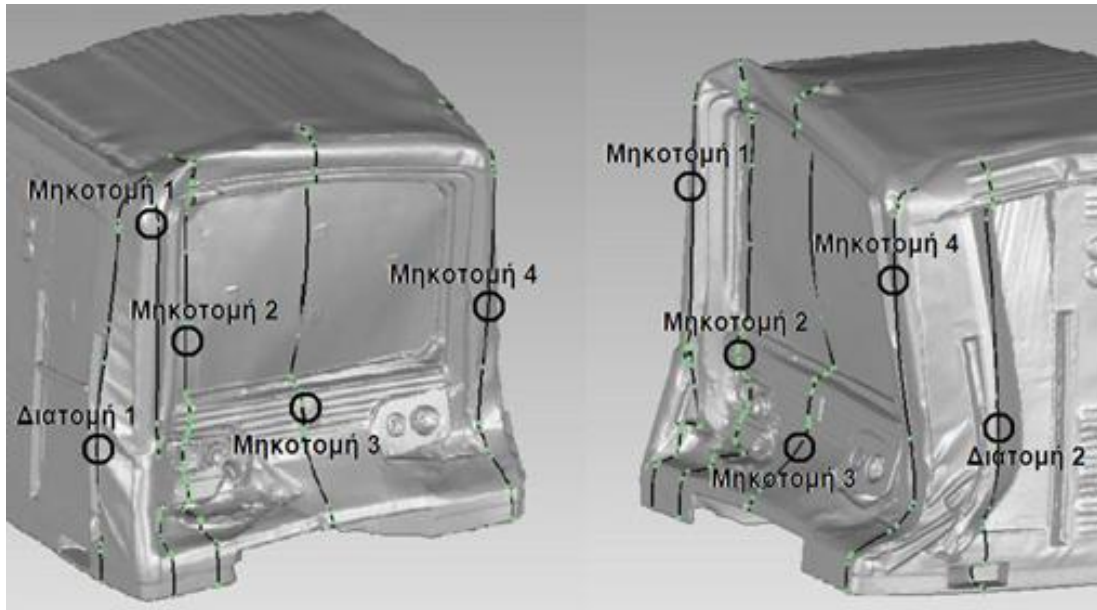
Εικόνα 5.9 β

Εικόνα 5.9 γ

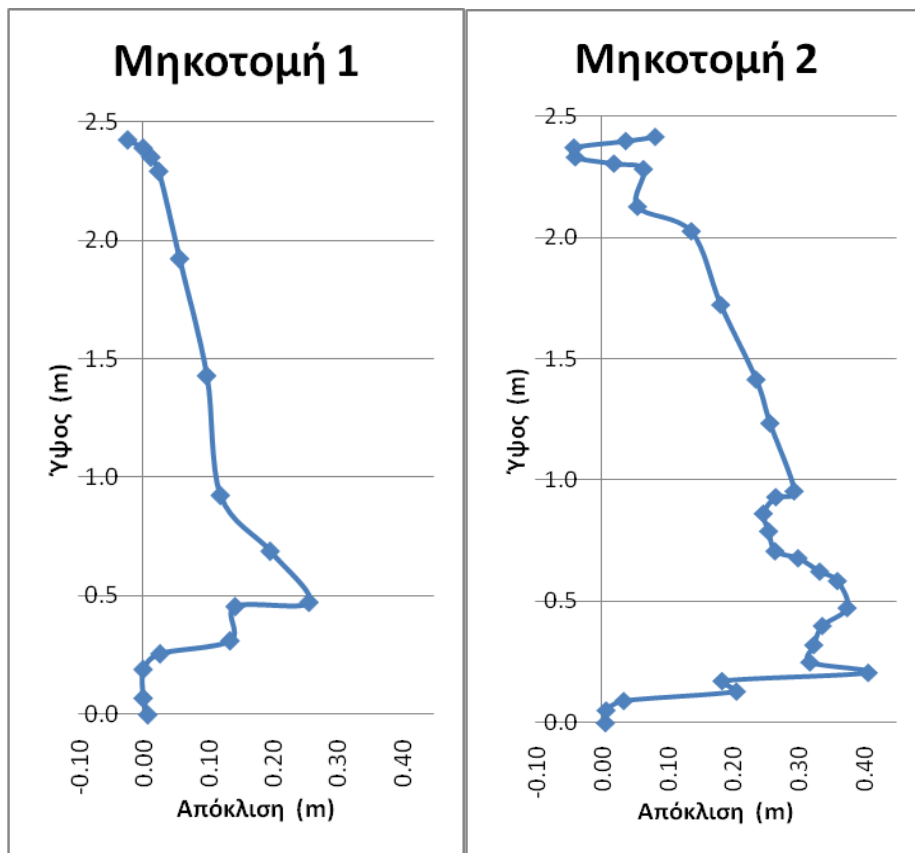
**Εικόνα 5.9** Το αποτέλεσμα του εργαλείου “3d compare”. Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται είναι 41cm και το σφάλμα (RMS) της ταύτισης 5.7cm.

Επιπλέον ,εκτός από τα τρισδιάστατα αποτελέσματα χρωματικής διαφοροποίησης, εξήχθησαν και δισδιάστατα διαγράμματα (5.1.α,β,γ,δ,ε,στ) σε τέσσερις θέσεις μηκοτομών και δύο θέσεις διατομών, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10. Οι μετρήσεις

έγιναν χειροκίνητα ανάμεσα στις τομές και στο πρότυπο μοντέλο και εμπεριέχουν το σφάλμα ταύτισης των δύο επιφανειών.

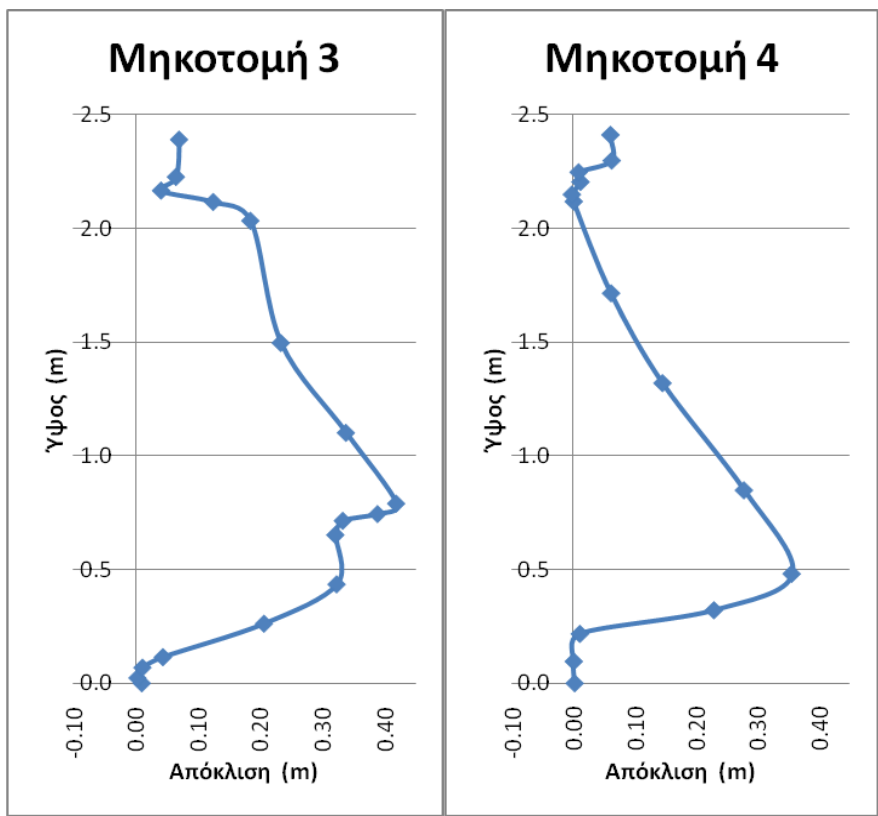


**Εικόνα 5.10 :** Θέσεις τομών για τη δισδιάστατη αναπαράσταση αποκλίσεων.



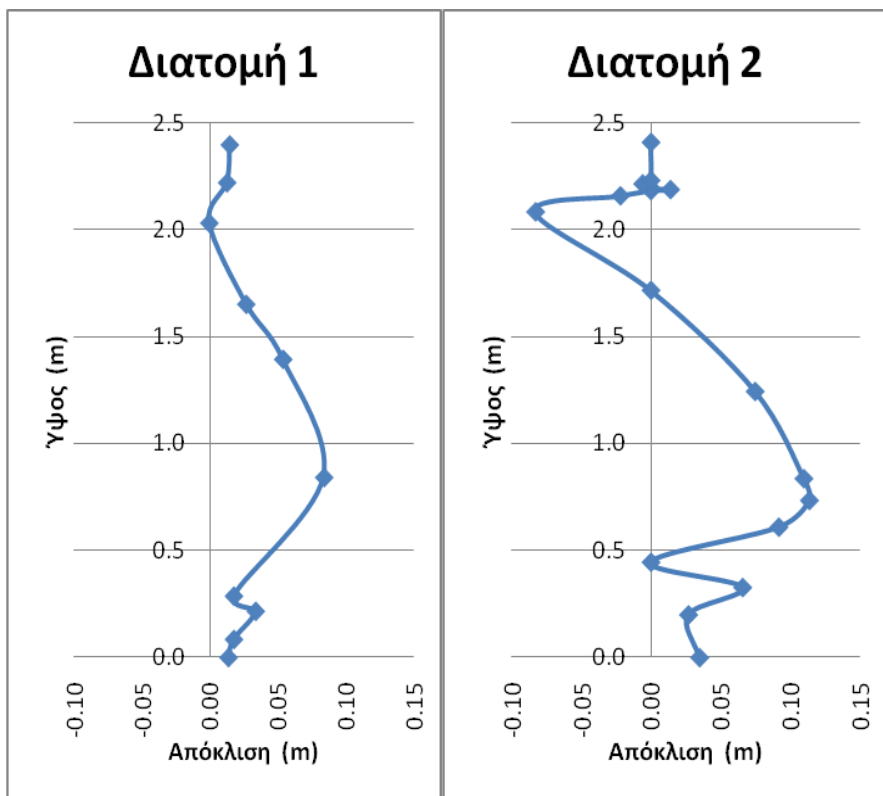
Διάγραμμα 5.1 α

Διάγραμμα 5.1 β



Διάγραμμα 5.1 γ

Διάγραμμα 5.1 δ



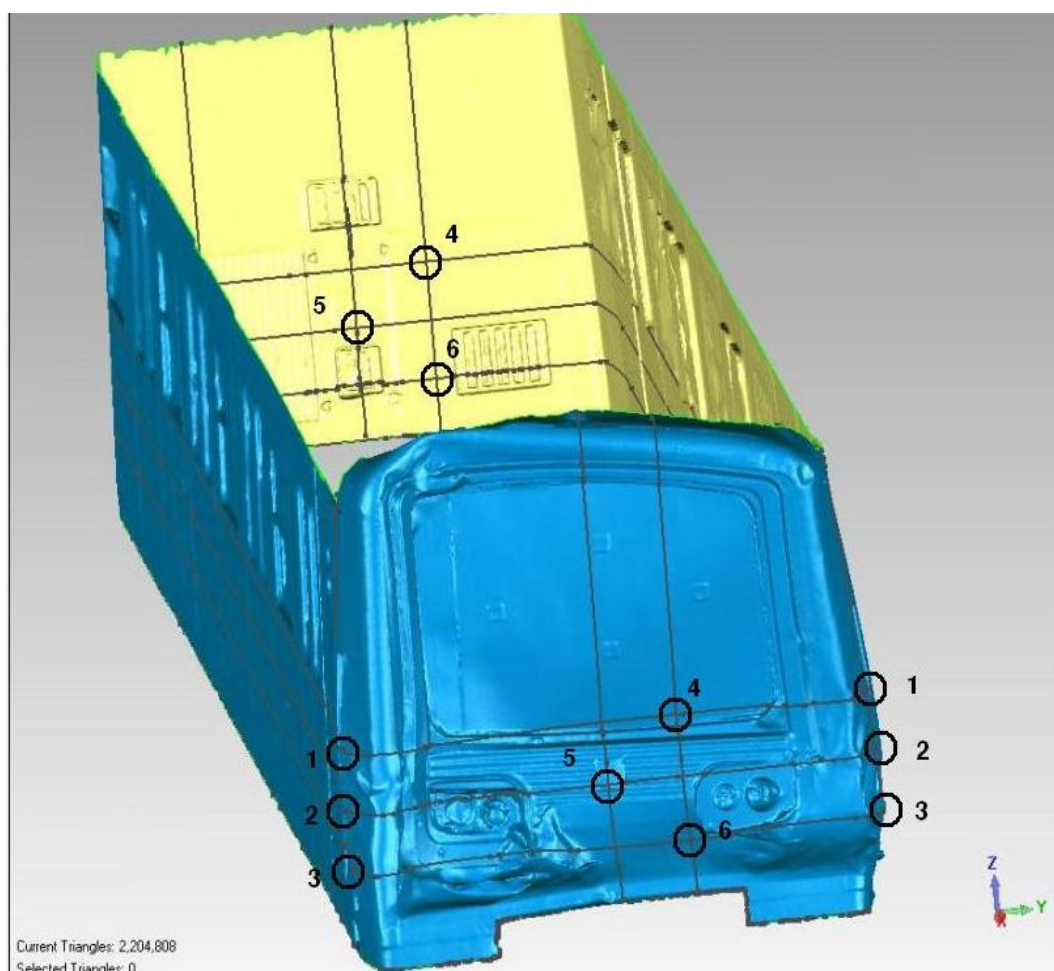
Διάγραμμα 5.1 ε

Διάγραμμα 5.1 στ

**Διάγραμμα 5.1 :** Δισδιάστατη απεικόνιση των αποκλίσεων.

Σημειώνεται ότι το τελικό σφάλμα αυτής της μεθόδου θεωρείται σχετικά μεγάλο, κάτι που οφείλεται στις δυσμενείς συνθήκες και στις δυσκολίες που αναλύθηκαν παραπάνω σε αυτή την ενότητα, και δεν επιτρέπει την εξαγωγή αποτελεσμάτων μεγάλης ακρίβειας. Παρόλα αυτά προσφέρει μια πολύ καλή γενική εσοπτεία του αντικειμένου και της ζημιάς που έχει υποστεί.

Συμπληρωματικά έγιναν κάποιες μετρήσεις, όσο αυτό ήταν δυνατόν, στα σημεία που από το “3d compare” έδειχναν να έχουν υποστεί τη μεγαλύτερη ζημιά. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν κάποιες τομές που αφορούσαν το μπροστινό τμήμα αυτή τη φορά και μετρήθηκαν τρία πλάτη και τρία μήκη σε αυτές. Αυτές οι μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα δεδομένα των πρότυπων σχεδίων, μετρημένα πάνω στο μοντέλο του autocad στα αντίστοιχα σημεία.



**Εικόνα 5.11 :** Οι τομές στο μπροστινό τμήμα και τα σημεία στα οποία έγιναν οι έξι μετρήσεις (τρία πλάτη και τρία μήκη).

Η μεθοδολογία εξαγωγής των τομών και των μετρήσεων είναι ίδια με αυτή που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

		Μέτρηση Geomagic (m)	Μέτρηση autocad (m)	Διαφορές (m)	Πληροφορία από χρωματική διαβάθμιση (3d-compare) (m) *
Πλάτος	1	2.853	2.712	-0.141	από -0.062 έως -0.188
Πλάτος	2	2.871	2.737	-0.134	από -0.125 έως -0.250
Πλάτος	3	2.86	2.762	-0.098	από -0.062 έως -0.188
Μήκος	4	16.482	16.938	0.451	από 0.344 έως 0.407
Μήκος	5	16.623	16.961	0.338	από 0.282 έως 0.344
Μήκος	6	16.801	16.986	0.185	από 0.156 έως 0.219

**Πίνακας 5.2 :** Μετρήσεις στο μπροστά τμήμα

\*Στα πλάτη τα όρια της χρωματικής διαβάθμισης από το “3d-compare” τέθηκαν με βάση το άθροισμα της πληροφορίας από τη δεξιά και την αριστερή πλευρά. Στα μήκη, θεωρώντας σταθερό το σημείο του πίσω τμήματος, τέθηκε η διαβάθμιση της περιοχής μόνο του μπροστινού σημείου.

Συγκρίνοντας τις διαφορές των μετρήσεων με την πληροφορία από τη χρωματική διαφοροποίηση του “3d-compare”, φαίνεται πως αυτά συμπίπτουν γενικά, εντός πάντα των δεδομένων σφαλμάτων.

Μέγιστη διαφοροποίηση των μεθόδων παρατηρείται στο μήκος 4, η χρωματική περιοχή του οποίου δηλώνει απόκλιση 34.4-40.7cm, ενώ οι μετρήσεις δίνουν διαφορά 45.1cm. Φυσικά, πρέπει να ληφθεί υπ’όψιν η δυσκολία μέτρησης σε ίδια σημεία ανάμεσα στα δύο μοντέλα.

Τέλος, σημειώνεται ότι στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια εξαγωγής μετρητικών στοιχείων από το τρισδιάστατο μοντέλο του βαγονιού με τη χρήση του προγράμματος Geomagic. Σε επίπεδο ανάλυσης των φθορών και του ατυχήματος υπάρχει μεγάλη επιστημονική έρευνα, κατά την οποία υπολογίζεται η πλαστική παραμόρφωση των οχημάτων μέσα από μαθηματικά μοντέλα, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και τα νευρωνικά δίκτυα. Σε αυτές τις εξειδικευμένες τεχνικές γίνεται μέσα από αλγόριθμους και επαναληπτικές μαθηματικές μεθόδους η

προσομοίωση του ατυχήματος. Έτσι, η μελέτη οδηγεί στον υπολογισμό των ζητούμενων πλαστικών παραμορφώσεων, στη διαδικασία αποκατάστασής τους αλλά και στον υπολογισμό των ταχυτήτων των οχημάτων πριν το ατύχημα, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα σημάδια στο οδόστρωμα.

## **Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα-Προτάσεις**

### **6.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Αρχικά αναλύονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στις εργασίες πεδίου και γραφείου και προτείνονται λύσεις για αυτά. Στη συνέχεια αξιολογείται η ποιότητα των τελικών παραγώγων και των αποτελεσμάτων της εργασίας και παράλληλα γίνονται προτάσεις για τη συνέχισή της.

### **6.2 Συμπεράσματα**

#### **6.2.1 Συλλογή δεδομένων**

Κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων υλοποιήθηκαν τέσσερις στάσεις του σαρωτή εκ των οποίων η μια από αυτές βρισκόταν σε οροφή κτιρίου, ώστε να αποτυπωθεί η οροφή του βαγονιού. Στην πορεία φάνηκε ότι το νέφος σημείων παρουσίασε σημαντικά κενά πληροφορίας σε σημεία της οροφής, λόγω της καμπυλότητάς της, αλλά και λόγω της μη επικάλυψης στο πεδίο σάρωσης από άλλη στάση.

Αυτά τα κενά συμπληρώθηκαν με τα ειδικά εργαλεία του λογισμικού Geomagic, αποκλειστικά για λόγους πληρότητας του μοντέλου, χωρίς αυτό να έχει επίδραση στα μετρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν για το συγκεκριμένο βαγόνι. Παρόλα αυτά σε περίπτωση που για τα ζητούμενα κάποιας εργασίας υπήρχε η ανάγκη το τελικό μοντέλο να είναι πλήρες και ακριβές σε όλη την επιφάνειά του, θα έπρεπε κατά το στάδιο των εργασιών πεδίου να συμπληρωθούν οι θέσεις σάρωσης με περισσότερες που λαμβάνουν σημεία οροφής από διαφορετικές οπτικές γωνίες.

Το ίδιο θα έπρεπε να συμβεί σε περίπτωση που υπήρχε η ανάγκη για περισσότερη λεπτομέρεια στα σημεία του βαγονιού τα οποία είχαν μαύρο χρώμα. Αυτά παρουσίασαν πρόβλημα κυρίως στις περιοχές έντονου ανάγλυφου, αφού σε περίπτωση προσπάθειας διόρθωσής τους με τα εργαλεία του Geomagic χανόταν



και κομμάτι της ανάγλυφης πληροφορίας. Το φαινόμενο αυτό συνέβη επειδή το μαύρο επιτρέπει πολύ μικρή έως καθόλου επιστροφή στις ακτίνες laser που ανακλά, κάτι το οποίο δημιούργησε κενά σε αυτές τις περιοχές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το μαύρου χρώματος περίγραμμα του γκράφιτι που βρισκόταν στη μια πλευρά του βαγονιού, το οποίο αποτυπώθηκε σαν ανάγλυφο πάνω στην επιφάνεια λόγω των κενών πληροφορίας που δημιούργησε.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα, επίσης, δεν επηρέασε την ποιότητα της μετρητικής πληροφορίας που προέκυψε, αλλά αντίστοιχα με αυτά που ειπώθηκαν για την οροφή, αν υπήρχε ανάγκη να αποφευχθεί, θα έπρεπε να γίνει συμπλήρωση με περισσότερες μετωπικές θέσεις σάρωσης από κοντινότερη απόσταση στα προβληματικά σημεία.

Για το στάδιο της σάρωσης των στόχων είχε επιλεγθεί να τοποθετηθούν τετράγωνοι-επίπεδοι στόχοι πάνω στην επιφάνεια του βαγονιού. Τοποθετήθηκαν αρκετά περισσότεροι από τους αναγκαίους και αυτό επειδή πολλοί σαρώθηκαν ελλιπώς λόγω των μεγάλων γωνιών σάρωσης, οπότε και παρουσίασαν προβλήματα στον υπολογισμό του κέντρου τους. Θα μειωνόταν ο χρόνος των εργασιών πεδίου αν είχαν χρησιμοποιηθεί σφαιρικοί στόχοι. Αυτοί θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε σημεία εκτός της επιφάνειας του βαγονιού, που να ευνοούν τις γωνίες σάρωσης ή ακόμα και να είναι ορατοί από περισσότερες στάσεις, αφού δεν είναι απαραίτητο να σαρωθούν εξ ολοκλήρου για να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια το κέντρο τους. Έτσι, θα χρειαζόταν μικρότερος αριθμός στόχων και θα επιταχυνόταν η διαδικασία τοποθέτησης και σάρωσής τους.

Η πυκνότητα είχε οριστεί στο 1 m σε εμβέλεια 10m κατά μέσο όρο, κάτι που οδήγησε μεν σε λεπτομερές νέφος, αλλά δημιούργησε δυσκολίες στην επεξεργασία του αρχείου λόγω του μεγάλου όγκου του. Με τη συγκεκριμένη πυκνότητα κάθε σάρωση διαρκούσε περίπου 20 λεπτά, χρόνος ικανοποιητικά καλός για τις εργασίες πεδίου.

### **6.2.2 Επεξεργασία δεδομένων**

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων αφορούσε τη συνένωση των νεφών από τις τέσσερις στάσεις του σαρωτή και πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Cyclone. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα ανταποκρίθηκε στις ανάγκες της εργασίας και η συνένωση επιτεύχθηκε χωρίς προβλήματα. Λόγω της περίσσειας στόχων που είχαν

τοποθετηθεί κατά το στάδιο της συλλογής δεδομένων υπήρχε σε κάθε ζεύγος στάσεων ο ελάχιστος αριθμός των τριών σωστά σαρωμένων στόχων, οι οποίοι αναγνωρίζονταν αυτόματα από το πρόγραμμα. Κατά αυτό τον τρόπο το πρώτο ζεύγος (στάσεις 1-2) συνενώθηκε με ακρίβεια 1mm, το συνενωμένο νέφος με την στάση 3 με ακρίβεια επίσης 1mm, και τέλος το συνολικό νέφος με την στάση 4 με ακρίβεια 2mm. Εν συνεχεία ο πρώτος καθαρισμός από θόρυβο που συνέβη στο Cyclone επίσης δεν παρουσίασε ιδιαίτερη δυσκολία, με εξαίρεση το μεγάλο όγκο δεδομένων, τα οποία καθυστέρησαν τη διαδικασία και κατέστησαν το αρχείο σχετικά δύσχρηστο. Εμφανέστερο όμως έγινε το συγκεκριμένο πρόβλημα του μεγάλου όγκου κατά την εξαγωγή των δεδομένων από το Cyclone και την εισαγωγή τους στο Geomagic. Αυτή η διαδικασία έπρεπε αναγκαστικά να γίνει τμηματικά λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών που χρησιμοποιήθηκαν. Το συνολικό νέφος των 90 περίπου εκατομμυρίων σημείων διαχωρίστηκε σε πέντε κομμάτια των 20-25 εκατομμυρίων αντίστοιχα, τα οποία εξήχθησαν αυτόνομα από το Cyclone. Επίσης αυτόνομα συνέβη σε κάθε τμήμα η βελτιστοποίηση του νέφους και η μοντελοποίηση στο Geomagic, κάτι που αποδείχθηκε αρκετά χρονοβόρο, παρά την εφαρμογή των αλγορίθμων μείωσης σημείων. Χωρίς να ληφθεί υπ'όψιν ο χρόνος εξοικείωσης με τα προγράμματα, για την επεξεργασία των δεδομένων χρειάστηκαν περίπου 100 ανθρωποώρες.

### **6.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων**

Αρχικά έγιναν μετρήσεις σε δύο σημεία (άνω και κάτω) δέκα θέσεων διατομών, τα αποτελέσματα των οποίων ήταν άμεσα συγκρίσιμα με την αρχική σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ (αμέσως μετά το ατύχημα). Οι διαφορές ανάμεσα στις μετρήσεις που έγιναν πάνω στο τρισδιάστατο μοντέλο του οχήματος και στα αποτελέσματα της εμπειρικής μεθόδου που είχε εφαρμοστεί στα ναυπηγεία ήταν της τάξεων των 8 mm με μέγιστη απόκλιση στα 1.3 cm. Αυτή η τιμή, λαμβάνοντας υπ'όψιν το σφάλμα κάθε μεθόδου αλλά κυρίως τη δυσκολία αναγνώρισης ακριβώς των ίδιων σημείων ανάμεσα στις δύο σειρές μετρήσεων, δείχνει ότι το μοντέλο της σάρωσης είναι ακριβές και παρέχει αξιόπιστη μετρητική πληροφορία.

Εν συνεχεία παρήχθησαν δισδιάστατα αλλά και τρισδιάστατα μετρητικά αποτελέσματα τα οποία παρουσίαζαν τις αποκλίσεις του μοντέλου από τις πρότυπες διαστάσεις (πριν το ατύχημα), άρα και τις φθορές που είχε υποστεί το όχημα.

Και τα δισδιάστατα διαγράμματα αλλά και το τρισδιάστατο μοντέλο χρωματικών διαβαθμίσεων ανάλογα με την απόκλιση υστερούν σε αξιοπιστία λόγω της έλλειψης των κατασκευαστικών διαστάσεων. Διαθέσιμα στα σχέδια ήταν μόνο τα λειτουργικά μεγέθη του βαγονιού, τα οποία δεν έδιναν την δυνατότητα ακριβούς αναγνώρισης ομόλογων σημείων ανάμεσα στο μοντέλο της σάρωσης και στο «πρότυπο» μοντέλο που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον autocad. Έτσι, δε μπορούσε να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στο επίπεδο της ταύτισης των δύο μοντέλων, οπότε και στην μέτρηση των αποκλίσεών τους. Επίσης, κάποια μεγέθη χρειάστηκε να μετρηθούν με κλιμακόμετρο πάνω στα σχέδια, κάτι το οποίο μείωσε περαιτέρω την αξιοπιστία της μεθόδου.

Επιπρόσθετα, στη μέθοδο της τρισδιάστατης σύγκρισης, επειδή η αναφορά σφάλματος που δίνει το λογισμικό αφορά «μέσο τετραγωνικό σφάλμα» (RMS) και αποτελεί ποιοτική πληροφορία ταύτισης των μοντέλων, το μεγάλο επίπεδο της ζημιάς του μπροστινού τμήματος μειώνει την ακρίβεια της μεθόδου. Το σφάλμα ταύτισης χωρίς να λαμβάνεται υπ'όψιν το μπροστινό τμήμα είναι 2.3 cm, ενώ μαζί με αυτό ανεβαίνει στα 5.7 cm. Αυτές οι τιμές σφάλματος δεν αφορούν σε καμία περίπτωση την ακρίβεια του μοντέλου, αλλά τη δυσκολία σύγκρισής του με τα πρότυπα σχέδια.

Παρόλα αυτά, τα συγκριτικά αποτελέσματα παρέχουν μια πολύ καλή εμποπτεία των φθορών και θα μπορούσαν να είναι πολύ πιο αξιόπιστα σε περίπτωση ύπαρξης ενός λεπτομερούς πρότυπου μοντέλου με αναγνωρίσιμα ομόλογα σημεία, ώστε να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια η σύγκριση.

Συνολικά, η μέθοδος της επίγειας laser σάρωσης ενδείκνυται για τέτοιου είδους εργασίες, αφού μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρό χρόνο, αν και απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και εξειδίκευση στη χρήση λογισμικών.

### 6.3 Προτάσεις

- Σάρωση του πλαισίου (σασί) του βαγονιού και μοντελοποίησή του για σύγκριση με τα αποτελέσματα των υψομετρικών διαφορών από τη σειρά μετρήσεων του ΗΣΑΠ.
- Συμπλήρωση των κενών της οροφής και των προβληματικών σημείων της επιφάνειας με επιπρόσθετες σαρώσεις για πληρότητα του μοντέλου.
- Συγκρίσεις των μετρήσεων της μοντελοποιημένης επιφάνειας με τα λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια του βαγονιού για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με τις φθορές του.
- Συνδυασμός μεθόδων φωτογραμμετρίας με ταύτιση φωτογραφιών και τρισδιάστατου μοντέλου για την παραγωγή ενός φωτορεαλιστικού αποτελέσματος με μετρητική πληροφορία.
- Χρήση άλλου σαρωτή για σύγκριση αποτελεσμάτων. Ένας σαρωτής τεχνολογίας διαφοράς φάσης (Phase Based) μπορεί να μειώσει τον χρόνο εργασιών πεδίου λόγω της αυξημένης ταχύτητάς του.
- Επεξεργασία του τρισδιάστατου μοντέλου με εξειδικευμένα λογισμικά για ανάλυση της πλαστικής παραμόρφωσής του και υπολογισμό της ταχύτητάς του πριν τη σύγκρουση. Τέτοια λογισμικά συνήθως χρησιμοποιούν μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και νευρωνικά δίκτυα.



# Βιβλιογραφία

## Ξένη βιβλιογραφία

Boehler W., Bordas V.M., Marbs A. (2003). Investigating Laser Scanner Accuracy, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, XIXth Cipa Symposium at Antalya, Turkey.

Lerma Garcia, J.L, Van Genechten, B., Heine, E., Santana Quintero, M. (eds), (2008). Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Training material based on practical applications. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.

Remondino, F., (2010). Terrestrial Optical Active Sensors – Theory and Applications, International Summer School “3D Modelling in Archaeology and Cultural Heritage 2010”, Durham, UK, p.18-19.

Vosselman and Hans-Gred Maas, (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing. ISBN 978-1-904445-87-6.

Yuriy Reshetyuk, (2009). Terrestrial laser scanning: Error sources, self-calibration and direct georeferencing. VDM Verlag, ISBN 978-3639175509.

Xiao-yun Zhang, Xian-long Jin, Wen-guo Qi, Yi-zhi Guo , (2008). Vehicle crash accident reconstruction based on the analysis 3D deformation of the auto-body. Advances in Engineering Software , Volume 39, Issue 6, June, Pages 459–465.

Xiangdong X., (2005). Modelling collisions of rail vehicles with deformable objects. A report produced for Rail Safety and Standards Board (RSSB). [www.rssb.co.uk/sitecollectiondocuments.pdf](http://www.rssb.co.uk/sitecollectiondocuments.pdf)

Behring D., Thesing J., Becker H., Zobel R., (2001). Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations. [www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/crash\\_testing.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/crash_testing.pdf)

Smith P., Harvey B., (2006). Boat Hull Modelling using Terrestrial Laser Scanners. School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales Sundeby, Australia. [www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/smith%26harvey2006.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/smith%26harvey2006.pdf)

Sindenberry M., (2007). Accuracy Assessment of 3D Laser Scanning Data Utilising Different Registration Methods, Dissertation towards the degree of Bachelor of Spatial Science, Surveying, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Australia.

Andriuskeviciute I., (2010). Comparison of Short Range and Long Range Laser Scanner's Accuracy Differences, Bachelor Project, Gjøvik University College.

Randles B., Jones B., Welcher J., Szabo T., Elliott D., MacAdams C., (2010). The Accuracy of Photogrammetry vs. Hands-on Measurement Techniques used in Accident Reconstruction, SAE International, [www.photomodeler.com/ar-forensics/documents/2010-01-0065.pdf](http://www.photomodeler.com/ar-forensics/documents/2010-01-0065.pdf)

Pagounis V., Tsakiri M., Palaskas S., Biza B., Zaloumi E., (2006). 3D Laser Scanning for Road Safety and Traffic Accident Reconstruction, Proceedings of FIG–Engineering Surveys for Construction Works I, Munich, Germany, October 8-13.

## **Ελληνική βιβλιογραφία**

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β., (2012). Βαθμονόμηση Επίγειων Σαρωτών Laser στο Πλαίσιο των Διεθνών Προδιαγραφών ISO, 4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 3-4 Φεβρουαρίου, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα.

Τσιούκας Β. (2009). Χρήση νέων τεχνολογιών στην 3D αποτύπωση μνημείων και χώρων. Σημειώσεις για το σεμινάριο του ΤΕΕ. Ξάνθη, Ελλάδα.

Δογγούρης Σ., (2005). Βιομηχανική Γεωδαισία, Σημειώσεις μαθήματος Τεχνική Γεωδαισία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Κισάκης Δ., (2011). Συγκριτική αξιολόγηση φωτογραμμετρικών μεθόδων συλλογής τρισδιάστατης πληροφορίας. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Σταθοπούλου Ε., (2011). Τρισδιάστατα μοντέλα αρχιτεκτονικά σύνθετων αντικειμένων. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Φάκα Μ., (2011). Γεωμετρική τεκμηρίωση ιερού ναού Τίμιου Σταυρού, στο Πελενδρί, Κύπρος. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Συγίζης Κ., (2009). Αποτύπωση σπηλαίων με χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης laser. Εφαρμογή στο σπήλαιο Κεφάλας. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Γεωργαλάς Σ., (2001). Επίγεια σάρωση laser σε εφαρμογές οδοποιίας-μελέτη ορατότητας και επισκόπηση επιφάνειας οδοστρώματος. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Κωτσίδης Η., (2012). Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε σύνθετα υλικά και κολλητούς συνδέσμους με κολλητικά μέσα. Μεταπτυχιακή Εργασία, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών” ΕΜΠ.

Στοιχεία από το αρχείο του ΗΣΑΠ.

## **Ιστότοποι**

[www.leica-geosystemssolutionscenters.com/](http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/) (Τελευταία πρόσβαση 12/7/2012)

[www.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-2\\_62189.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-2_62189.htm) (Τελευταία πρόσβαση 12/7/2012)

[www.iwitnessphoto.com](http://www.iwitnessphoto.com) (Τελευταία πρόσβαση 7/10/2012)

[www.faro.com](http://www.faro.com) (Τελευταία πρόσβαση 7/10/2012)

[www.aicon3d.com/products/moveinspect-technology/procam/at-a-glance/procam-functional-principle.html](http://www.aicon3d.com/products/moveinspect-technology/procam/at-a-glance/procam-functional-principle.html) (Τελευταία πρόσβαση 28/9/2012)

[www.crossfiresystem.com](http://www.crossfiresystem.com) (Τελευταία πρόσβαση 28/9/2012)

[www.moto-terzidis.gr](http://www.moto-terzidis.gr) (Τελευταία πρόσβαση 28/9/2012)

[www.gilbertengineering.net](http://www.gilbertengineering.net) (Τελευταία πρόσβαση 22/9/2012)

[www.jrla.net/Histories.html](http://www.jrla.net/Histories.html) (Τελευταία πρόσβαση 5/10/2012)

[www.axrecon.com](http://www.axrecon.com) (Τελευταία πρόσβαση 5/10/2012)

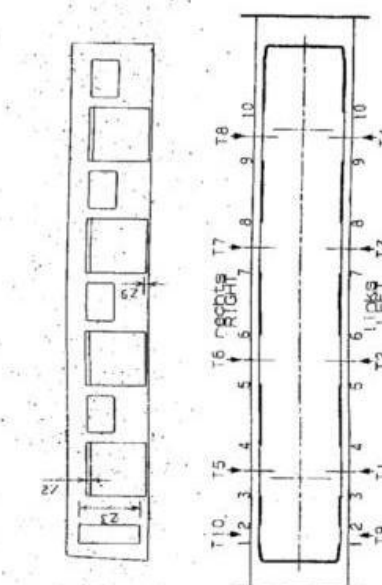
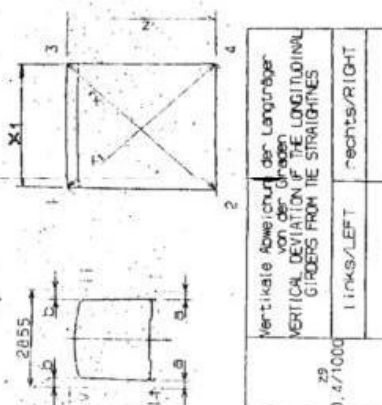
[www.sparpointgroup.com](http://www.sparpointgroup.com) (Τελευταία πρόσβαση 5/10/2012)

[www.Geomagic.com/](http://www.Geomagic.com/) (Τελευταία πρόσβαση 7/10/2012)



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σειρά μετρήσεων ΗΣΑΠ (αμέσως μετά το ατύχημα)



Vertikale Abweichung der Langträger  
VERTICAL DEVIATION OF THE LONGITUDINAL GIRDERS FROM THE STRAIGHTNES

Zul. Maß ADM. DIM.	Tür 1	Tür 2	Tür 3	Tür 4	Tür 5	Tür 6	Tür 7	Tür 8	Tür 9	Tür 10
Z <sub>1</sub>	1930±									

Abweichung der Diagonalen DEVIATION OF DIAGONALS

Zul. Maß ADM. DIM.	Tür 1	Tür 2	Tür 3	Tür 4	Tür 5	Tür 6	Tür 7	Tür 8
X <sub>1</sub>	1620±							

Türbreite DOOR WIDTH

Zul. Maß ADM. DIM.	Tür 1	Tür 2	Tür 3	Tür 4	Tür 5	Tür 6	Tür 7	Tür 8
X <sub>1</sub>	580±							

Zurückliegendes beobachteter Punkte  
ADMISSIBLE DEVIATION OF ADJOINING POINTS  
wasserrecht. HORIZONTAL max. 2 mm

Maß DIM.	a	50%	Maß DIM.	b	NOM.	135%
11	48	111	111	111	154	135
12	51	113	112	112	156	137
13	53	114	113	113	158	139
14	53	114	114	114	158	139
15	52	113	115	115	157	138
16	52	113	116	116	157	138
17	54	115	117	117	159	140
18	54	115	118	118	159	140
19	53	114	119	119	158	139
20	54	115	120	120	159	140

Sichtprobe VISUAL TEST

Sichtbare geschweißte Verbindungen VISIBLE WELDED JOINTS

Sichtbare Risse im Blech PLATE CRACKS VISIBLY

Sichtbare Risse im Profil PROFILE CRACKS VISIBLY

Beibehaltung der Sauberkeit der Seitenflächen MAINTENANCE OF SIDE SURFACES

1 mal top 2 mal bottom

1 mal 1.2 mm 2 mal 2.0 mm

Bemerkungen REMARKS

N. WITTMANN  
 Tag der Abnahme 22.01.09  
 DATE OF INSPECTION 22.01.09 (OF 67-378)

Autobauer: FIRMEN-NR. 3157  
 ORDER-NR. 3157  
 CAD Zeichnung: 3.157  
 Verzeichner für: HAD  
 1.2.2003  
 1.2.2003  
 2.0.2003

Logo: HAD

Logo: ADITRANTZ

Logo: LOG SHEET FOR CAR BODY SHELL

700110 110.005874 02 12 01

**ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ  
MEASUREMENT SHEET**

ΗΜΕΡΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ: 08.01.2009

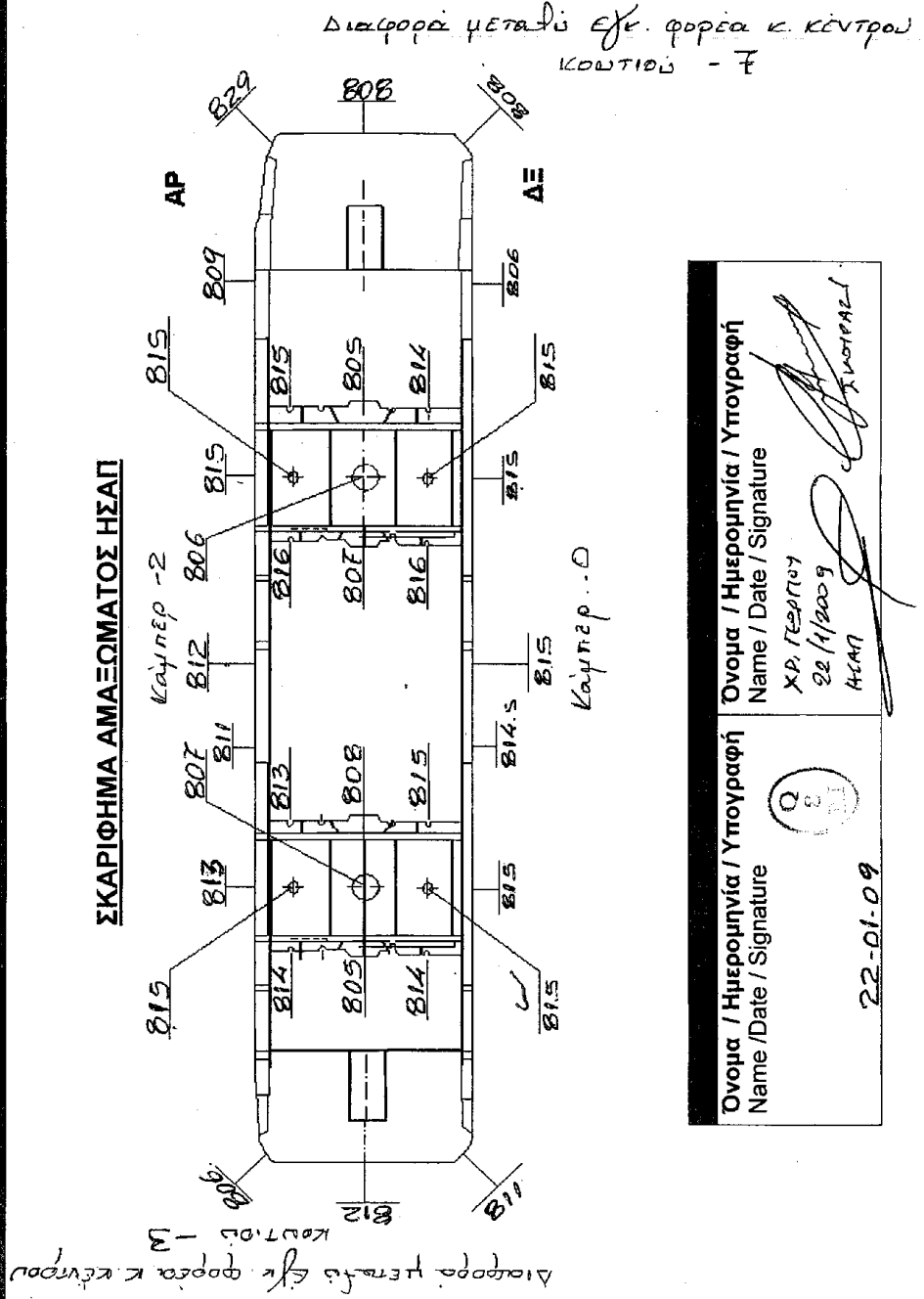
ISSUED DATE

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ / REVISION: 0

ΣΕΛΙΔΑ / PAGE : 1 από / from 1

ΑΡ. ΑΜΑΞΩΜΑΤΟΣ : **3-157**  
CAR BODY N°

**ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΑΜΑΞΩΜΑΤΟΣ ΗΣΑΠ**



Όνομα / Ημερομηνία / Υπογραφή  
Name / Date / Signature

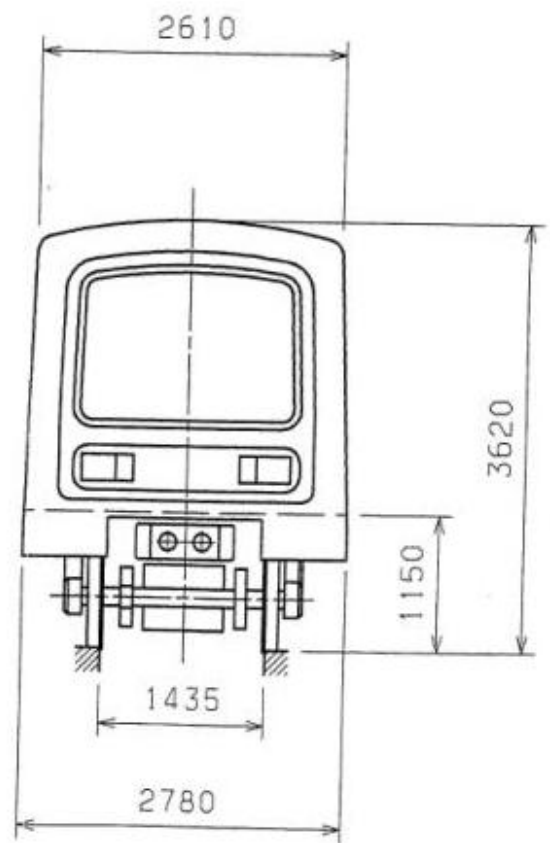
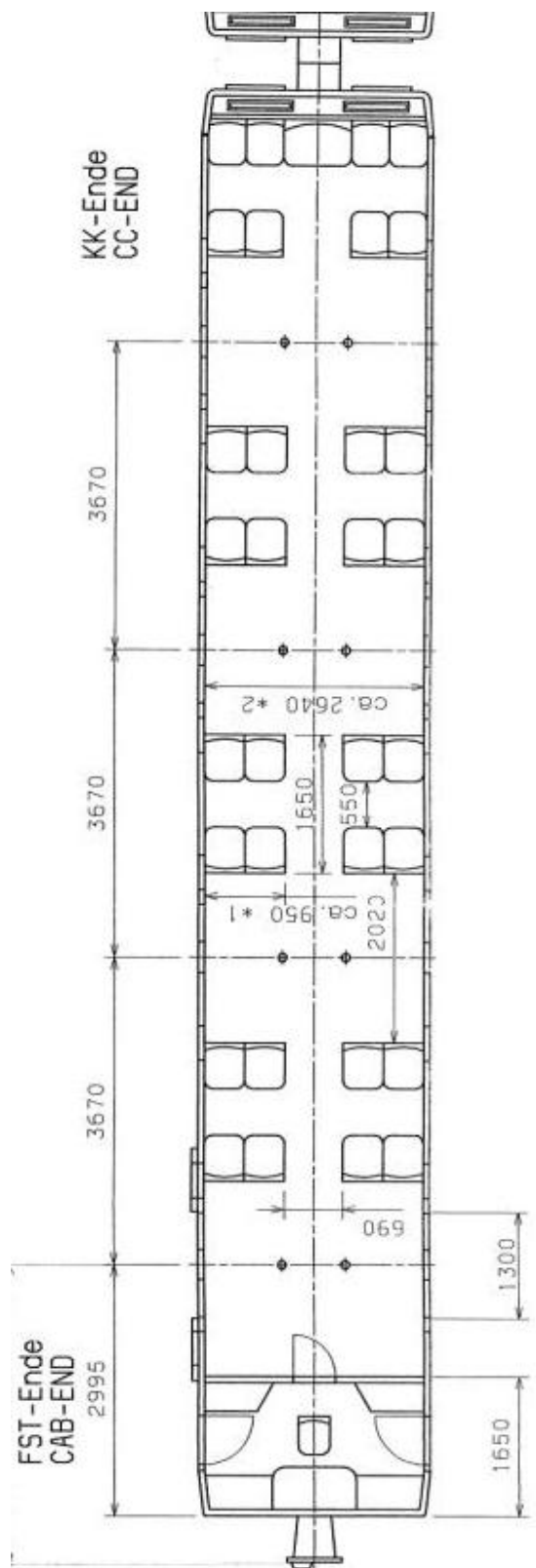
22-01-09

Όνομα / Ημερομηνία / Υπογραφή  
Name / Date / Signature

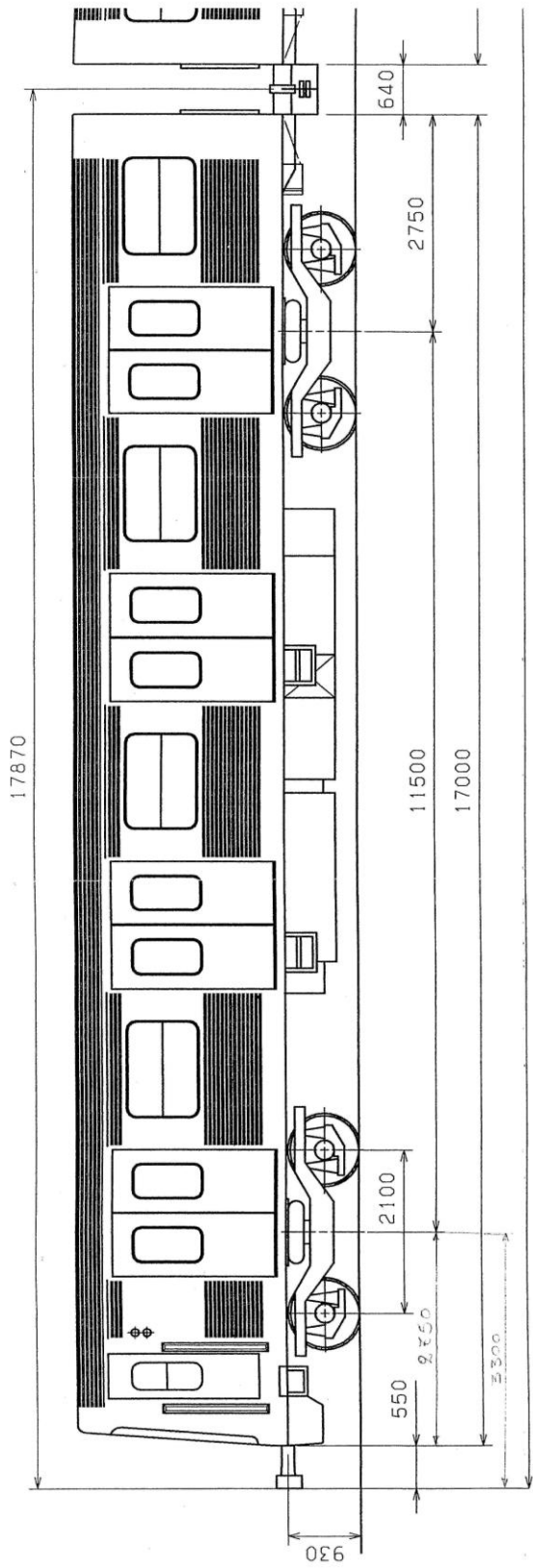
ΧΡ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ  
22/1/2009  
ΗΣΑΠ

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Σχέδια βαγονιού

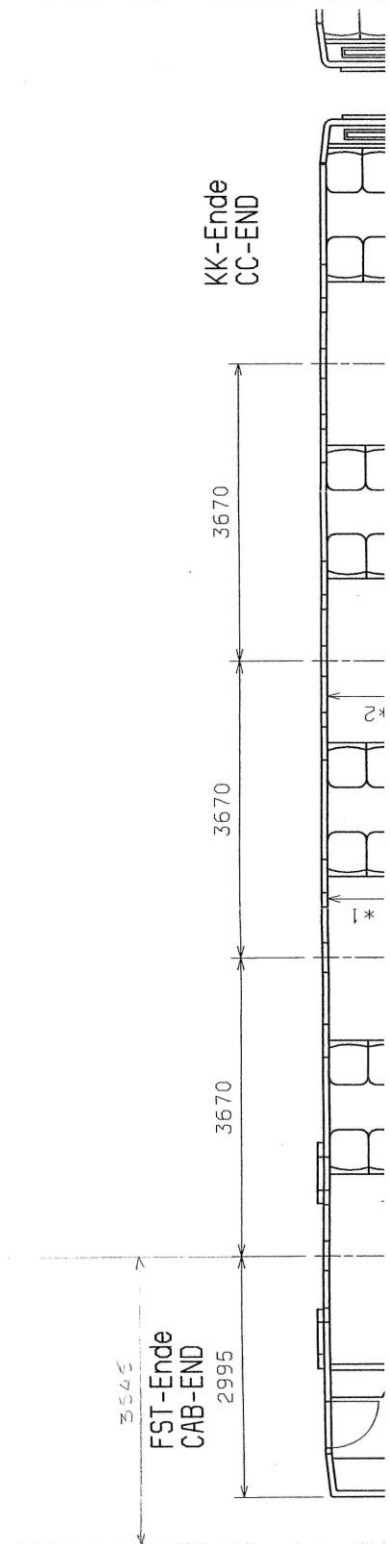


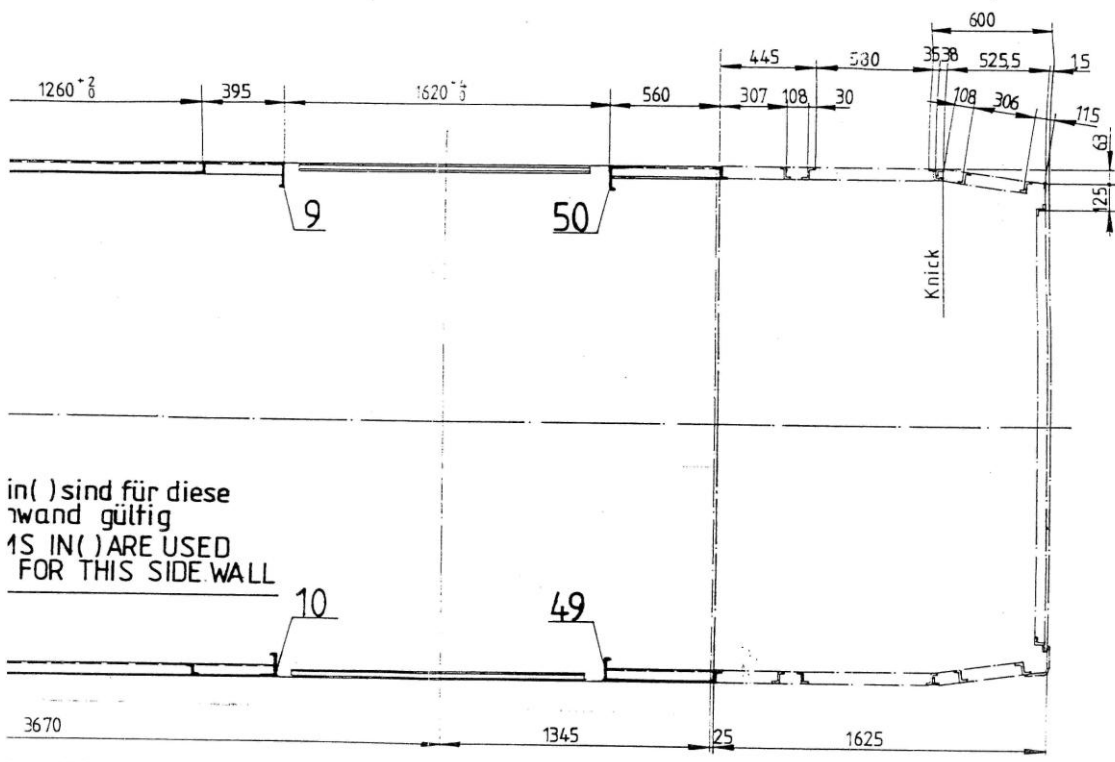
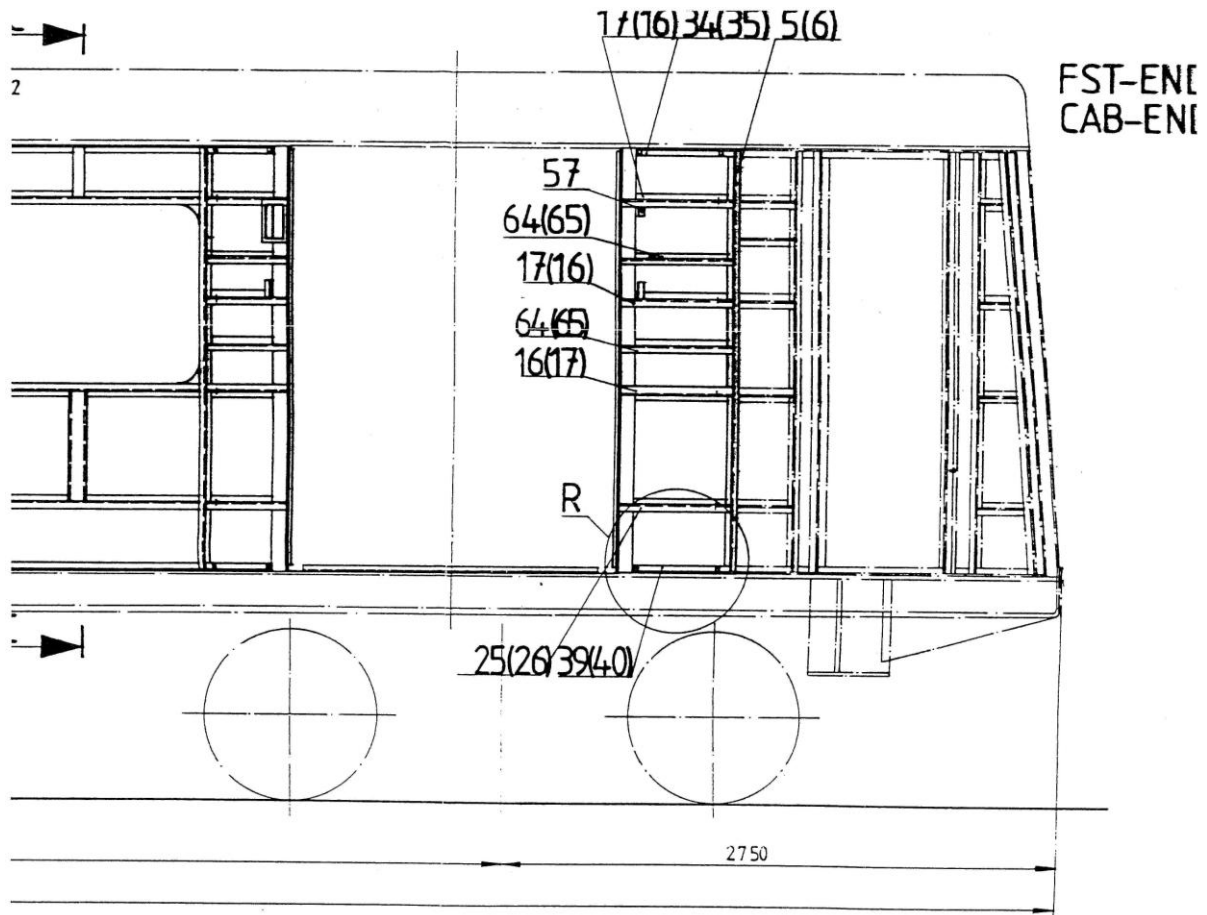
E F G H I J K



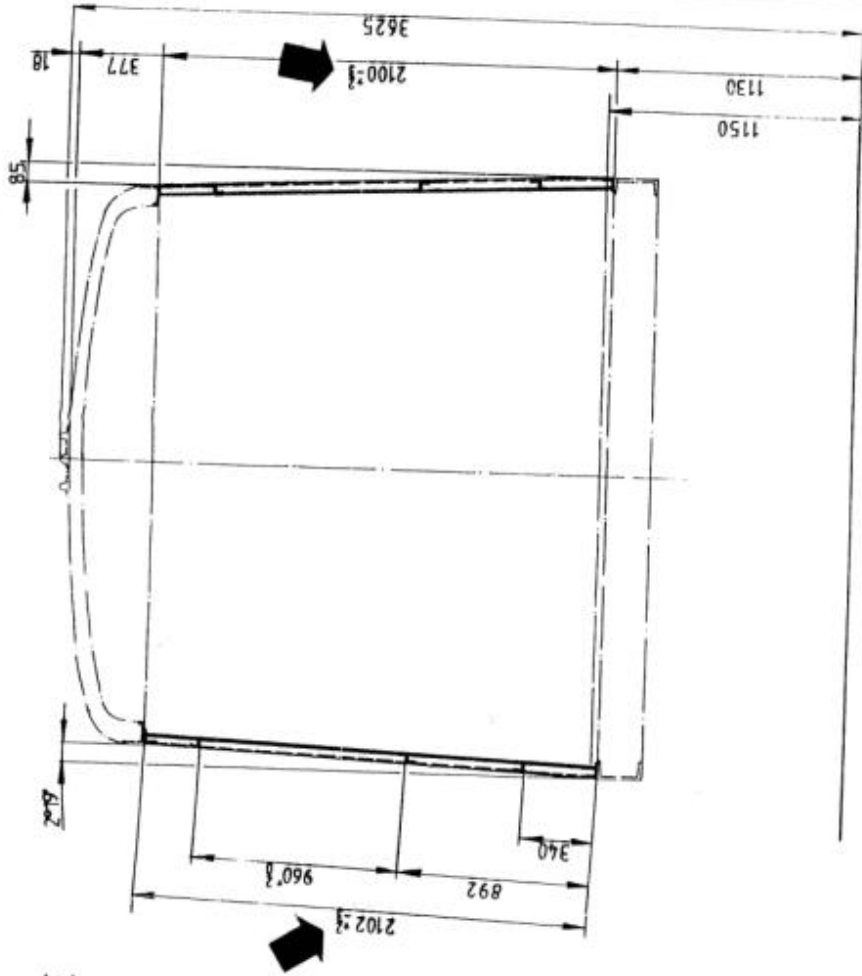
DG 1  
BOGIE 1

DG 2  
BOGIE 2





Schnitt durch Fensterfeld  
GROSS SECTION THROUGH WINDOW SYSTEM



FST-ENDE  
CAB-END

