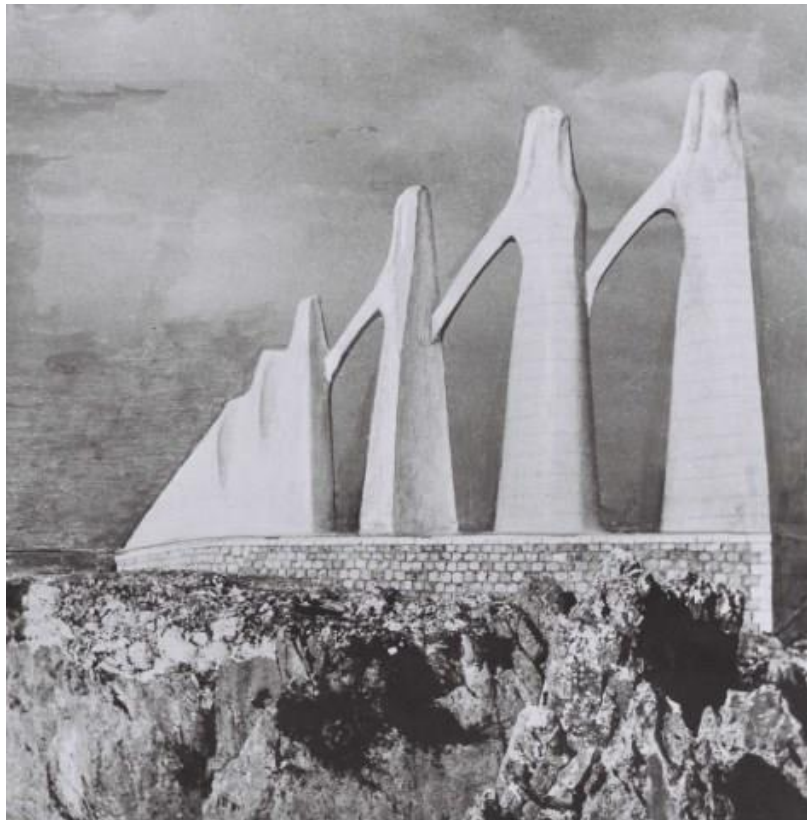




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

**ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
ΜΕ ΑΥΤΟΜΑΤΕΣ ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**



Βασιλική Λασπιά

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Γεωργόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με βοήθησαν και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο για την άψογη συνεργασία, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Σέβη Ταπεινάκη για την αστείρευτη βοήθειά της σε τεχνικά ζητήματα της εργασίας αυτής, και όχι μόνο. Επίσης, ευχαριστώ πάρα πολύ την κα Ρεγγίνα Χλιβερού για τον χρόνο που αφιέρωσε να μου μάθει τα «μυστικά» του Photoshop.

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ τους φίλους και μελλοντικούς συναδέλφους, που όποτε χρειαζόμουν την πολύτιμη βοήθειά τους ήταν πάντα εκεί για μένα, από την αρχή έως το τέλος της φοιτητικής μου πορείας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	12
Abstract	13
1 Εισαγωγή	14
2 Ιστορικά στοιχεία	16
2.1 Κατασκευή και θέση μνημείου	16
2.2 Μορφή μνημείου	19
2.3 Η θυσία του Ζαλόγγου	20
2.4 Ιστορία ανέγερσης του μνημείου του Ζαλόγγου	23
2.5 Βλάβες και αποκατάσταση μνημείου	24
3. Γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων πριν την τεχνική SfM-MVS	28
3.1 Περιγραφή αρχικών φωτογραμμετρικών μεθόδων	32
3.1.1 Παραδείγματα παλιών φωτογραμμετρικών μεθόδων επεξεργασίας	36
3.2 Συμβολή της μεθόδου σάρωσης στη γεωμετρική τεκμηρίωση	40
3.3 Γεωμετρική τεκμηρίωση και αποκατάσταση του μνημείου των Σουλιωτιστών	44
3.3.1 Φωτογραμμετρικές λήψεις	44
3.3.2 Επεξεργασία εικόνων και παραγωγή ορθοεικόνων με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους (αναγωγής – στερεοσκοπικής απόδοσης)	50
3.3.3 Συνοπτική παράθεση μεθοδολογίας της συγκεκριμένης γεωμετρικής τεκμηρίωσης	54
3.4 Διαθέσιμα δεδομένα	60
4. Αυτόματες ψηφιακές μέθοδοι	61
4.1 Το λογισμικό Agisoft Metashape	64
4.2 Εφαρμογή αυτόματων μεθόδων σε ιστορικές εικόνες τεκμηρίωσης	67
4.2.1 Επεξεργασία ιστορικών εικόνων - Agisoft Metashape	68
4.2.2 Παραγωγή 3D μοντέλου επιφάνειας – Geomagic Wrap	114
4.2.3 Παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκού	131
4.2.4 Έλεγχος πιστότητας, πληρότητας και ακρίβειας τελικών προϊόντων ...	144

4.2.5 Ραδιομετρική επεξεργασία ορθοφωτομωσαϊκών στο λογισμικό Adobe Photoshop	160
5. Σύγκριση τελικών παραγώγων.....	164
5.1 Σύγκριση επιφανειών στο λογισμικό Geomagic Wrap	164
5.2 Σύγκριση νεφών σημείων στο λογισμικό Cloud Compare	179
5.3 Σύγκριση ορθοφωτομωσαϊκών	189
6 Συμπεράσματα	202
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	204

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - 1 : Μνημείο Σουλιωτισσών στο Ζάλογγο.....	14
Εικόνα 2 - 1: Γεωγραφική θέση Μνημείου Ζαλόγγου	16
Εικόνα 2 - 2: Μονοπάτι προς μνημείο Ζαλόγγου	17
Εικόνα 2 - 3: Θέση μνημείου Ζαλόγγου σε σχέση με άλλα αξιοθέατα	18
Εικόνα 2 - 4: Μνημείο Ζαλόγγου	19
Εικόνα 2 - 5: Θέση Σουλίου σε σχέση με το μνημείο του Ζαλόγγου	20
Εικόνα 2 - 6: Φθορές μνημείου Ζαλόγγου.....	24
Εικόνα 2 - 7: Βλάβες στη δυτική όψη του μνημείου Ζαλόγγου.....	25
Εικόνα 2 - 8: Βλάβες στην ανατολική όψη του μνημείου Ζαλόγγου	25
Εικόνα 2 - 9: Αποκατάσταση_δυτική όψη μνημείου	26
Εικόνα 2 - 10: Αποκατάσταση_ανατολική όψη μνημείου	27
Εικόνα 3 - 1: Γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων	30
Εικόνα 3 - 2: Τρόπος λήψης εικόνας στη φωτογραμμετρική αναγωγή.....	32
Εικόνα 3 - 3: Δημιουργία ορθοφωτογραφίας με τη μονοεικονική φωτογραμμετρία	33
Εικόνα 3 - 4: Λήψη στερεοζεύγους	34
Εικόνα 3 - 5: Παραγωγή 2D όψης με τη χρήση ενός στερεοζεύγους	35
Εικόνα 3 - 6: Κάτοψη ευρύτερης περιοχής	37
Εικόνα 3 - 7 : Όψη γεφυριού.....	37
Εικόνα 3 - 8: Απόσπασμα από το ψηφιακό video.....	38
Εικόνα 3 - 9: Ορθοφωτογραφία και τρισδιάστατο μοντέλο βυζαντινής εκκλησίας	39
Εικόνα 3 - 10: Ενδεικτικές στάσεις σάρωσης κτιρίου με επίγειο τρισδιάστατο σαρωτή.....	40
Εικόνα 3 - 11: Ερμής του Πραξιτέλη. Τρισδιάστατη απόδοση	42

Εικόνα 3 - 12: Τομή 3D μοντέλου και 3D μετρήσεις	42
Εικόνα 3 - 13: Πλάγιες λήψεις.....	44
Εικόνα 3 - 14: Διαγράμματα λήψεων κατά την 1 ^η φάση συλλογής δεδομένων....	45
Εικόνα 3 - 15: Διάγραμμα λήψεων κατά την 2 ^η φάση συλλογής δεδομένων.....	45
Εικόνα 3 - 16: Λήψεις εικόνων νότιας όψης για φωτογραμμετρική αναγωγή	47
Εικόνα 3 - 17: Λήψεις εικόνων βάρου δυτικής όψης για φωτογραμμετρική αναγωγή	47
Εικόνα 3 - 18: Λήψεις εικόνων ανατολικής όψης για στερεοσκοπική φωτογραμμετρία	48
Εικόνα 3 - 19: Λήψεις εικόνων δυτικής όψης για στερεοσκοπική φωτογραμμετρία	49
Εικόνα 3 - 20: Τοποθέτηση απαραίτητων φωτοσταθερών για τη μέθοδο της αναγωγής.....	50
Εικόνα 3 - 21: Ειδική επιφάνεια για βαθμονόμηση.....	51
Εικόνα 3 - 22: Μέτρηση τρισδιάστατων συντεταγμένων από πολλές εικόνες	52
Εικόνα 3 - 23: Πλευρά τρίτης μορφής για τη μέθοδο της αναγωγής στο Image Master	53
Εικόνα 3 - 24 : Γενικό τοπογραφικό διάγραμμα	56
Εικόνα 3 - 25: Επίπεδα προβολής μνημείου.....	56
Εικόνα 3 - 26 : Συνολικό διάγραμμα ορθοφωτομωσαϊκών	57
Εικόνα 3 - 27:Τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας	57
Εικόνα 3 - 28: Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας για το μνημείο μετά από τις εργασίες ηλεκτρονικής αποκατάστασης	58
Εικόνα 3 - 29: Τελικό μοντέλο πριν τις εργασίες αποκατάστασης.....	59
Εικόνα 3 - 30: Τελικό μοντέλο μετά τις εργασίες αποκατάστασης	59
Εικόνα 4 - 1: Παράδειγμα φωτογράφισης αντικειμένου.....	62
Εικόνα 4 - 2: Σωστοί τρόποι λήψης εικόνων.....	65
Εικόνα 4 -3: Στάδιο επεξεργασίας ιστορικών εικόνων και παραγωγής τελικών παραγώγων	67
Εικόνα 4 - 4: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	68
Εικόνα 4 - 5: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	69
Εικόνα 4 - 6: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	70
Εικόνα 4 - 7: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	71
Εικόνα 4 - 8: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	72
Εικόνα 4 - 9: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου.....	73
Εικόνα 4 - 10: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου	74
Εικόνα 4 - 11: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου	75

Εικόνα 4 - 12: Αρχικό alignment του chunk 1	77
Εικόνα 4 - 13: Προβλήματα του alignment στο chunk 1	78
Εικόνα 4 - 14: Προβλήματα του alignment στο chunk 1	79
Εικόνα 4 - 15: Προβλήματα του alignment στο chunk 1	80
Εικόνα 4 - 16: Σκόπευση σημείων στο chunk 1	81
Εικόνα 4 - 17: Τελικό αραιό νέφος του chunk 1	82
Εικόνα 4 - 18: Εικόνες που απέτυχε το alignment – chunk 1	83
Εικόνα 4 - 19: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 2.....	84
Εικόνα 4 - 20: Σκόπευση σημείων στο chunk 2.....	85
Εικόνα 4 - 21: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 3.....	86
Εικόνα 4 - 22: Σκόπευση σημείων στο chunk 3.....	87
Εικόνα 4 - 23: Εικόνες που δεν έγιναν align – chunk 3.....	88
Εικόνα 4 - 24: Εικόνες που δεν έγιναν align – chunk 3.....	89
Εικόνα 4 - 25: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 4.....	90
Εικόνα 4 - 26: Σκόπευση σημείων chunk 4.....	91
Εικόνα 4 - 27: Αρχικό alignment του chunk 5	92
Εικόνα 4 - 28: Σκόπευση σημείων στις εικόνες chunk 5	93
Εικόνα 4 - 29: Σκόπευση σημείων chunk 5.....	94
Εικόνα 4 - 30: Αποτέλεσμα align chunk 5	95
Εικόνα 4 - 31: Αποτέλεσμα align chunk 5	96
Εικόνα 4 - 32: Σκόπευση σημείων chunk 5.....	96
Εικόνα 4 - 33: Αδυναμία alignment - chunk 5	97
Εικόνα 4 - 34: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 6.....	98
Εικόνα 4 - 35: Προβλήματα του alignment – chunk 6.....	99
Εικόνα 4 - 36: Εικόνες ανατολικής όψης της τρίτης μορφής – chunk 6.....	100
Εικόνα 4 - 37: Σκόπευση σημείων – chunk 6.....	101
Εικόνα 4 - 38: Αποτέλεσμα alignment chunk 7	102
Εικόνα 4 - 39: Σκόπευση χαρακτηριστικών σημείων – chunk 7	102
Εικόνα 4 - 40: Ολικό align με ακρίβεια high	103
Εικόνα 4 - 41: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια high.....	104
Εικόνα 4 - 42: Ολικό align με ακρίβεια medium	105
Εικόνα 4 - 43: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια medium.....	105
Εικόνα 4 - 44: Ολικό align με ακρίβεια low.....	106
Εικόνα 4 - 45: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια low	106
Εικόνα 4 - 46: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια low	107
Εικόνα 4 - 47: Θόρυβος στο πυκνό νέφος σημείων	110
Εικόνα 4 -48: Θόρυβος στο πυκνό νέφος σημείων	110

Εικόνα 4 - 49: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 1	111
Εικόνα 4 - 50: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 2	111
Εικόνα 4 - 51: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 3	112
Εικόνα 4 - 52: Πυκνό νέφος σημείων – chunk 4 Εικόνα 4 - 53: Πυκνό νέφος σημείων– chunk 7	112
Εικόνα 4 - 54: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 5	112
Εικόνα 4 - 55: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 6	113
Εικόνα 4 - 56: Πρόβλημα στη συνένωση επιφανειών	116
Εικόνα 4 - 57: 3D επιφάνειες δυτικής και ανατολικής όψης, πριν την επεξεργασία τους	117
Εικόνα 4 - 58: 3D επιφάνεια νότιας όψης, πριν την επεξεργασία της.....	118
Εικόνα 4 - 59: Λάθος τρίγωνα – δημιουργία τρυπών	118
Εικόνα 4 - 60: Τρύπες στην επιφάνεια	119
Εικόνα 4 - 61: Τελικό 3D μοντέλο επιφάνειας δυτικής όψης	121
Εικόνα 4 - 62: Τελικό 3D μοντέλο επιφάνειας ανατολικής όψης	121
Εικόνα 4 - 63: Τρύπες στην τελική 3D επιφάνεια	122
Εικόνα 4 - 64: Τραχιές επιφάνειες σε τμήματα του μνημείου.....	123
Εικόνα 4 - 65: Διαφορά τραχύτητας μεταξύ των κεφαλών και των κορμών των μορφών	124
Εικόνα 4 - 66: Πρόβλημα στην επιφάνεια του κεφαλιού της πρώτης μορφής	124
Εικόνα 4 - 67: Εικόνες κεφαλιού πρώτης μορφής.....	125
Εικόνα 4 - 68: Εντολή ομαλοποίησης στο πρόγραμμα Geomagic Wrap	126
Εικόνα 4 - 69: Παράδειγμα εξομάλυνσης τραχύτητας	126
Εικόνα 4 - 70: Πρόβλημα επιφάνειας σε τμήμα της τέταρτης μορφής.....	127
Εικόνα 4 - 71: Εικόνες της τέταρτης μορφής του μνημείου.....	127
Εικόνα 4 - 72: Πρόβλημα στην επιφάνεια της δυτικής όψης.....	128
Εικόνα 4 - 73: Παραδείγματα λήψης εικόνων της δυτικής όψης της τέταρτη μορφής.....	128
Εικόνα 4 - 74: Αποτύπωση λεπτομερειών στην τελική επιφάνεια	129
Εικόνα 4 - 75: Αποτύπωση λεπτομερειών στην τελική επιφάνεια	130
Εικόνα 4 -76: Διαφορές μεταξύ κεντρικής και ορθής προβολής	131
Εικόνα 4 -77: Διάγραμμα ψηφιακής ορθοαναγωγής.....	133
Εικόνα 4 - 78: Ίχνη επιπέδων προβολής όψεων.....	135

Εικόνα 4 - 79: Ορθοεικόνες επιπέδου A-A'	136
Εικόνα 4 - 80: Ορθοεικόνες επιπέδου A'-A''	137
Εικόνα 4 - 81: Ορθοφωτογραφίες επιπέδου B'-B	138
Εικόνα 4 - 82: Ορθοφωτογραφίες επιπέδου B''-B'	139
Εικόνα 4 - 83: Γωνίες στροφής στο λογισμικό Autocad	140
Εικόνα 4 - 84: Σχέση γωνίας στροφής με πίνακα στροφής	140
Εικόνα 4 - 85: Επίπεδα προβολής-κάτοψη μνημείου	141
Εικόνα 4 - 86: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου A-A'	145
Εικόνα 4 - 87: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου A-A'	146
Εικόνα 4 - 88: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A'	147
Εικόνα 4 - 89: Φωτοσταθερά στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A' ...	148
Εικόνα 4 - 90: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A'	148
Εικόνα 4 - 91: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου A'-A''	150
Εικόνα 4 - 92: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου A'-A''	150
Εικόνα 4 - 93: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A'-A''	151
Εικόνα 4 - 94: Σφάλμα σε φωτοσταθερό στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A'-A''	151
Εικόνα 4 - 95: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου B''-B'	152
Εικόνα 4 - 96: Ελλείψεις στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου B''-B'	152
Εικόνα 4 - 97: Προβλήματα σκaiών στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου B''-B'	153
Εικόνα 4 - 98: Προβλήματα πιστότητας στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου B''-B'	153
Εικόνα 4 - 99: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B''-B'	154
Εικόνα 4 - 100: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου B'-B	155
Εικόνα 4 - 101: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου B'-B	156
Εικόνα 4 - 102: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B	157
Εικόνα 4 - 103: Φωτοσταθερά στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B .	157
Εικόνα 4 - 104: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B	158
Εικόνα 4 - 105: Πρόβλημα σε φωτοσταθερό στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B	159
Εικόνα 4 - 106: Πρόβλημα σε φωτοσταθερό στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B	159
Εικόνα 4 - 107: Ορθοφωτομωσαϊκό A-A' πριν την ραδιομετρική επεξεργασία ...	160
Εικόνα 4 - 108: Ραδιομετρικές διαφορές στην συνολική ορθοφωτογραφία	161
Εικόνα 4 - 109: Ραδιομετρικά προβλήματα στην ορθοφωτογραφία της δεύτερης μορφής	162
Εικόνα 4 - 110: Ορθοφωτομωσαϊκό έπειτα από τη ραδιομετρική εξομάλυνση ...	163

Εικόνα 5 - 1: Σύγκριση επιφανειών στο λογισμικό Geomagic	165
Εικόνα 5 - 2: Στατιστικά σύγκρισης επιφανειών στο λογισμικό Geomagic	165
Εικόνα 5 - 3: Αποκλίσεις κατά την διαδικασία σύγκρισης επιφανειών	166
Εικόνα 5 - 4: Επιλογή κλίμακας διαβάθμισης για τη σύγκριση	167
Εικόνα 5 - 5: Σύγκριση επιφανειών με αποκλίσεις 0.01-0.1 m	167
Εικόνα 5 - 6: Αποκλίσεις επιφανειών στην περιοχή των κεφαλιών	168
Εικόνα 5 - 7: Αποκλίσεις επιφανειών στο κάτω μέρος των χεριών.....	168
Εικόνα 5 - 8: Αποκλίσεις επιφανειών στην τέταρτη μορφή.....	169
Εικόνα 5 - 9: Επιλογή κλίμακας διαβάθμισης για τη σύγκριση	169
Εικόνα 5 - 10: Σύγκριση επιφανειών με αποκλίσεις 5mm-2cm	170
Εικόνα 5 - 11: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιών των δυο πρώτων μορφών.....	171
Εικόνα 5 - 12: Σύγκριση τομών των κεφαλιών των δυο πρώτων μορφών	172
Εικόνα 5 - 13: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιού τρίτης μορφής.....	173
Εικόνα 5 - 14: Σύγκριση τομών κεφαλιού τρίτης μορφής	173
Εικόνα 5 - 15: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιού τέταρτης μορφής	174
Εικόνα 5 - 16: Σύγκριση τομών κεφαλιού τέταρτης μορφής	174
Εικόνα 5 - 17: Ίχνος επιπέδου τομής των κορμών των τεσσάρων μορφών	175
Εικόνα 5 - 18: Σύγκριση τομών των κορμών των τεσσάρων μορφών	175
Εικόνα 5 - 19: Υψηλή ταύτιση των τομών των κορμών	176
Εικόνα 5 - 20: Παρουσίαση αποκλίσεων μεταξύ των τομών των κορμών	177
Εικόνα 5 - 21: Παρουσίαση αποκλίσεων μεταξύ των τομών του κορμού της 4ης μορφής.....	178
Εικόνα 5 - 22: Λογική του αλγορίθμου M3C2	179
Εικόνα 5 - 23: Λογική του αλγορίθμου M3C2	180
Εικόνα 5 - 24: Ιστόγραμμα μέσης απόστασης των νεφών σημείων _ M3C2.....	181
Εικόνα 5 - 25: Ιστόγραμμα απόστασης των νεφών σημείων-M3C2	181
Εικόνα 5 - 26: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 5-10 cm – M3C2.....	182
Εικόνα 5 - 27: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2	183
Εικόνα 5 - 28: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 1-5cm – M3C2	184
Εικόνα 5 - 29: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2	185
Εικόνα 5 - 30: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2	186
Εικόνα 5 - 31: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 0.5-2cm – M3C2.....	187
Εικόνα 5 - 32: Μεγάλες αποχές στην τέταρτη μορφή της ανατολικής όψης.....	192

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4 - 1: Επίπεδα προβολής για κάθε όψη	134
Πίνακας 4 - 2: Μετασχηματισμοί στροφής και μετατόπισης	142
Πίνακας 5 - 1: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην πρώτη και δεύτερη μορφή	172
Πίνακας 5 - 2: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην τρίτη μορφή	173
Πίνακας 5 - 3: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην τρίτη μορφή	174
Πίνακας 5 - 4: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις σε όλες τις μορφές.....	177
Πίνακας 5 - 5: Μέγιστη και ελάχιστη απόκλιση στην τέταρτη μορφή	178
Πίνακας 5 - 6: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο A-A'.....	189
Πίνακας 5 - 7: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο A'-A''	191
Πίνακας 5 - 8: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο B''-B'	193
Πίνακας 5 - 9: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο B'-B.....	195

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης παλαιότερων ιστορικών εικόνων φωτογραμμετρικής τεκμηρίωσης με σύγχρονες, αυτόματες ψηφιακές μεθόδους. Η πρόκληση σε αυτήν την περίπτωση είναι η αντιμετώπιση των προβλημάτων που ενδεχομένως θα προκύψουν από τον διαφορετικό τρόπο λήψης των εικόνων για την παλαιότερη διαδικασία. Το συγκεκριμένο εγχείρημα βασίστηκε σε εικόνες που είχαν ληφθεί τα έτη 2008-09, για την αποτύπωση και τρισδιάστατη μοντελοποίηση με στόχο την αποκατάσταση των φθορών του μνημείου των Σουλιωτισσών στο Ζάλογγο. Στο πλαίσιο ενός ερευνητικού έργου είχε ζητηθεί από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας να παραγάγει ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο του μνημείου, ώστε αυτό να χρησιμεύσει ως βάση για την αποκατάσταση των φθορών στο μνημείο. Επιπροσθέτως, αποφασίστηκε να παραχθούν και ορθοφωτογραφίες των βασικών όψεων σε κλίμακα 1:50. Οι εικόνες αυτές είχαν υποστεί επεξεργασία και τα τελικά προϊόντα παρήχθησαν, χρησιμοποιώντας τις κλασσικές φωτογραμμετρικές μεθόδους, δηλαδή μεθόδους μονοσκοπικής και στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας. Καθώς, όμως, η Φωτογραμμετρία εξελίσσεται και αυξάνουν οι ικανότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, δημιουργούνται νέες δυνατότητες επεξεργασίας ψηφιακών δεδομένων, ειδικότερα για το πεδίο της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων. Μια νέα δυνατότητα, είναι οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες φωτογραμμετρίας και κυρίως οι μέθοδοι «Structure From Motion – SfM»/ «Multi View Stereo – MVS». Παρακάτω θα μελετηθεί εάν είναι δυνατό οι παραπάνω τεχνικές να παραγάγουν αποτελέσματα με ακρίβεια, πιστότητα, πληρότητα, αξιοποιώντας ιστορικές εικόνες γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to investigate the possibility to fully exploit historical images using the automation of the photogrammetric processing. This paper describes the use of modern digital photogrammetric methods to extract high-resolution digital elevation model (DEM) and orthophotos using historical images of the monument of Zalongo. In 2008-09, the Laboratory of Photogrammetry of the National Technical University of Athens produced an accurate 3D model and a set of orthoimages (1:50) to be used for restoration purposes. For this geometric documentation, classical photogrammetric methods were used, such as rectification and stereo compilation.

However, the recent and continuously increasing development of computer vision leads to new capabilities of data processing. In this project, a commercial software applying the techniques "Structure From Motion" and "Multi View Stereo" was used to produce the 3D model and the orthoimages using these historical images. In this paper the data processing is described. Finally, the products are evaluated for their accuracy and effectiveness.

1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας και ορθοφωτογραφιών, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα ιστορικές εικόνες παλαιότερης γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

Στην προκειμένη περίπτωση αξιοποιήθηκαν εικόνες του μνημείου των Σουλιωτισσών στο Ζάλογγο, οι οποίες είχαν ληφθεί κατά τα έτη 2008-09.



Εικόνα 1 - 1 : Μνημείο Σουλιωτισσών στο Ζάλογγο

Πηγή : (prevezabest)

Αναφορικά με τη δομή και διάρθρωση της διπλωματικής :

Αρχικά μελετώνται, εις βάθος, και παρουσιάζονται οι κλασσικές φωτογραμμετρικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν, για την επεξεργασία των εικόνων και τη δημιουργία παραγώγων γεωμετρικής τεκμηρίωσης.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η λογική της μεθόδου της φωτογραμμετρικής αναγωγής, καθώς και της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας, με παράλληλες αναφορές σε αντίστοιχα παραδείγματα εφαρμογών τους. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στη συμβολή των επίγειων σαρωτών σε διαδικασίες γεωμετρικής τεκμηρίωσης. Έπειτα, παρατίθεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ για την πλήρη αποκατάσταση του μνημείου των Σουλιωτισσών.

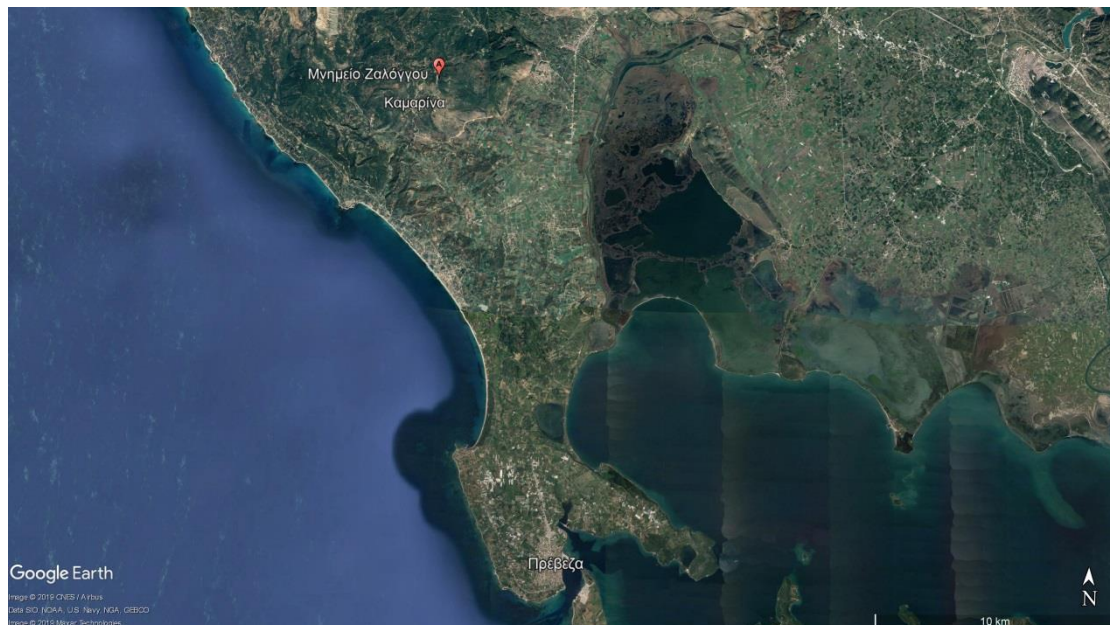
Ακολουθεί η ανάλυση της λογικής των αυτοματοποιημένων ψηφιακών μεθόδων, ενώ ύστερα παρουσιάζεται αναλυτικά όλη η διαδικασία επεξεργασίας και παραγωγής των τελικών προϊόντων (3D μοντέλου και ορθοφωτογραφιών των βασικών όψεων) με τις τεχνικές SfM – MVS.

Τέλος, πραγματοποιούνται συγκρίσεις των νέων παραγώγων με τα παλαιά παράγωγα και συμπεραίνεται το κατά πόσο είναι εφικτό οι σύγχρονες αυτόματες μέθοδοι να επιφέρουν αξιόπιστα τελικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας παλιές ιστορικές εικόνες, οι οποίες δεν είναι προσαρμοσμένες στις ανάγκες και απαιτήσεις της σύγχρονης αυτοματοποιημένης ψηφιακής πραγματικότητας.

2 Ιστορικά στοιχεία

2.1 Κατασκευή και θέση μνημείου

Το μνημείο των Σουλιωτισσών του Ζαλόγγου είναι ένα μεγαλειώδες μνημείο, το οποίο αποτελεί έργο του γλύπτη Γιώργου Ζογγολόπουλου και του αρχιτέκτονα Πάτροκλου Καραντινού, ο οποίος εργάστηκε υπό τις οδηγίες του γλύπτη, και κατασκευάστηκε κατά τα έτη 1957-1960. Το μνημειακό αυτό σύμπλεγμα βρίσκεται στην κορυφή ενός γκρεμού, στο όρος Ζάλογγο, σε υψόμετρο 700 μέτρων. Ο πλησιέστερος οικισμός είναι η Καμαρίνα (2,7 χλμ), ενώ απέχει 29 χλμ από την πόλη της Πρέβεζας. (Wikipedia)



Εικόνα 2 - 1: Γεωγραφική θέση Μνημείου Ζαλόγγου

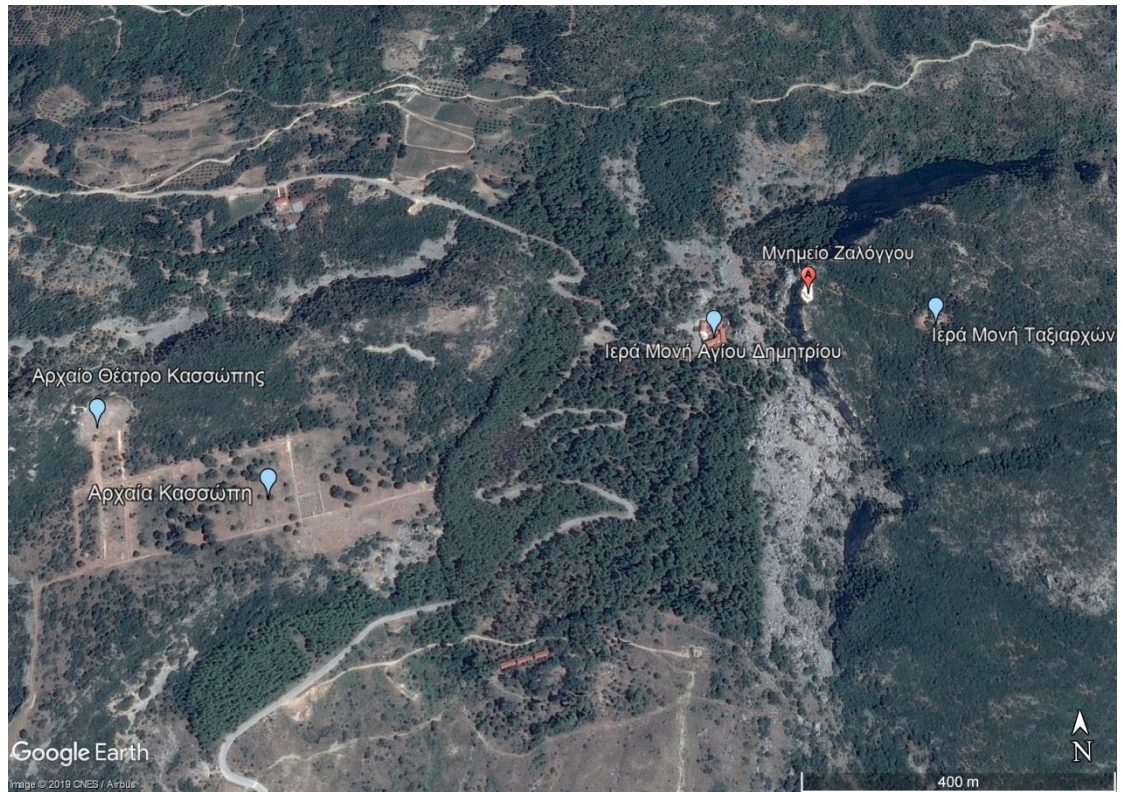
Πηγή: Google Earth

Η προσπέλαση στο μνημείο γίνεται από λιθόστρωτο μονοπάτι 410 σκαλοπατιών που ξεκινά από το Μοναστήρι του Αγίου Δημητρίου. Επιπρόσθετα, κοντά στο μνημείο βρίσκεται η Μονή του Ταξιάρχη Μιχαήλ, που θεωρείται το αρχαιότερο μοναστήρι της Ηπείρου, δεδομένου ότι ιδρύθηκε γύρω στα 400 μ.Χ. και τα ερείπια της αρχαίας Κασσώπης, σημαντικής πόλης του 3^{ου} π.Χ. αιώνα με αρχαίο θέατρο. (Μωρέτης)



Εικόνα 2 - 2: Μονοπάτι προς μνημείο Ζαλόγγου

Πηγή: <https://mapio.net>

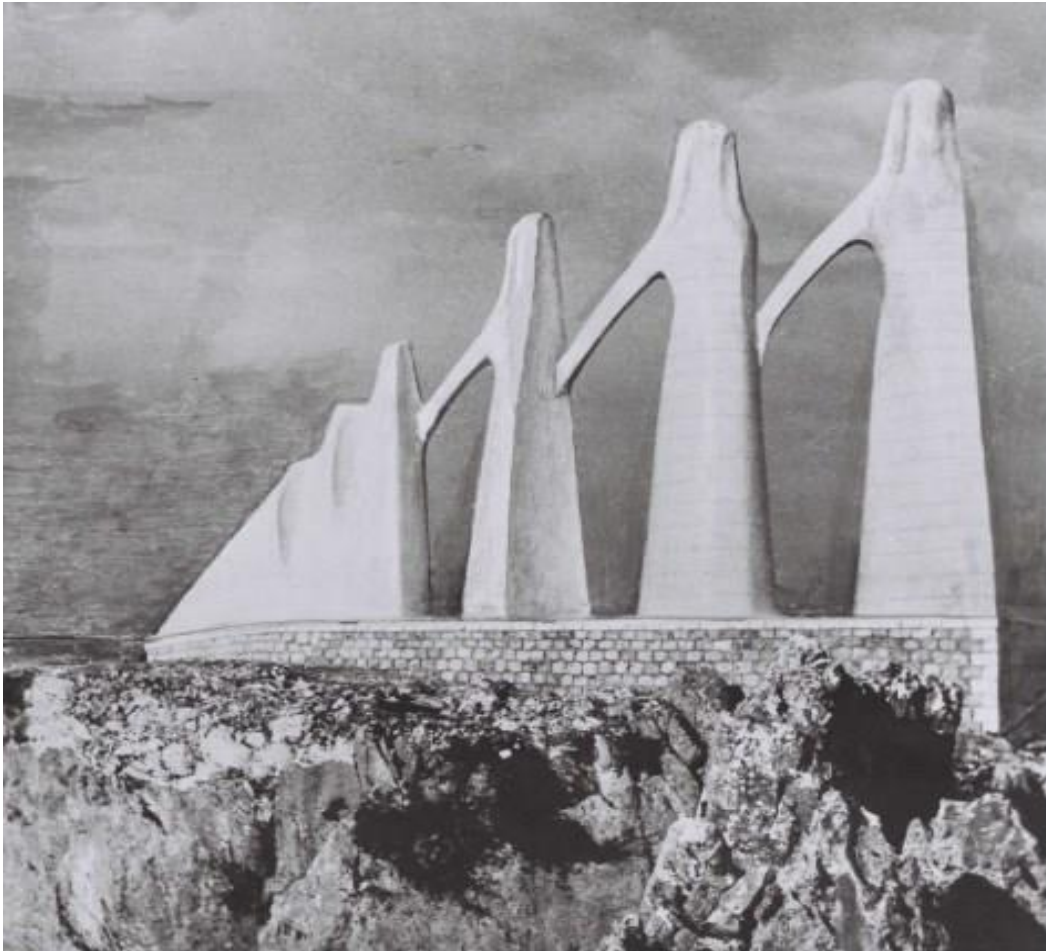


Εικόνα 2 - 3: Θέση μνημείου Ζαλόγγου σε σχέση με άλλα αξιοθέατα

Πηγή: Google Earth

2.2 Μορφή μνημείου

Το γλυπτό του Μνημείου των Σουλιωτισσών στο Ζάλογγο εδράζεται σε λιθόχτιστη βάση πάνω στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι 4 αφαιρετικές μορφές των Σουλιωτισσών, με μήκος 18 μέτρα και ύψος 13 μέτρα και είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα επενδυμένο με περίπου 4.300 ασβεστολιθικούς όγκους, διαστάσεων 50x30 εκ., υπόλευκου χρώματος. (Μωρέτης)

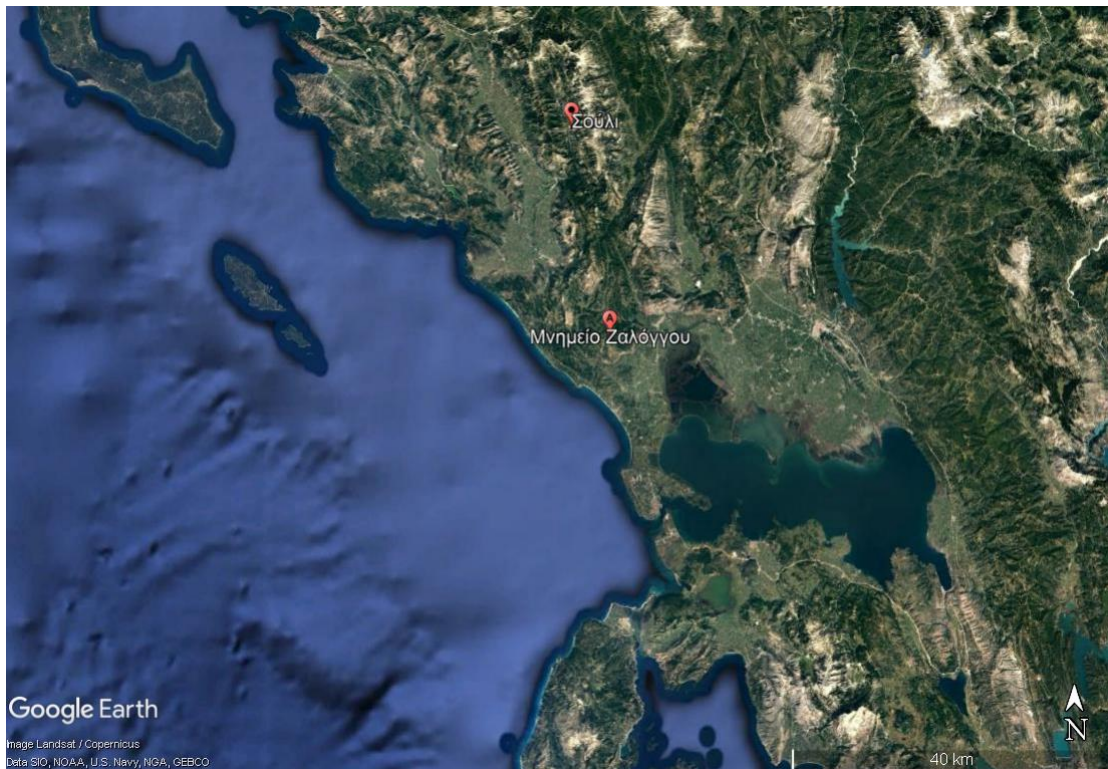


Εικόνα 2 - 4: Μνημείο Ζαλόγγου

Πηγή: <https://zsgiannina.gr/το-μνημείο-Ζάλογγο>

2.3 Η θυσία του Ζαλόγγου

Οι Σουλιώτες ήταν μια κοινότητα δίγλωσσων, αλβανόφωνων και ελληνόφωνων ορθόδοξων χριστιανών, που κατοικούσαν στην περιοχή του Σουλίου στην Ήπειρο. Καθιέρωσαν μια αυτόνομη συνομοσπονδία με μεγάλο αριθμό γειτονικών χωριών σε απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές της Ηπείρου. Η Σουλιώτικη Συμπολιτεία ήταν μια οργανωμένη κοινωνία πολεμιστών, ένα ελεύθερο κράτος μέσα στην Οθωμανική Αυτοκρατορία που περιλάμβανε εκτεταμένα τμήματα των σημερινών νομών Ιωαννίνων, Πρεβέζης και Θεσπρωτίας. Από την ίδρυσή της (1550) μέχρι την εγκατάλειψη του Σουλίου (1803) η Σουλιώτικη Συμπολιτεία ήταν πάντα αυτόνομη, ανεξάρτητη και ελεύθερη. (Wikipedia, 2011), (paramythia, 2016)



Εικόνα 2 - 5: Θέση Σουλίου σε σχέση με το μνημείο του Ζαλόγγου

Πηγή: Google Earth

Οι Οθωμανοί Τούρκοι προσπάθησαν επί πολλά χρόνια να κατακτήσουν τα εδάφη της συνομοσπονδίας των Σουλιωτών για να εξουδετερώσουν τους ανυπότακτους Σουλιώτες. Ο Αλή Πασάς των Ιωαννίνων ήταν αυτός που τελικά τους υπέταξε. Στα τέλη του 1803, ο Αλή Πασάς θέλησε να εξοντώσει τους Σουλιώτες, οι οποίοι δημιουργούσαν τόσα προβλήματα στο Σουλτάνο και στη δική του εξουσία στην Ήπειρο. Τους πολιορκήσε στενά και τους εξανάγκασε να συνθηκολογήσουν στις 12 Δεκεμβρίου 1803.

Μετά τη συνθήκη που είχε συνάψει ο Αλή Πασάς με τους Σουλιώτες στις 12 Δεκεμβρίου του 1803, οι κάτοικοι του Σουλίου έπρεπε να εγκαταλείψουν την πατρίδα τους. Έτσι φεύγοντας αυτοί χωρίστηκαν σε δύο ομάδες από τις οποίες η μιν μία με τις φάρες των Δαγκλή, Δράκου, Ζορμπά, Τζαβέλλα, Πανομάρα κ.ά. κατευθύνθηκε προς την Πάργα, ενώ η άλλη με τις φάρες των Κουτσονίκα, Μαλάμου, Μπότσαρη κ.ά. προς το Ζάλογγο. Τότε ο Αλή Πασάς αθετώντας το λόγο του και τη συνθήκη διέταξε την καταδίωξη και την εξόντωση των Σουλιωτών. Από τις δύο ομάδες, η δεύτερη δεν κατόρθωσε να διαφύγει τον όλεθρο. Οι αποτελούντες την δεύτερη ομάδα είχαν φθάσει στο Ζάλογγο, που απείχε από το Σούλι περί τις οκτώ ώρες. Στη συνέχεια για περισσότερη ασφάλεια ανέβηκαν στη κορυφή όπου βρίσκεται και η ομώνυμη Μονή του Ζαλόγγου.

Στις 16 Δεκεμβρίου όταν έφθασε στους πρόποδες του Ζαλόγγου το πολυάριθμο ασκέρι του Αλή Πασά υπό τον Αλβανό διοικητή Μπεκήρ Τζιγαδώρο, οι Σουλιώτες μαζί με τις γυναίκες και τα παιδιά τους οχυρώθηκαν μέσα στη Μονή απ' όπου και απέκρουσαν στις 16 και 17 του μήνα τις εφόδους του ασκεριού. Την επομένη όμως στις 18 Δεκεμβρίου ο μιν Κουτσονίκας και οι σύντροφοί του παραδόθηκαν, ενώ 53 γυναίκες με τα παιδιά τους και 13 άνδρες κατέφυγαν σε παρακείμενο βράχο, καλούμενος σήμερα "Στεφάνι". Αντίθετα άλλοι, περίπου 147, υπό τον Κίτσο Μπότσαρη κατάφεραν με έφοδο να διασωθούν. Οι δε Αλβανοί όταν έφθασαν στη Μονή και την κατέλαβαν αιχμαλώτισαν και όλους όσοι βρίσκονταν εκεί. Τότε γυναίκες που είχαν καταφύγει στο βράχο προτίμησαν αντί της ατιμίας και της αιχμαλωσίας να ρίξουν τα τέκνα τους στο γκρεμό και στη συνέχεια να ακολουθήσουν και οι ίδιες. (Μάστορα, 2010), (Wikipedia)

Απ' το ότι αναμφισβήτητα ένας μύθος μπορεί να δημιουργήσει ένα ιστορικό γεγονός δεν θα μπορούσε να εξαιρεθεί και ο Χορός του Ζαλόγγου.

Το 1908 ο συγγραφέας Σ. Περεισιάδης παρουσίασε για πρώτη φορά το θεατρικό έργο «ο Χορός του Ζαλόγγου» που διαδόθηκε ευρύτατα στον ελλαδικό χώρο μέσα από παραστάσεις των «μπουλουκαιών» και ίσως εκεί να οφείλεται η διάπλαση του «Χορού του Ζαλόγγου» ως ιστορικού γεγονότος. (sansimera)

Ο Π.Ζερλέντης μιλάει για «λαμπρήν εικόνα, ην δημιούργησε η ευφάνταστος διάνοια του Περραιβού» (Πολυδώρου, 2014).

Η πληροφορία για το τραγούδι των γυναικών δεν είναι επιβεβαιωμένη. Υπάρχουν απόψεις που λένε ότι γράφτηκε μετά το περιστατικό. Πρόσφατα, η ιστορικός Μ.Ρεπούση, αμφισβήτησε το ιστορικό γεγονός χαρακτηρίζοντάς το «εθνικό μύθο» (Μηχανή του Χρόνου).

Είναι φυσικό, λοιπόν, ένα ιστορικό γεγονός, προκειμένου να διατηρηθεί και να μείνει ζωντανό στη μνήμη ενός έθνους, να «αναγκάζεται» να καταφύγει σε μυθοπλασίες και επινοήσεις.

2.4 Ιστορία ανέγερσης του μνημείου του Ζαλόγγου

Η ιδέα για το μνημείο αυτό διατυπώθηκε αρχικά το 1950 σε μια εκπαιδευτική συγκέντρωση των διδασκάλων του νομού Πρέβεζας (στις 10 Ιουνίου 1950) και στάθηκε η αφορμή για να γεννηθεί η ιδέα για την ανέγερση του περιώνυμου αυτού μνημείου, όταν ο τότε διευθυντής του Δημοτικού Σχολείου Καμαρίνας, Γεώργιος Σακκάς, πρότεινε τη δημιουργία του. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, την 1η Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους, ο τότε Νομάρχης Πρέβεζας έκανε έκκληση, μέσω των δημάρχων και κοινοταρχών, για έρανο, το παράδειγμα του οποίου ακολούθησε αργότερα και ο επιθεωρητής δημοτικών σχολείων της Πρέβεζας, απευθυνόμενος προς όλα τα σχολεία της περιφέρειας. Στις 29 Οκτωβρίου 1950 και, ενώ ο έρανος συνεχιζόταν σε πανελλήνια κλίμακα, πραγματοποιήθηκε η συμβολική θεμελίωση του μνημείου. Την 1η Μαΐου 1953, και ενώ έχει συγκεντρωθεί κάποιο χρηματικό ποσό, το Υπουργείο Παιδείας προκήρυξε πανελλήνιο διαγωνισμό μεταξύ γλυπτών και αρχιτεκτόνων, για το Μνημείο, και τελικά βραβεύτηκε η μελέτη του Πάτροκλου Καραντινού και του Γεωργίου Ζογγολόπουλου, η οποία προέβλεπε μια κατασκευή από λιθοδομή στηριζόμενη σε σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα.

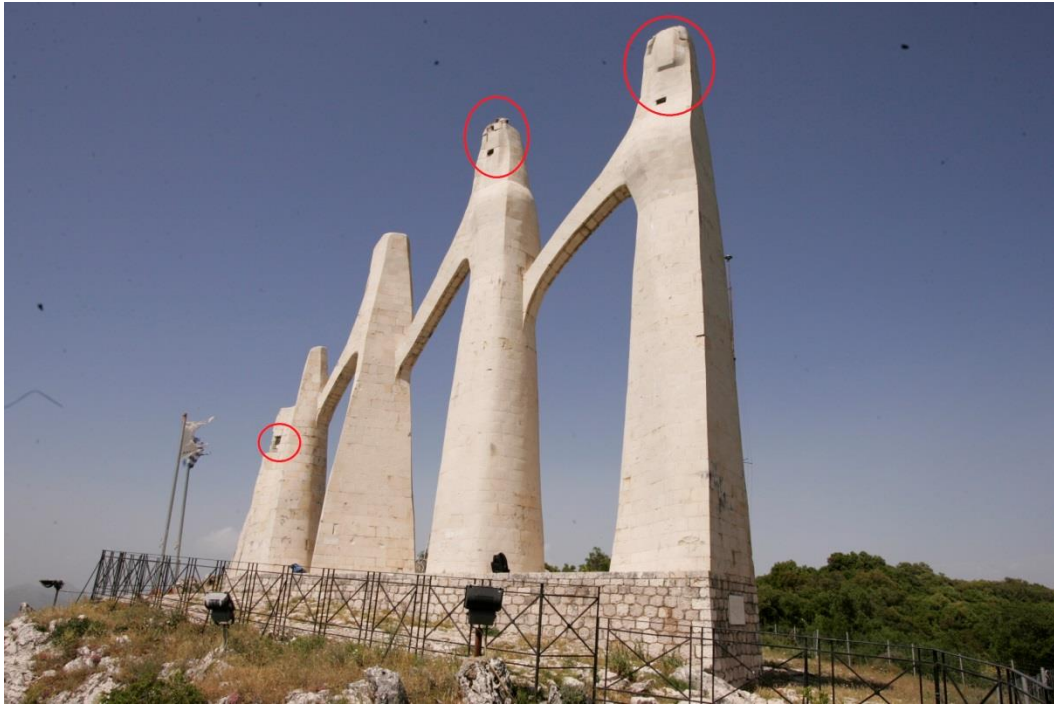
Επίσημα οι εργασίες κατασκευής του έργου ξεκίνησαν τον Ιούλιο του 1954 αλλά, εξαιτίας της ακαταλληλότητας των λίθων, διακόπηκαν για τη διενέργεια έρευνας νέου πετρώματος. Σύντομα επιλέχθηκε το νέο πέτρωμα (υπόλευκος λίθος χωρίς νερά και κομμούς) και άρχισε η μεταφορά του από τοποθεσία 16 χλμ. βόρεια των Ιωαννίνων. Τα υπόλοιπα υλικά (άμμος, χαλίκαι, τσιμέντο, νερό, ξυλεία) μεταφέρθηκαν στην κορυφή του βράχου αρχικά με τα χέρια και μουλάρια της Καμαρίνας αλλά αργότερα κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτό εναέριος μηχανισμός μήκους 270 μέτρων. Το 1955 οι εργασίες διακόπηκαν ξανά, γι' αυτό και στις 30 Απριλίου ο Γενικός Διοικητής Ηπείρου απηύθυνε έκκληση προς τους δημάρχους, κοινοτάρχες και διευθυντές των σχολείων για νέο έρανο για την αποπεράτωση του μνημείου. Τον Μάρτιο του 1957 εγκρίθηκε η συνέχιση των εργασιών, με τη βοήθεια αυτή τη φορά και του στρατού, προκειμένου να προχωρήσουν τα σχέδια υλοποίησης του έργου (ΜΟΜΑ). Τη γενική εποπτεία ανέλαβαν ο Γεώργιος Ζογγολόπουλος και ο Πάτροκλος Καραντινός, ενώ την τεχνική εφαρμογή, ύστερα από πρόταση των μελετητών, ο μαρμαροτεχνίτης Ελευθέριος Γυφτόπουλος. Μαρμάρινη πλάκα στη βάση του μνημείου μνημονεύει τα ονόματα και των τριών αυτών συντελεστών: «Γεώργιος Ζογγολόπουλος γλύπτης, Πάτροκλος Καραντινός αρχιτέκτων, τεχνική επιμέλεια Ελευθέριος Γυφτόπουλος». Οι εργασίες ως την ολοκλήρωση διήρκεσαν αυτή τη φορά τέσσερα περίπου χρόνια (1957-1960). (Wikipedia), (Μωρέτης)

2.5 Βλάβες και αποκατάσταση μνημείου

Από το 1961 που πραγματοποιήθηκαν τα εγκαίνια του μνημείου, το έργο υπέστη σοβαρές φθορές, κυρίως εξαιτίας των κεραυνών, του παγετού, των όμβριων υδάτων και της οξειδωσης του χάλυβα στον φέροντα οργανισμό. Αρκετά τμήματα της λίθινης επένδυσης στον κορμό του αλλά και στις κεφαλές των μορφών έχουν αποκολληθεί, πολλοί λίθοι παρουσίασαν ρωγμές, ενώ οι βραχίονες των μορφών και άλλα μέρη του οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσίασαν οξειδωση. (Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, 2009)



Εικόνα 2 - 6: Φθορές μνημείου Ζαλόγγου



Εικόνα 2 - 7: Βλάβες στη δυτική όψη του μνημείου Ζαλόγγου



Εικόνα 2 - 8: Βλάβες στην ανατολική όψη του μνημείου Ζαλόγγου

Στο πλαίσιο της αποκατάστασης αυτής, την οποία ανέλαβε το Ίδρυμα Ζογγολόπουλου, ανατέθηκε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ερευνητικό έργο με τίτλο «Γεωμετρική Τεκμηρίωση και Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση για την Αποκατάσταση Γλυπτών. Εφαρμογή στο Μνημείο Σουλιωτισσών του Δήμου Ζαλόγγου» για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στο οποίο θα βασιζόταν η εικονική, αρχικά, και η πραγματική, αργότερα, αποκατάσταση του μνημείου.

Ειδικότερα, ζητήθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας να παραγάγει ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο το μνημείου, το οποίο θα χρησιμεύσει ως βάση για την αποκατάσταση των φθορών στο μνημείο. Ακόμη, αποφασίστηκε να γίνει παραγωγή ορθοεικόνων των βασικών όψεων σε κλίμακα 1:50 καθώς και ένα γενικό τοπογραφικό του ευρύτερου χώρου γύρω από το μνημείο σε κλίμακα 1:100. Οι εργασίες υπαίθρου έγιναν τον Μάιο του 2008 και τον Μάρτιο του 2009, ενώ οι εργασίες επεξεργασίας των δεδομένων ολοκληρώθηκαν τον Νοέμβριο του 2009. (Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, 2009)

Αναλυτικά, οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την αποκατάσταση των φθορών του μνημείου περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.3.3.



Εικόνα 2 - 9: Αποκατάσταση_δυτική όψη μνημείου

Πηγή: <https://www.tripadvisor.es>



Εικόνα 2 - 10: Αποκατάσταση_ανατολική όψη μνημείου

Πηγή: <https://www.tripadvisor.es>

3. Γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων πριν την τεχνική SfM-MVS

Η πολιτιστική κληρονομιά είναι η έννοια που περιλαμβάνει τα μνημεία, αλλά και κάθε είδους τεκμήριο πολιτισμού. Είναι φορέας ιστορικής μνήμης και κιβωτός εθνικού και παγκόσμιου πολιτισμού (Γεωργόπουλος, 2017). Η πολιτιστική κληρονομιά κινδυνεύει γιατί εύκολα καταστρέφεται, χάνεται αλλοιώνεται, ξεχνιέται, λόγω φυσικών κινδύνων, βίαιων ενεργειών, κλοπών και βανδαλισμών, οικοδομικής δραστηριότητας, παγκοσμιοποίησης, σύγχρονου τρόπου ζωής και αδιαφορίας, αύξηση του αστικού πληθυσμού έναντι του αγροτικού κ.α. Για αυτό το λόγο, είναι υποχρέωση όλων των γενεών προς τις επόμενες, η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και συνεπώς η διατήρηση της ιστορικής μνήμης. Ορισμένοι διεθνείς οργανισμοί για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι UNESCO και ICOMOS (Γεωργόπουλος, 2017). Υπάρχουν αρκετές διεθνείς συμβάσεις που αφορούν στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς (Χάρτα Αθηνών 1933, Σύμβαση της Γρανάδας 1985, Χάρτα της Βενετίας 1964). Στο σημείο αυτό, αξίζει να γίνει μια μικρή αναφορά στη Χάρτα της Βενετίας, 1964. Ο Χάρτης της Βενετίας (ή Χάρτα της Βενετίας) για τη συντήρηση και αποκατάσταση μνημείων και μνημειακών συνόλων καταρτίστηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτονικών και Τεχνικών των ιστορικών μνημείων που πραγματοποιήθηκε στη Βενετία το Μάη του 1964. Ο Χάρτης αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα διαχρονικό πλαίσιο κατευθυντήριων αρχών που διέπουν τη θεωρία και κυρίως την πράξη της αποκατάστασης και συντήρησης κάθε είδους μνημείων (Wikipedia).

“Η έννοια ενός ιστορικού μνημείου δεν καλύπτει μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο αλλά και την αστική ή την αγροτική τοποθεσία που μαρτυρεί έναν ιδιαίτερο πολιτισμό, μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός”.

“Η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων αποσκοπούν να τα διασώσουν τόσο σαν έργα τέχνης όσο και σαν ιστορικές μαρτυρίες. Η διαδικασία της αποκαταστάσεως είναι μια επέμβαση υψηλής εξειδίκευσης που επιβάλλεται να γίνεται κατ' εξαίρεση. Έχει σαν στόχο να διατηρήσει και να αποκαλύψει τις ιστορικές και αισθητικές αξίες του μνημείου και βασίζεται στον σεβασμό προς την αρχική του υπόσταση και τα αυθεντικά του στοιχεία.”

(Χάρτα της Βενετίας 1964)

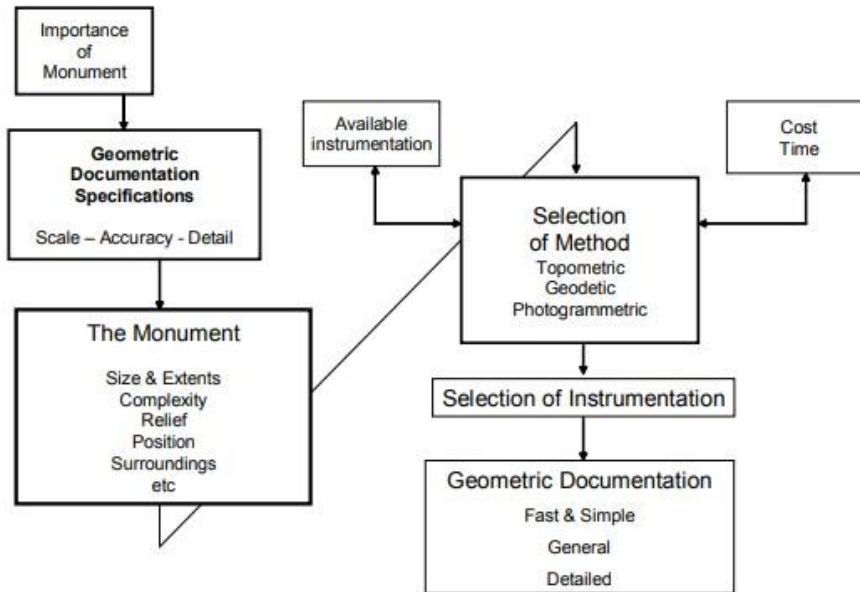
Το πρώτο απαραίτητο βήμα στη διαδικασία μελέτης και αποκατάστασης ενός ιστορικού μνημείου είναι η ακριβής γεωμετρική τεκμηρίωσή του.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση ενός μνημείου είναι η διαδικασία συλλογής, επεξεργασίας, απόδοσης και καταχώρισης στοιχείων για τον προσδιορισμό της θέσης και της πραγματικής μορφής, σχήματος και μεγέθους ενός μνημείου στο χώρο των τριών διαστάσεων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (Γεωργόπουλος & Ιωαννίδης 2008). Η γεωμετρική τεκμηρίωση καταγράφει την υφιστάμενη κατάσταση των μνημείων και αποτελεί απαραίτητο υπόβαθρο τόσο για τις μελέτες εκείνων που μελετούν το παρελθόν και την ιστορία τους, όσο και για τις μελέτες εκείνων που φροντίζουν τη διατήρησή τους στο πέρασμα του χρόνου. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της γεωμετρικής τεκμηρίωσης ενός μνημείου, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψιν ο λόγος και οι απαιτήσεις της αποτύπωσής του, προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη κλίμακα και κατ' επέκταση η ακρίβεια του τελικού προϊόντος, η οποία υποδηλώνει και το επίπεδο λεπτομέρειας της αποτύπωσης. Οι διάφορες κλίμακες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- i. οι κλίμακες 1:250 και 1:100, οι οποίες συσχετίζουν το μνημείο με τον περιβάλλοντα χώρο
- ii. οι κλίμακες 1:50 και 1:20, που παρέχουν ένα πολύ λεπτομερές προϊόν και χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο της κατάστασης του μνημείου και τον σχεδιασμό εργασιών αποκατάστασής του, σε περίπτωση που έχει φθαρεί ή καταστραφεί
- iii. οι κλίμακες μεγαλύτερες της 1:20, που χρησιμοποιούνται για κατασκευές που απαιτούν πολύ μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας.

Δεδομένου ότι η διακριτική ικανότητα του ματιού είναι 0.25 mm, οι ακρίβειες κυμαίνονται από 7 cm έως μερικά χιλιοστά (Georgopoulos & Ioannidis 2004).

Αφού πραγματοποιηθεί η αναγνώριση του μνημείου (έκταση, μέγεθος, πολυπλοκότητα, ανάγλυφο, θέση, περιβάλλον χώρος), γίνει η επιλογή της κλίμακας και καθοριστεί η αναλυτικότητα-λεπτομέρεια της αποτύπωσής του, επιλέγεται η κατάλληλη μεθοδολογία, σύμφωνα και με τον διαθέσιμο εξοπλισμό, καθώς και με το κόστος και το χρόνο που διατίθενται για την εκάστοτε αποτύπωση.



Εικόνα 3 - 1: Γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων

Πηγή: *Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments* Andreas Georgopoulos and Charalambos Ioannidis, Greece 2004

Στη γεωμετρική τεκμηρίωση εφαρμόζονται οι ακόλουθες μέθοδοι:

- οι απλές τοπομετρικές μετρήσεις (καθόλου ή μερικώς ελεγχόμενες αποτυπώσεις)
- οι τοπογραφικές και φωτογραμμετρικές μέθοδοι (πλήρως ελεγχόμενες αποτυπώσεις).

Οι τοπομετρικές μέθοδοι εφαρμόζονται μόνο εκεί όπου οι διαστάσεις και η πολυπλοκότητα του αντικείμενου το επιτρέπουν, δηλαδή εκεί όπου μια μη ελεγχόμενη μικρής ακρίβειας αποτύπωση είναι ανεκτή ή χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με τις μεθόδους πλήρως ελεγχόμενων αποτυπώσεων.

Οι τοπογραφικές και φωτογραμμετρικές μέθοδοι βασίζονται σε άμεσες μετρήσεις μηκών και γωνιών είτε στο αντικείμενο είτε σε εικόνες. Προσδιορίζουν τρισδιάστατες συντεταγμένες σε ενιαίο σύστημα αναφοράς και εξασφαλίζουν προδιαγεγραμμένη, ενιαία ακρίβεια. Επιπρόσθετα, παρέχουν προσαρμοστικότητα ευελιξία, ταχύτητα, ασφάλεια και αποδοτικότητα, καθώς επίσης είναι οικονομικότερες, με την έννοια ότι είναι οι μόνες που μπορούν να ικανοποιήσουν με ασφάλεια τις οποιοσδήποτε προδιαγραφές με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος και τη μεγαλύτερη ωφέλεια (Georgopoulos & Ioannidis 2004).

Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά και ανάλυση των φωτογραμμετρικών μεθόδων επεξεργασίας φωτογραφικών δεδομένων για την παραγωγή προϊόντων που απαιτούνται σε μια γεωμετρική τεκμηρίωση ενός μνημείου, όπως διανυσματικά σχέδια, ορθοεικόνες, φωτομωσαϊκά, 3D απεικονίσεις, προτού εισχωρήσουν στη φωτογραμμετρία οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες (SfM_MVS).

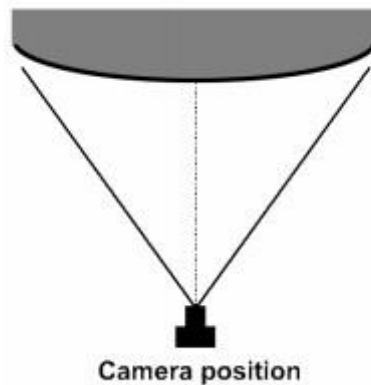
3.1 Περιγραφή αρχικών φωτογραμμετρικών μεθόδων

Στη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων, πρωταρχικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες αποτελούν η αναγωγή και η στερεο-απόδοση.

Αναγωγή-Μονοεικονική Φωτογραμμετρία

Είναι γνωστό ότι οι φωτογραφικές εικόνες είναι κεντρικές προβολές, στις οποίες τα αντικείμενα αλλάζουν σχήμα και διαστάσεις συναρτήσει της απόστασής τους από το σημείο λήψης. Η ανηγμένη εικόνα, αποτελείται από λήψεις που έχουν υποστεί κατάλληλη γεωμετρική επεξεργασία, δηλαδή προβολικό μετασχηματισμό, ώστε να θεωρηθούν ορθές προβολές σε προκαθορισμένη κλίμακα με δυνατότητα άμεσης εκτέλεσης μετρήσεων.

Αναγωγή καλείται ο προβολικός μετασχηματισμός της εικόνας ενός 2D αντικειμένου σε ορθή προβολή. Με τη μονοεικονική επεξεργασία είναι δυνατό να υπάρχει απόδοση ενός αντικειμένου και εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας, χρησιμοποιώντας μια και μόνο εικόνα.



Εικόνα 3 - 2: Τρόπος λήψης εικόνας στη φωτογραμμετρική αναγωγή

Πηγή: ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY: Basic theory, Procedures, Tools (HANKE & GRUSSENMEYER 2002)

Για την αναγωγή της εικόνας, είναι απαραίτητα τουλάχιστον τέσσερα φωτοσταθερά σημεία, τα οποία θα πρέπει να καλύπτουν περιμετρικά το προς μελέτη αντικείμενο, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο βέλτιστος υπολογισμός των παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού της αρχικής εικόνας και ακολούθως ο υπολογισμός των συντεταγμένων X και Y με βάση τις μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων x και y . Ο υπολογισμός του προβολικού μετασχηματισμού στηρίζεται γενικά στις

ομολογίες τεσσάρων τουλάχιστον σημείων της εικόνας με τέσσερα γνωστά σημεία του επιπέδου. Σε περίπτωση που τα σημεία που διατίθενται είναι περισσότερα από τέσσερα, οι παράμετροι προσδιορίζονται με τη βοήθεια της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Η βασική προϋπόθεση για να είναι δυνατή η εφαρμογή της αναγωγής είναι να είναι το αντικείμενο είτε τελείως επίπεδο, είτε το βάθος του σε σχέση και με την απόσταση λήψης να θεωρείται αμελητέο.

Η φωτογραμμετρική αναγωγή εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί με ελάχιστο κόστος (μέτρηση ορισμένων μόνο σημείων που βρίσκονται στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο και μπορεί να προσδιοριστούν ακόμα και με χρήση των εμπειρικών τεχνικών αποτύπωσης) και χρόνο να δώσει ένα συνεχές φωτογραφικό προϊόν σε ορθή προβολή, το οποίο ενσωματώνεται με μεγάλη ευκολία σε ένα σύστημα ψηφιοποίησης CAD και οδηγεί πολύ εύκολα στο γραμμικό σχέδιο ενός μνημείου. Επιπρόσθετα, με αναγωγή πολλών συνεχόμενων επικαλυπτόμενων εικόνων μπορεί να δημιουργηθεί ένα μωσαϊκό ανηγμένων εικόνων (φωτομωσαϊκό). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές εικόνες που έχουν ληφθεί από κοινές φωτογραφικές μηχανές, ακόμα και μη μετρητικές.

Ο περιορισμός της εφαρμογής της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την ανοχή της μέγιστης απόκλισης ενός σημείου της εικόνας στην ανηγμένη εικόνα. Αυτό συμβαίνει λόγω της μη επιπεδότητας του αντικειμένου και σχετίζεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση των σημείων του αντικειμένου από το επίπεδο της αναγωγής: $\Delta H_{\max} = \Delta r_{\max} (mkc/r)$, όπου mk η κλίμακα της ανηγμένης εικόνας (Georgopoulos & Ioannidis 2004).



original photo



rectified orthophoto (in scale)

Εικόνα 3 - 3: Δημιουργία ορθοφωτογραφίας με τη μονοεικονική φωτογραμμετρία

Πηγή: ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY: Basic theory, Procedures, Tools (HANKE & GRUSSENMEYER 2002)

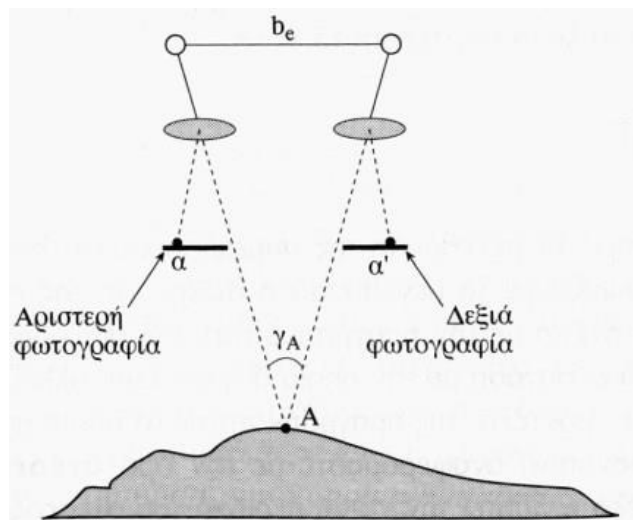
Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, όπου χρησιμοποιείται η λήψη μιας εικόνας για την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας, στη στερεο-απόδοση χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες εικόνες. Η στερεοσκοπική μέθοδος προσομοιώνει την ανθρώπινη όραση με την χρήση στερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων. Στη στερεοσκοπική μέθοδο, η βασική ιδέα για τη μέτρηση τριών διαστάσεων βασίζεται στα στερεοζεύγη.

Τα φωτογραμμετρικά όργανα, αναλυτικά ή ψηφιακά, επιτρέπουν τη στερεοσκοπική παρατήρηση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα μετρήσεων σημείων και γραμμικών χαρακτηριστικών στον τρισδιάστατο χώρο (Georgoroulos & Ioannidis 2004).

Το αντικείμενο φωτογραφίζεται από διαφορετικές θέσεις (δεξιά και αριστερά) και η 3D μέτρηση γίνεται χρησιμοποιώντας τα επικαλυπτόμενα τμήματα.

Η επικάλυψη των εικόνων πρέπει να είναι τουλάχιστον 60%, προκειμένου να διασφαλιστεί ο ακριβής φωτογραμμετρικός προσδιορισμός των παρατηρούμενων σημείων (Ioannidis, Potsiou 1999).

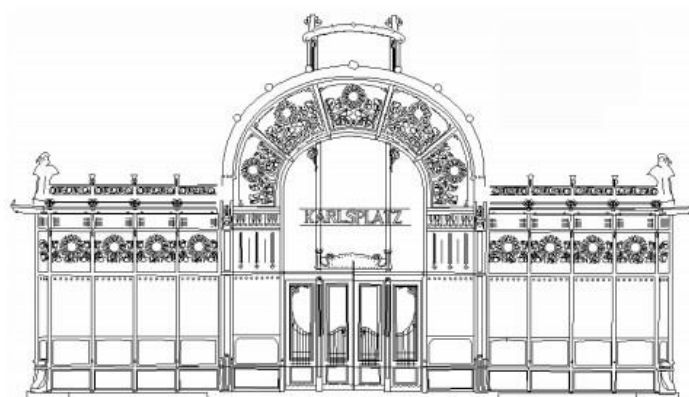


Εικόνα 3 - 4: Λήψη στερεοζεύγους

Πηγή: Βασίλης Γιαννακόπουλος, Εφαρμογές Φωτογραμμετρίας

Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων δημιουργούνται από την επισήμανση ομόλογων σημείων σε ένα ζεύγος εικόνων και την μέτρηση της απόστασής τους κατά x . Για να γίνει η 3D μέτρηση από τις εικόνες, είναι απαραίτητο πρώτα να έχει προσδιοριστεί η θέση και η στροφή της φωτομηχανής, καθώς επίσης απαιτείται και η γνώση ορισμένων φωτοσταθερών για τη σωστή θέση, προσανατολισμό και κλίμακα του τρισδιάστατου μοντέλου. Συνήθως για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιείται η μέθοδος του αεροτριγωνισμού. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κάθε φωτογραμμετρικό ζεύγος χρειάζεται τουλάχιστον τρία φωτοσταθερά, δύο πλήρη (με γνωστές και τις τρεις συντεταγμένες X, Y, Z) και ένα

υπομετρικό (με γνωστό μόνο το υψόμετρο Z) (Σημειώσεις Αεροτριγωνισμού, Ιωαννίδης 2015). Αυτό συμβαίνει, διότι οι άγνωστες παράμετροι είναι επτά (3 άγνωστοι για μετάθεση XYZ, 3 άγνωστοι για στροφή ωφκ, 1 άγνωστος για κλίμακα m). Για τον προσδιορισμό της κλίμακας, απαιτείται η γνώση της θέσης δύο σημείων στο χώρο (δηλαδή 2 πλήρη φωτοσταθερά XYZ). Για τη μετάθεση χρειάζεται ένα πλήρες φωτοσταθερό. Ενώ για το πόσο θα στραφεί το μοντέλο αρκούν 3 υπομετρικά σημεία. Στην πράξη χρησιμοποιούνται τέσσερα ή και παραπάνω πλήρη φωτοσταθερά. Το πλεονέκτημα της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας έγκειται στην τρισδιάστατη αντίληψη και στερεοσκοπική παρατήρηση των λεπτομερειών των επικαλυπτόμενων τμημάτων του 3D χώρου στις δύο εικόνες σε εξειδικευμένους Ψηφιακούς Φωτογραμμετρικούς Σταθμούς. Η παρουσίαση πραγματοποιείται με ένα σύστημα στερεοσκοπικής παρατήρησης του στερεοζεύγους, όπου ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία (σχετικός προσανατολισμός) και κατόπιν της δημιουργίας επιπολικών εικόνων, είναι δυνατή η 3D όραση όλων των λεπτομερειών που βρίσκονται στην επικαλυπτόμενη περιοχή των εικόνων του στερεοζεύγους. Τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής μεθόδου μπορεί να είναι: δισδιάστατα σχέδια προσόψεων, τρισδιάστα μοντέλα, τρισδιάστατες συντεταγμένες (HANKE, GRUSSENMEYER 2002).



Εικόνα 3 - 5: Παραγωγή 2D όψης με τη χρήση ενός στερεοζεύγους

Πηγή: ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY: Basic theory, Procedures, Tools (HANKE & GRUSSENMEYER 2002)

3.1.1 Παραδείγματα παλιών φωτογραμμετρικών μεθόδων επεξεργασίας

Γεωμετρική τεκμηρίωση του κάστρου της Χίου (Ioannidis & Potsiou 1999)

Για την αποκατάσταση του κτιρίου της Χίου, ήταν αναγκαία η γεωμετρική τεκμηρίωσή του. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε αναγωγή και στερεο-απόδοση. Η αναγωγή εφαρμόστηκε στις επίπεδες επιφάνειες του αντικειμένου, ενώ η στερεοσκοπική φωτογραμμετρία για τις υπόλοιπες επιφάνειες. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν τοπογραφικές μετρήσεις για τη μέτρηση των φωτοσταθερών, που είναι απαραίτητα για τη φωτογραμμετρική διαδικασία, καθώς επίσης και για επιπρόσθετη συλλογή δεδομένων, εκεί όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί φωτογραφική κάλυψη.

Για τη φωτογραμμετρική αναγωγή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ARCHIS της SISCAM. Το αποτέλεσμα των ανηγμένων εικόνων εισήχθη στο πρόγραμμα, όπου έγινε η παραγωγή των 2D ψηφιακών δεδομένων.

Η στερεο-απόδοση έγινε στο φωτογραμμετρικό σύστημα VMAP of VTA. Το αποτέλεσμα της στερεο-απόδοσης ήταν η παραγωγή 3D ψηφιακών δεδομένων.

Για την απόδοση των κυλινδρικών επιφανειών του αντικειμένου, επιλέχθηκε να γίνει προβολή των τμημάτων αυτών σε περισσότερες από μια επιφάνειες, σε γωνία 45° μεταξύ τους, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν διαστρεβλώσεις των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν κωνικά και κυλινδρικά αναπτύγματα των τμημάτων αυτών.

Γεωμετρική τεκμηρίωση και τρισδιάστατη φωτορεαλιστική απεικόνιση του πέτρινου γεφυριού του Κοκκόρου ή Νούτσου στο δήμο Κεντρικού Ζαγορίου
(*N. Κριθαράς, Χ. Κρισιωτάκη, Ε. Μπακάλη, Μ. Παπακώστα, Α. Γεωργόπουλος, Δ. Μπαλοδήμος 1999*)

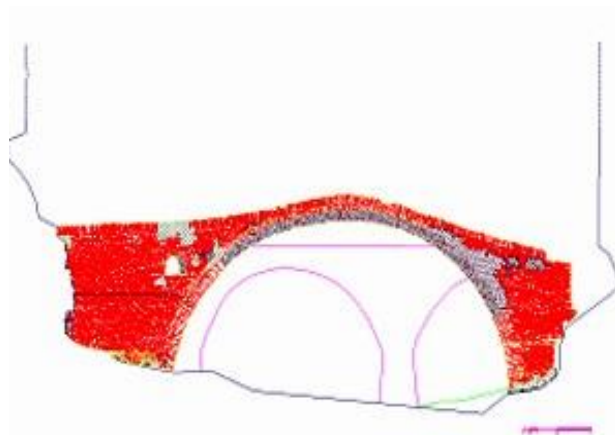
Για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του συγκεκριμένου γεφυριού, χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικές και φωτογραμμετρικές μέθοδοι.

Πραγματοποιήθηκε λήψη μετρητικών εικόνων με τη στερεοσκοπική μέθοδο, καθώς επίσης έγιναν και όλες οι απαραίτητες τοπογραφικές μετρήσεις (μετρήσεις κορυφών πολυγωνομετρικού δικτύου, φωτοσταθερών, σημείων ελέγχου). Το αποτέλεσμα ήταν η παραγωγή διανυσματικών σχεδίων με τη χρήση του αναλυτικού φωτογραμμετρικού οργάνου ADAM. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόδοση των σημείων λεπτομερειών του αντικειμένου με το όργανο απόδοσης που είχε επιλεγεί:



Εικόνα 3 - 6: Κάτοψη ευρύτερης περιοχής

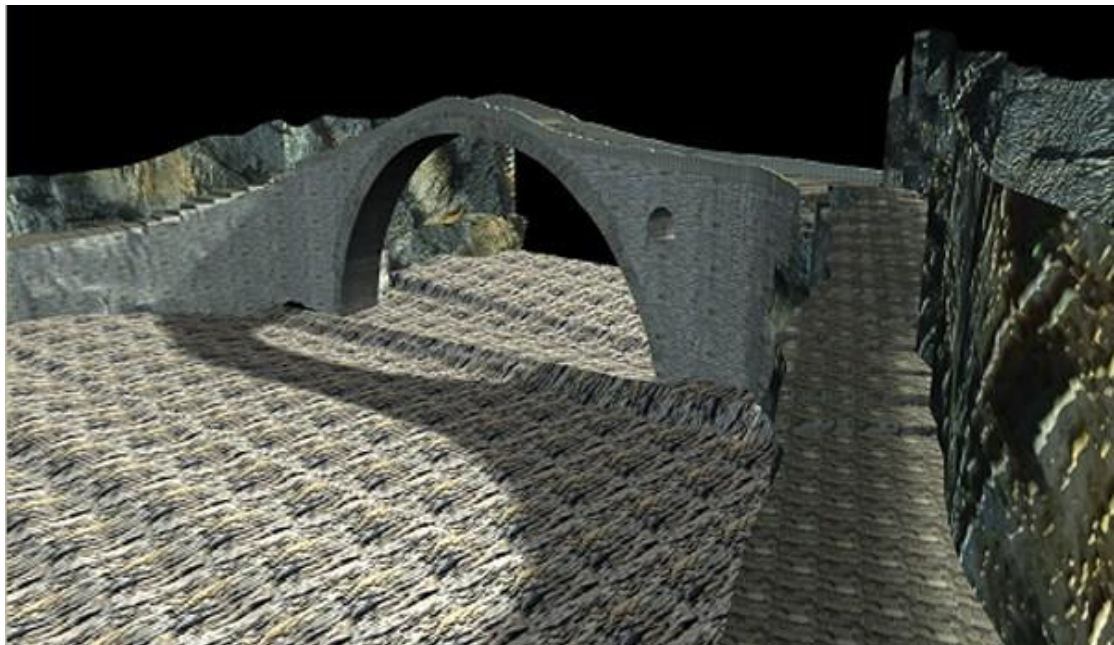
Πηγή: giannena_e.gr



Εικόνα 3 - 7 : Όψη γεφυριού

Πηγή: giannena_e.gr

Όσον αφορά την τρισδιάστατη φωτορεαλιστική απεικόνιση, αρχικά δημιουργήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης του γεφυριού, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο πέντε ψηφιακά σχέδια, ένα δισδιάστατο και τέσσερα τρισδιάστατα. Στο δισδιάστατο σχέδιο απεικονίζονται η προβολή του γεφυριού και του περιβάλλοντα χώρου σε οριζόντιο επίπεδο. Τα υπόλοιπα σχέδια είναι διανυσματικά και σε αυτά απεικονίζονται όψεις του γεφυριού. Το τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργήθηκε με χρήση του προγράμματος AutoCAD R14. Έγινε επεξεργασία των διανυσματικών σχεδίων και στη συνέχεια η σύνδεσή τους βάσει ομόλογων σημείων, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ενιαίο μοντέλο. Τέλος, δημιουργήθηκαν οι γραμμές που περιγράφουν το αντικείμενο και οι επιφάνειες που το προσομοιώνουν. Για την απόδοση φωτορεαλισμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D Studio MAX R2.5. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν ένα ψηφιακό video.



Εικόνα 3 - 8: Απόσπασμα από το ψηφιακό video

Πηγή: giannena_e.gr

Γεωμετρική τεκμηρίωση Βυζαντινής εκκλησίας

(Γεωμετρική τεκμηρίωση πολιτιστικών αγαθών. Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ., Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας)

Πραγματοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο με τη μέθοδο του αεροτριγωνισμού με συνόρθωση κατά δέσμες (bundle adjustment). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μονοσκοπικές μετρήσεις ομόλογων σημείων σε δυο ή περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες. Με τη μέθοδο της συνόρθωσης κατά δέσμες υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας 3D μοντέλου (Georgoroulos & Ioannidis 2007).

Στη συγκεκριμένη αποτύπωση, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Photomodeler, όπου ακολουθήθηκε η εξής σειρά εργασιών:

- i. Μαρκάρισμα ομόλογων σημείων
- ii. Καθορισμός γραμμών και καμπυλών
- iii. Δημιουργία επιφανειών

Τα προϊόντα που παρήχθησαν για τη συγκεκριμένη γεωμετρική τεκμηρίωση είναι το τρισδιάστατο μοντέλο, καθώς και ορθοεικόνες.

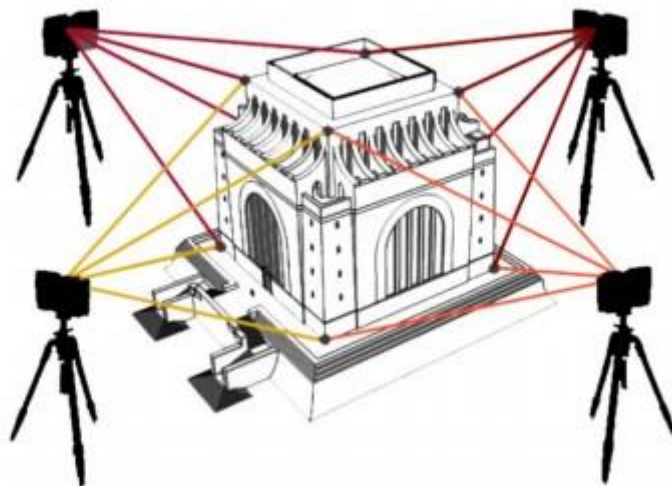


Εικόνα 3 - 9: Ορθοφωτογραφία και τρισδιάστατο μοντέλο βυζαντινής εκκλησίας

Πηγή: (Γεωμετρική τεκμηρίωση πολιτιστικών αγαθών. Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ., Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας)

3.2 Συμβολή της μεθόδου σάρωσης στη γεωμετρική τεκμηρίωση

Μία από τις πιο σύγχρονες μεθόδους αποτύπωσης αποτελεί η σάρωση με τρισδιάστατους επίγειους σαρωτές. Οι σαρωτές αυτοί παρέχουν τη δική τους πηγή φωτός για τον προσδιορισμό ενός σημείου στο 3D χώρο. Έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν μεγάλο αριθμό σημείων (point clouds), από μερικές χιλιάδες έως 1.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και με ακρίβεια 2-6mm (Georgoroulos A., Ioannidis C. 2007). Ο σαρωτής εκπέμπει συνεχώς άπειρες ακτίνες λέιζερ στο χώρο, περιστρέφοντας τον ενσωματωμένο πομπό ακτίνων κατά τον κάθετο και οριζόντιο άξονά του. Ταυτόχρονα με την εκπομπή, το όργανο συλλέγει τις αντανακλώμενες ακτίνες από την επιφάνεια του αντικειμένου και προσδιορίζει άμεσα τις συντεταγμένες XYZ στο σημείο της ανάκλασης. Ανάλογα με την προκαθορισμένη πυκνότητα σάρωσης, επιτυγχάνεται και η επιθυμητή ποιότητα καταγραφής. Αφού ολοκληρωθεί η καταγραφή των σημείων, ο σαρωτής έχει τη δυνατότητα ταύτισης των σημείων XYZ με την αντίστοιχη χρωματική υφή των σημείων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του προς αποτύπωση αντικειμένου, με μεγάλη ακρίβεια ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αλλά και σε συνδυασμό με το χρώμα και την υφή του πρωτοτύπου (Λιανός 2017).



Εικόνα 3 - 10: Ενδεικτικές στάσεις σάρωσης κτιρίου με επίγειο τρισδιάστατο σαρωτή

Πηγή: Η χρήση της τρισδιάστατης ψηφιακής μεθοδολογίας, στη μελέτη, προστασία και ανάδειξη μνημείων και ιστορικών συνόλων (Λιανός)

Η ποιότητα και η ακρίβεια του τελικού προϊόντος, εξαρτώνται από την ακρίβεια των μετρήσεων που πραγματοποιεί ο σαρωτής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δέσμη laser και συνεπώς την ακρίβεια είναι η μέθοδος της σάρωσης, η ταχύτητα σάρωσης, η απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο, η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ ακτίνας laser και της επιφάνειας του αντικειμένου, η ανακλαστικότητα των επιφανειών, το υλικό στο οποίο προσπίπτουν οι ακτίνες, η πυκνότητα της σάρωσης, ο θόρυβος σάρωσης, η θερμοκρασία, καθώς και η ατμόσφαιρα (Reshetyuk 2009). Για τη δημιουργία του τελικού ψηφιακού μοντέλου του προς αποτύπωση αντικειμένου, ακολουθείται μια σειρά εργασιών. Αρχικά, γίνεται η επεξεργασία του νέφους σημείων που προέρχονται από το σαρωτή laser, δηλαδή μειώνεται ο θόρυβος που έχουν δημιουργήσει τυχόν λάθος σημεία. Ακολουθεί η συνένωση των νεφών, προκειμένου να ενταχθούν οι διαφορετικές σαρώσεις σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Τέλος, πραγματοποιείται η διαδικασία παραγωγής του τελικού προϊόντος, ανάλογα με τις ανάγκες της σάρωσης.

Το τελικό παράγωγο που προκύπτει από τη μέθοδο σάρωσης, μπορεί να είναι:

- i. Το νέφος σημείων. Είναι χρήσιμο και αποτελεί ικανοποιητικό προϊόν για απλά σχήματα. Ωστόσο δεν ενδείκνυται για αντικείμενα με περίπλοκο σχήμα.
- ii. Τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας (σε συνδυασμό με την πληροφορία υψής)
- iii. Σειρά εικόνων
- iv. Τρισδιάστατο μοντέλο ως απεικόνιση του αντικειμένου

(Georgopoulos & Ioannidis 2007).

Γενικά η μέθοδος σάρωσης είναι ταχύτερη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης. Εφαρμόζεται εύκολα και γρήγορα σε μεγάλους και πολύπλοκους χώρους, καθώς και σε απρόσιτα σημεία. Παράγει προϊόντα με μεγάλη ακρίβεια και συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την πληρότητα της φωτογραμμετρικής. Για το λόγο αυτό, υλοποιείται πολύ συχνά σε εφαρμογές γεωμετρικής τεκμηρίωσης ενός αντικειμένου. Ωστόσο, ο εξοπλισμός είναι αρκετά ακριβός για μικρές εργασίες, καθώς και υψηλό είναι το κόστος επιδιόρθωσης των οργάνων. Επιπρόσθετα, εντοπίζεται αδυναμία σάρωσης σε αδιαφανείς ή γυαλιστερές επιφάνειες, καθώς και απαιτούνται διαφορετικά όργανα για κοντινές ή μακρινές αποστάσεις (Λιανός 2017). Μικρής πυκνότητας σαρώσεις (της τάξης των λίγων δεκάδων χιλιάδων σημείων ανά δευτερόλεπτο) μπορούν να διαρκέσουν λίγα δευτερόλεπτα, ενώ σαρώσεις υψηλής πυκνότητας απαιτούν αρκετά λεπτά, καθώς αποτυπώνουν αρκετά εκατομμύρια στη μονάδα του χρόνου (Συμεωνίδης 2007). Αυτό μπορεί να επιφέρει σημαντικά προβλήματα που αφορούν τυχόν μετακινήσεις του σαρωτή, οι οποίες θα δημιουργήσουν σφάλμα στο σωστό εντοπισμό των

σημείων, καθώς επίσης ο όγκος των αρχικών δεδομένων να είναι τεράστιος, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η επεξεργασία τους.

Παράδειγμα γεωμετρικής τεκμηρίωσης με τη μέθοδο σάρωσης

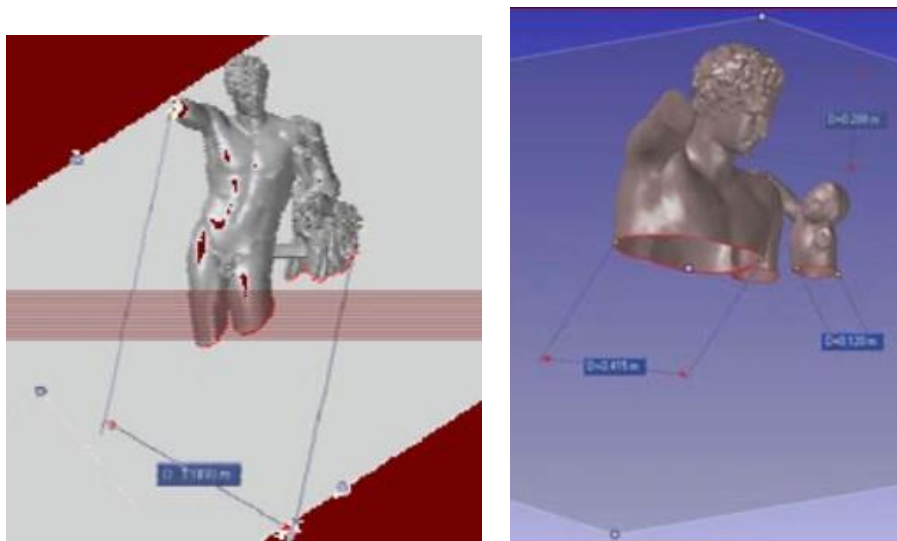
Η γεωμετρική τεκμηρίωση του Ερμή του Πραξιτέλη πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο σάρωσης. Η τρισδιάστατη απεικόνισή του βασίστηκε στο νέφος σημείων που παρήγαγε ο τρισδιάστατος επίγειος σαρωτής laser scanner.



Εικόνα 3 - 11: Ερμής του Πραξιτέλη. Τρισδιάστατη απόδοση

Πηγή: *Innovative Techniques for the Acquisition and Processing of Multisource Data.* (Georgopoulos A., Ioannidis C. 2007).

Στο πλαίσιο αυτής της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, έγιναν κάποιες τομές, καθώς επίσης ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν και 3D μετρήσεις.



Εικόνα 3 - 12: Τομή 3D μοντέλου και 3D μετρήσεις

Πηγή: (Γεωμετρική τεκμηρίωση πολιτιστικών αγαθών. Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ., Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας)

Η χρήση των παραπάνω μεθόδων και τεχνικών μεμονωμένα, δηλαδή τοπογραφική, φωτογραμμετρική και σάρωσης, δεν μπορεί να επιφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα για τη γεωμετρική τεκμηρίωση ενός μνημείου, σε ό,τι αφορά την ακρίβεια, την πληρότητα και τη μορφή του τελικού προϊόντος. Ο συνδυασμός των τοπογραφικών και φωτογραμμετρικών μεθόδων, είναι απαραίτητος όπως διαπιστώθηκε από τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν, ενώ υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου η τοπογραφία συμβάλλει στις εφαρμογές σάρωσης (για τον καθορισμό ενιαίου συστήματος αναφοράς σε πολλαπλές σαρώσεις, για τις μετρήσεις στόχων ή τις θέσεις σάρωσης). Ωστόσο, ο συνδυασμός των φωτογραμμετρικών τεχνικών και των νεφών σημείων, που παράγονται από τη σάρωση, είναι σημαντικός για μια ολοκληρωμένη γεωμετρική τεκμηρίωση. Τα πυκνά νέφη σημείων (dense point clouds) αποτελούν ένα ιδανικό μοντέλο ψηφιακής επιφάνειας (DSM) για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας. Το τρισδιάστατο μοντέλο, που έχει προκύψει από τη σάρωση, μαζί με τα φωτογραμμετρικά προϊόντα, συντελούν σε ένα ποιοτικό και άριστο προϊόν, με μεγάλη ακρίβεια (Georgopoulos A., Ioannidis C. 2007).

3.3 Γεωμετρική τεκμηρίωση και αποκατάσταση του μνημείου των Σουλιωτισσών

Για τη γεωμετρική τεκμηρίωση και την τρισδιάστατη οπτικοποίηση του μνημείου των Σουλιωτισσών, που μελετάται στη διπλωματική αυτή, χρησιμοποιούνται και εφαρμόζονται και οι τρεις μέθοδοι (τοπογραφική, φωτογραμμετρική και σάρωσης). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

3.3.1 Φωτογραμμετρικές λήψεις

Πριν την πραγματοποίηση των φωτογραμμετρικών λήψεων, ορίστηκαν οι θέσεις των φωτοσταθερών σημείων πάνω στο αντικείμενο, προκειμένου να φαίνονται όλα τα απαραίτητα φωτοσταθερά σημεία για την εφαρμογή των φωτογραμμετρικών μεθόδων που επιλέχθηκαν, δηλαδή μονοεικονική αναγωγή και στερεοσκοπική φωτογραμμετρία. Στο στάδιο του προγραμματισμού των λήψεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν το μέγεθος, το σχήμα και η πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η δυνατότητα απομάκρυνσης από το αντικείμενο ή η δυνατότητα προσέγγισης σε αυτό, οι προδιαγραφές για την ακρίβεια και την κλίμακα των τελικών παραγώγων, καθώς και ο διαθέσιμος εξοπλισμός.

Με βάση τα παραπάνω, το μνημείο των Σουλιωτισσών λόγω του σχήματός του καλύφθηκε στο σύνολό του από ζεύγη επικαλυπτόμενων στερεοσκοπικών εικόνων, ενώ για τη νότια όψη, καθώς και για τμήματα του βάρους της δυτικής όψης, τα οποία θεωρήθηκαν επίπεδα με πολύ καλή προσέγγιση, εφαρμόστηκε η μέθοδος της φωτογραμμετρικής αναγωγής.

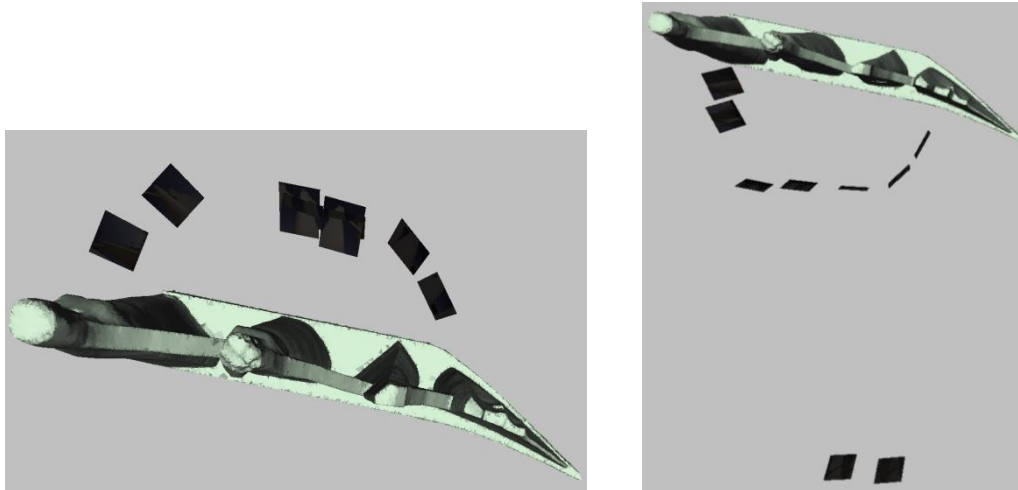
Κατά την πρώτη φάση συλλογής δεδομένων, πραγματοποιήθηκαν λήψεις με φακό σταθερής εστιακής απόστασης 24mm από απόσταση 7 μέτρων. Ωστόσο, στη δυτική όψη πραγματοποιήθηκαν και πλάγιες λήψεις, λόγω του περιορισμού της απόστασης, εξαιτίας της ύπαρξης γκρεμού.



Εικόνα 3 - 13: Πλάγιες λήψεις

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

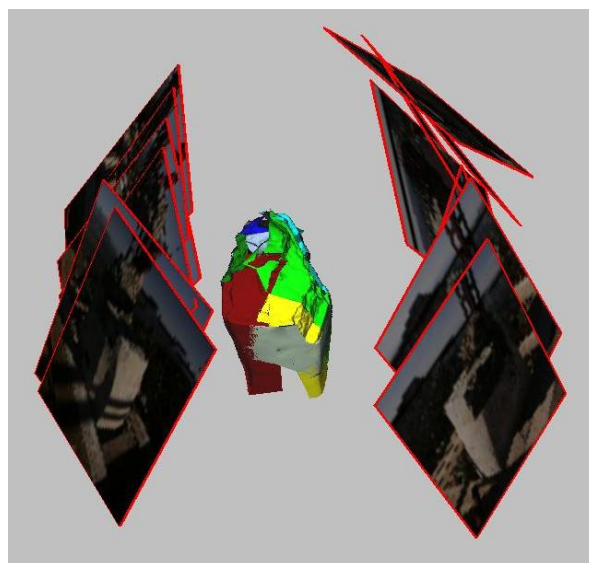
Για τη ψηλότερα τμήματα, οι λήψεις έγιναν με τη χρήση φακού μεταβλητής εστιακής απόστασης 24-85mm από απόσταση μέχρι και 32.7 m, προκειμένου να αποφευχθούν οι μεγάλες κλίσεις της μηχανής και συνεπώς να διατηρηθεί η κλίμακα .



Εικόνα 3 - 14: Διαγράμματα λήψεων κατά την 1^η φάση συλλογής δεδομένων

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Κατά τη δεύτερη φάση συλλογής δεδομένων, τοποθετήθηκαν σκαλωσιές, προκειμένου να φωτογραφηθούν τα ψηλότερα τμήματα του μνημείου. Χρησιμοποιήθηκε φακός μεταβλητής εστιακής απόστασης 16-35mm, ενώ η απόσταση λήψης περιορίστηκε στο 1-1.50 m.



Εικόνα 3 - 15: Διάγραμμα λήψεων κατά την 2^η φάση συλλογής δεδομένων

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Οι αρχικές εικόνες, που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων, και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας, θα πρέπει να έχουν τέτοια κλίμακα, ώστε η εδαφοψηφίδα τους να είναι μικρότερη από την εδαφοψηφίδα της τελικής ορθοφωτογραφίας.

Ειδικότερα, με βάση την κλίμακα του τελικού προϊόντος, η οποία είναι 1:50, η εδαφοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας είναι ίση με 5mm.

$$\begin{aligned} \text{GSD} &= (\text{διακριτό στοιχείο στην ορθοφωτογραφία}) * (\text{συντελεστή κλίμακας ο/φ}) \\ &= (0.1\text{mm}) * (50) = 5\text{mm} \end{aligned}$$

Ωστόσο, στο παρόν έργο, ορίσθηκε εδαφοψηφίδα, 2mm, καλύτερη από την προαπαιτούμενη ακρίβεια, με σκοπό αφενός να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε ακρίβεια και ευκρίνεια της τελικής κλίμακας, αφετέρου να υπάρχει δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης, σε περίπτωση που αυτό χρειαστεί.

Η εδαφοψηφίδα σε μια αρχική εικόνα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{GSD} = (\text{pixel μηχανής}) * (\text{συντελεστή κλίμακας εικόνας})$$

Το pixel size της μηχανής είναι 8.2μm.

Η κλίμακα της αρχικής εικόνας, δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{k} = \frac{c}{H}$$

όπου c: εστιακή απόσταση μηχανής

H: απόσταση λήψης

Επομένως, επιλέγονται οι εικόνες εκείνες, οι οποίες έχουν την απαραίτητη κλίμακα για την ακρίβεια που πρέπει να επιτευχθεί.

Παραδείγματα λήψεων εικόνων για τη μέθοδο της φωτογραμμετρικής αναγωγής:



Εικόνα 3 - 16: Λήψεις εικόνων νότιας όψης για φωτογραμμετρική αναγωγή

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ



Εικόνα 3 - 17: Λήψεις εικόνων βάθρου δυτικής όψης για φωτογραμμετρική αναγωγή

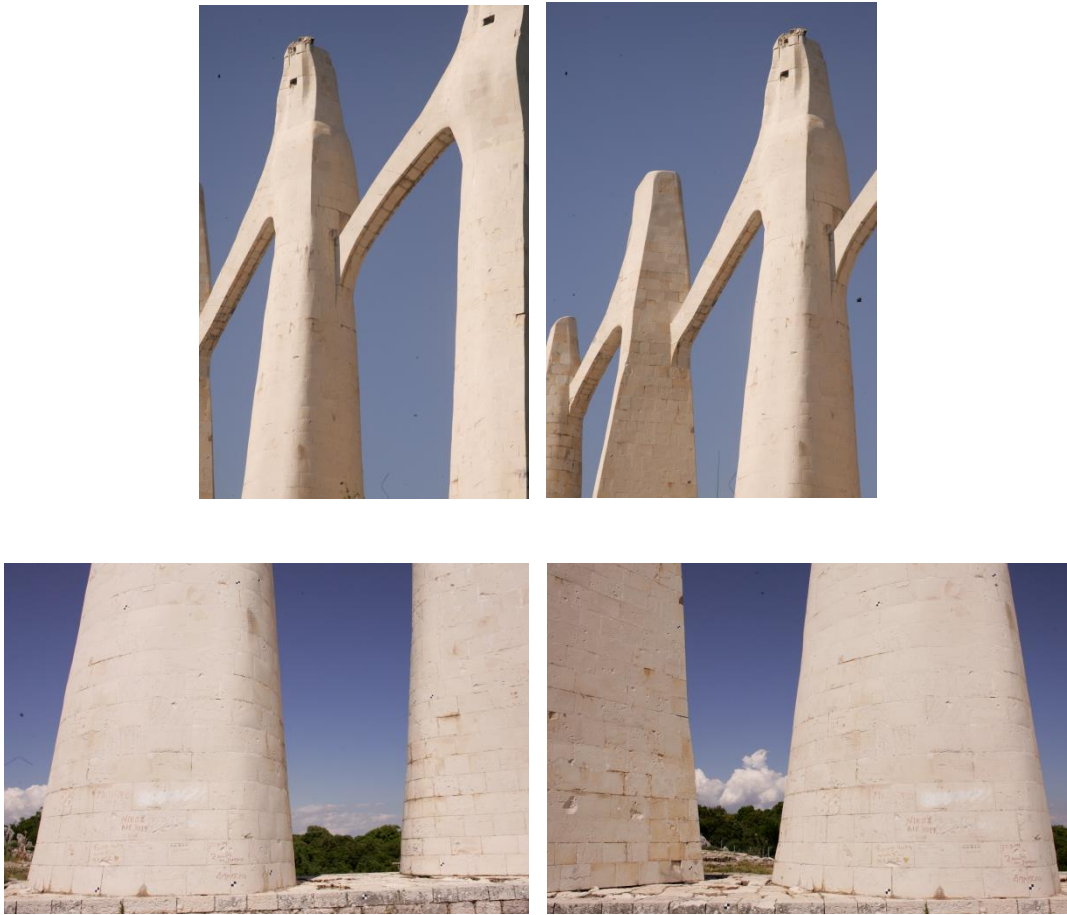
Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Παραδείγματα λήψεων εικόνων για τη μέθοδο της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας:



Εικόνα 3 - 18: Λήψεις εικόνων ανατολικής όψης για στερεοσκοπική φωτογραμμετρία

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ



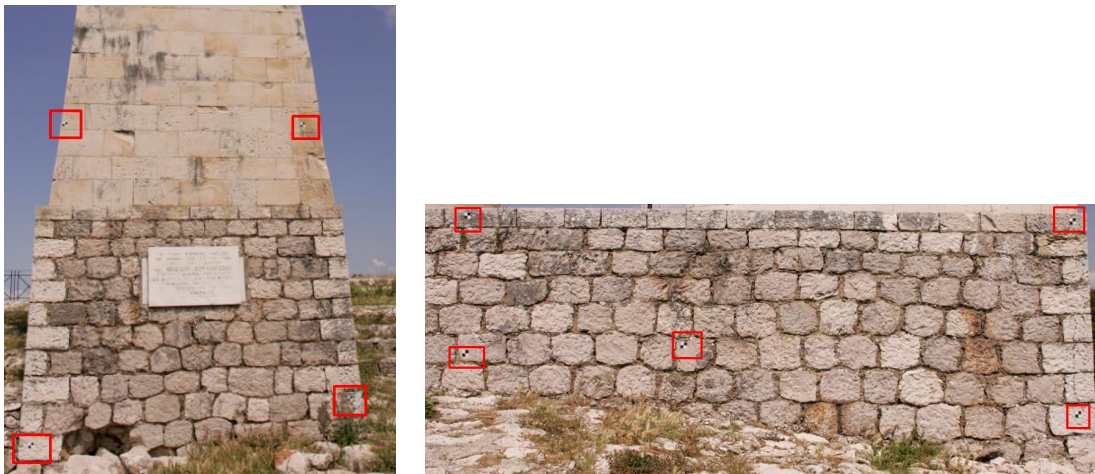
Εικόνα 3 - 19: Λήψεις εικόνων δυτικής όψης για στερεοσκοπική φωτογραμμετρία

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

3.3.2 Επεξεργασία εικόνων και παραγωγή ορθοεικόνων με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους (αναγωγής – στερεοσκοπικής απόδοσης)

Για την παραγωγή ορθοεικόνων για τα επίπεδα τμήματα του μνημείου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αναγωγής ARCHIS της Siscam. Συνολικά παρήχθησαν 8 ορθοεικόνες για τα επίπεδα τμήματα (πέντε για τα επίπεδα τμήματα του βάθρου στη δυτική όψη και τρεις για όλη τη νότια όψη του μνημείου).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.1, για την αναγωγή κάθε εικόνας χρειάζονται τουλάχιστον τέσσερα φωτοσταθερά.



Εικόνα 3 - 20: Τοποθέτηση απαραίτητων φωτοσταθερών για τη μέθοδο της αναγωγής

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Όσον αφορά στη στερεοσκοπική μέθοδο, οι φωτογραμμετρικοί προσανατολισμοί των εικόνων των μη επίπεδων τμημάτων, πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Image Master της TOPCON.

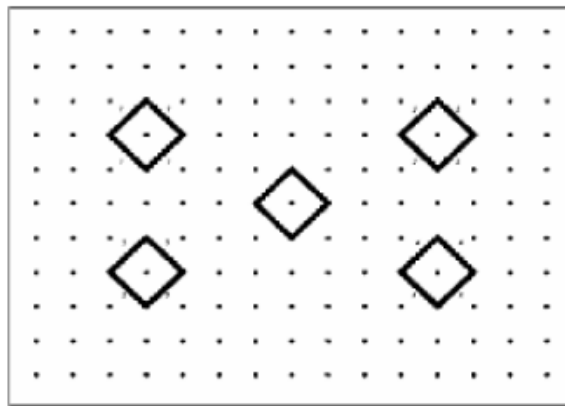
Προτού γίνει η επεξεργασία των εικόνων στο Image Master, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της μηχανής στο λογισμικό Image Master Calib. Το λογισμικό αυτό, έχει σχεδιαστεί για να βαθμονομεί ψηφιακές μηχανές, που χρησιμοποιούνται στη λήψη εικόνων, οι οποίες στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για 3D μετρήσεις (Image Master Calib, Manual). Προκειμένου οι 3D μετρήσεις που θα λαμβάνονται από τις εικόνες να είναι ακριβείς, θα πρέπει να υπολογιστούν οι παράμετροι κάθε ψηφιακής κάμερας. Το συγκεκριμένο λογισμικό θα δώσει τις εξής παραμέτρους:

- ❖ Εστιακή απόσταση
- ❖ Παράμετροι ακτινικής διαστρόφης
- ❖ Θέση πρωτεύοντος σημείου

(Image Master Calib, Manual).

Η διαδικασία έχει ως εξής:

Φωτογραφίζεται η ειδική, επίπεδη επιφάνεια από πέντε διαφορετικές γωνίες.



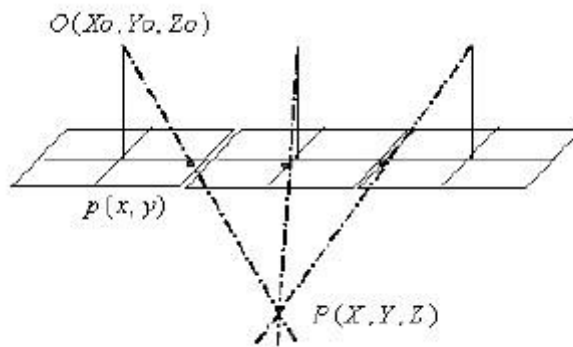
Εικόνα 3 - 21: Ειδική επιφάνεια για βαθμονόμηση

Πηγή: Image Master Calib, Manual

Το λογισμικό, αναγνωρίζει τους στόχους, συγκρίνει τις εικόνες και με αυτόν τον τρόπο υπολογίζει τις παραμέτρους της μηχανής (Image Master Calib, Manual).

Αφού γίνει επιτυχώς το στάδιο της βαθμονόμησης, τα στοιχεία που υπολογίστηκαν εισάγονται στο πρόγραμμα Image Master, όπου και θα πραγματοποιηθούν οι προσανατολισμοί των εικόνων.

Το πρόγραμμα Image Master για την επίλυση των προσανατολισμών, χρησιμοποιεί τη μέθοδο του αεροτριγωνισμού με συνόρθωση κατά δέσμες.



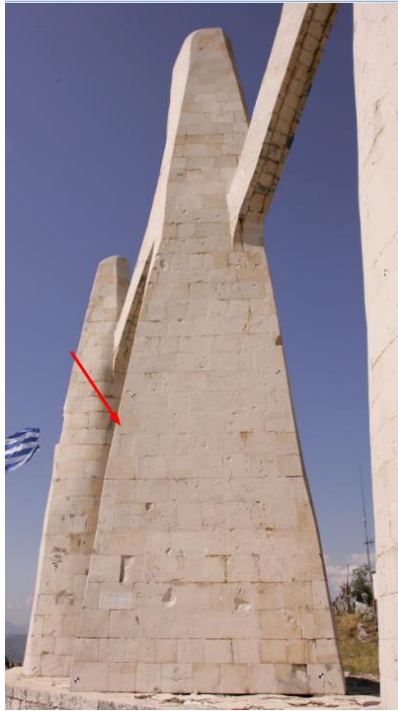
Εικόνα 3 - 22: Μέτρηση τρισδιάστατων συντεταγμένων από πολλές εικόνες

Πηγή: ImageMaster_Manual.pdf

Στον αεροτριγωνισμό, η θέση και οι στροφές των μηχανών, καθώς και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες όλων των σημείων, καθορίζονται ταυτόχρονα. Επίσης, χρησιμοποιώντας συντεταγμένες φωτοσταθερών σημείων, διορθώνονται τα σφάλματα στο σύνολό τους. Ειδικότερα, όσον αφορά τη διαδικασία των προσανατολισμών, πραγματοποιούνται μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων των σημείων στις εικόνες και στα στερεοζεύγη και έπειτα εφαρμόζεται η μέθοδος του αεροτριγωνισμού για το συνολικό μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται το στερεομοντέλο και γεωαναφέρεται παράλληλα.

Στο πρόγραμμα Image Master, οι προσανατολισμοί αποτελούν προεπεξεργασία, πριν τις τρισδιάστατες μετρήσεις στην εικόνα και τη δημιουργία ορθοφωτογραφίας (ImageMaster_Manual, TOPCON). Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία των προσανατολισμών, δημιουργούνται στερεοζεύγη με διορθωμένη την γ-παράλλαξη και είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν 3D μετρήσεις. Στις στερεοσκοπικές εικόνες, είναι δυνατό να δημιουργηθεί 3D απεικόνιση, καθώς και να πραγματοποιηθούν λεπτομερείς μετρήσεις σε επιφάνειες (ImageMaster_Manual, TOPCON).

Επιπρόσθετα, το Image Master έχει τη δυνατότητα αναγωγής μιας εικόνας, εφόσον αυτή πληροί τις απαραίτητες προϋποθέσεις (βλ.κεφάλαιο 3.1). Στην περίπτωση του μνημείου των Σουλιωτισσών, ένα τμήμα της τρίτης μορφής, θεωρήθηκε επαρκώς επίπεδο, προκειμένου να αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο της αναγωγής.



Εικόνα 3 - 23: Πλευρά τρίτης μορφής για τη μέθοδο της αναγωγής στο Image Master

Πηγή: Από διαθέσιμα δεδομένα-Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Στη συνέχεια, οι προσανατολισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του αεροτριγωνισμού με συνόρθωση κατά δέσμες, για σύνολα εικόνων που δημιουργούσαν μπλοκ, συνολικά έντεκα, και κάλυπταν μεγάλα τμήματα του μνημείου, με μέγιστο σφάλμα 0.02 m.

Το Image Master έχει σχεδιαστεί για ακρίβεια προσανατολισμών 1 pixel ή και λιγότερο. Στη μέθοδο του αεροτριγωνισμού, η ακρίβεια είναι πιθανό να βελτιωθεί, χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά σημεία υψηλής ακρίβειας (αναλυτικότερα για ακρίβειες αεροτριγωνισμού βλ. Σημειώσεις Αεροτριγωνισμού, Γεωργόπουλος Α.).

Για την παραγωγή ορθοεικόνων, ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο παρήχθη μετά τη σάρωση του μνημείου με τον σαρωτή laser. Το μοντέλο αυτό, εισήχθη στο περιβάλλον του Image Master, όπου και πραγματοποιήθηκε η διαδικασία παραγωγής ορθοεικόνων. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας για κάθε ορθοφωτογραφία ορίσθηκε ίσο με 0.002 m, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε ακρίβεια και ευκρίνεια της προδιαγεγραμμένης κλίμακας 1:50 (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 3.3.1).

3.3.3 Συνοπτική παράθεση μεθοδολογίας της συγκεκριμένης γεωμετρικής τεκμηρίωσης

Η γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου των Σουλιωτισσών συμπεριλαμβάνει την παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκών των βασικών όψεων (ανατολικής, δυτικής και νότιας) και τρισδιάστατου φωτορεαλιστικού μοντέλου του μνημείου συμπληρωμένου με τα κυριότερα τμήματα που έχουν αποκολληθεί. Λόγω του σχήματος, του όγκου καθώς και της θέσης του, η γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου απαιτεί συνδυασμό σύγχρονων, τότε, φωτογραμμετρικών και τοπογραφικών μεθόδων με τεχνικές συλλογής τρισδιάστατων δεδομένων και από επίγειο σαρωτή laser. Η τοπογραφική μέθοδος παρέχει τα Γεωδαιτικά, Τοπογραφικά και Φωτογραμμετρικά δίκτυα εξάρτησης, η Φωτογραμμετρική μέθοδος, με την παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκών, δηλαδή ορθών προβολών του αντικειμένου σε εικόνες, αποτυπώνει τις απαραίτητες λεπτομέρειες ακόμα και σε απρόσιτα σημεία και παρέχει τα απαραίτητα στοιχεία για τον φωτορεαλισμό του τρισδιάστατου μοντέλου.

Η γνώση της κλίμακας των τελικών προϊόντων συμβάλλει στον καθορισμό της ακρίβειας συλλογής δεδομένων, η οποία κατ'επέκταση καθορίζει τις μεθόδους που θα εφαρμοστούν και τον εξοπλισμό συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων. Η κλίμακα των διαγραμμάτων ορθών προβολών των όψεων είναι 1:50, συνεπώς η απαιτούμενη ακρίβεια είναι 0.0125m, δεδομένου ότι η διακριτική ικανότητα του ματιού είναι 0.25mm. αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια και τα σφάλματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε κάθε στάδιο, μέχρι την δημιουργία των τελικών παραγώγων, θα πρέπει να είναι μικρότερα από την ακρίβεια αυτή. Η μεθοδολογία για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου των Σουλιωτισσών, περιλαμβάνει τα εξής στάδια.

Στάδιο 1^ο: Προγραμματισμός και προετοιμασία εργασιών. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο προγραμματισμός συλλογής δεδομένων, διότι οποιοδήποτε σφάλμα ή παράλειψη στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων θα επιφέρει λάθη και σφάλματα στα τελικά προϊόντα.

Στάδιο 2^ο: Συλλογή δεδομένων. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τη φωτογράφιση του μνημείου, τις τοπογραφικές μετρήσεις και τη σάρωση του μνημείου με το σαρωτή laser. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση (Μάιος 2008) εγκαταστάθηκε το βασικό πολυγωνομετρικό δίκτυο περίξ του μνημείου και πραγματοποιήθηκαν οι φωτογραμμετρικές λήψεις, οι γεωδαιτικές μετρήσεις και η σάρωση του μνημείου. Η δεύτερη φάση

πραγματοποιήθηκε λόγω ελλείψεων που παρουσιάστηκαν, κυρίως στα ψηλότερα τμήματα του μνημείου. Έγινε το Μάρτιο του 2009 και πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές φωτογραμμετρικές λήψεις και γεωδαιτικές μετρήσεις.

Για τις φωτογραμμετρικές λήψεις χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή CANON EOS MARK II 8MP με διαθέσιμους φακούς σταθερής εστιακής απόστασης: 24mm και 50mm και φακούς μεταβλητής εστιακής απόστασης: 16-35mm και 24-85mm. Ο τρόπος και η λογική των φωτογραμμετρικών λήψεων αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.3.1.

Για τις γεωδαιτικές μετρήσεις, επιλέχθηκαν τρεις ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί TOPCON GPT-3003LN, TOPCON GPT-7003i και PENTAX R323NX, ακρίβειας $\pm 5\text{mm}$ στη μέτρηση αποστάσεων χωρίς ανακλαστήρα και 10cc ή 3" στη μέτρηση γωνιών. Οι ακρίβειες αυτές ικανοποιούν τις ανάγκες ακρίβειας συλλογής δεδομένων των προδιαγραφών. Οι γεωδαιτικές μετρήσεις περιλαμβάνουν:

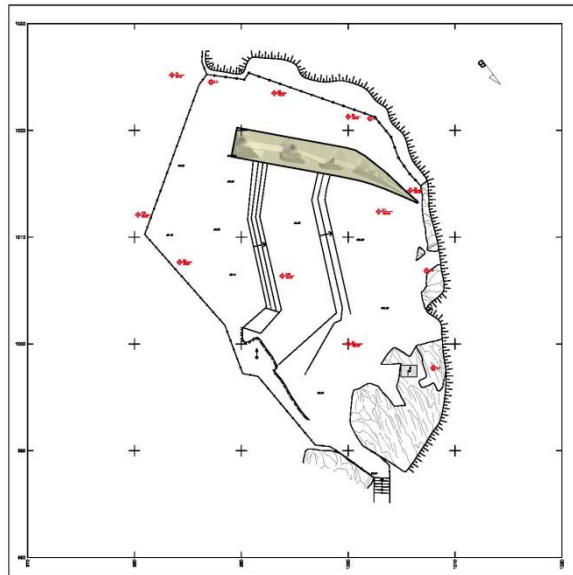
- ο ίδρυση πολυγωνομετρικού δικτύου, για τη σήμανση και μέτρηση σταθερών σημείων στο έδαφος, από τα οποία θα εξαρτηθούν οι υπόλοιπες γεωδαιτικές μετρήσεις
- ο ίδρυση αναλυτικού δικτύου, για τη μέτρηση σημείων που αφορούν τη σύνταξη των απαιτούμενων διαγραμμάτων, τις ανάγκες φωτογραμμετρικών μεθόδων και την επεξεργασία δεδομένων (ταχυμετρικά σημεία, σημεία τομής, σημεία λεπτομερειών, στόχοι για τις ανάγκες της σάρωσης, προσημασμένα και φυσικά φωτοσταθερά σημεία).

Για τη σάρωση χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος σαρωτής laser HDS 2500 της Leica, με οπτικό πεδίο $40^\circ \times 40^\circ$, ακτίνα δράσης 3-150m και ακρίβεια σημειακής μέτρησης $\pm 7\text{mm}$. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και βάσει των προδιαγραφών, το βήμα σάρωσης ορίστηκε να είναι 3cm σε κάθε σάρωση. Δεδομένου ότι κάθε μία από τις σαρώσεις που γίνονται έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέφους σε ένα διαφορετικό σύστημα αναφοράς, ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση και η μέτρηση ανακλαστικών στόχων, προκειμένου να είναι δυνατή η σύνδεση των δεδομένων από τις σαρώσεις.

Στάδιο 3^ο: Επεξεργασία δεδομένων. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει:

- ο επιλύσεις και συνορθώσεις των δικτύων σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Τα δίκτυα, που ιδρύθηκαν, επιλύθηκαν σε ενιαίο τοπικό σύστημα αναφοράς, στο λογισμικό TAXYMETRIA της Fotopo. Τα τυπικά σφάλματα ήταν της τάξης των 0.005m (αποδεκτά σύμφωνα με την ακρίβεια που πρέπει να επιτευχθεί). Σύμφωνα με τις συντεταγμένες του πολυγωνομετρικού δικτύου προσδιορίστηκαν στο τοπικό σύστημα αναφοράς και οι συντεταγμένες των σημείων του αναλυτικού δικτύου με επίλυση ταχυμετρίας.

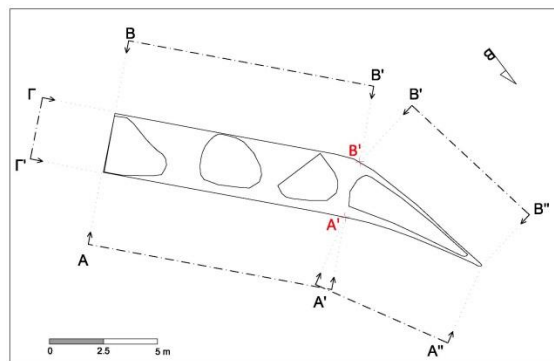
- ο παραγωγή του γενικού τοπογραφικού διαγράμματος. Η δημιουργία του έγινε στο πρόγραμμα AutoCad 2009 της Autodesk. Το τελικό διάγραμμα σχεδιάστηκε σε κλίμακα 1:100, όπου απεικονίζονται τα όρια της έκτασης στην οποία βρίσκεται το μνημείο των Σουλιωτισσών, ο προσανατολισμός του ως προς τον βορρά, το πολυγωνομετρικό δίκτυο που ιδρύθηκε, οι θέσεις σάρωσης, χαρακτηριστικά σημεία του περιβάλλοντα χώρου καθώς και υψομετρικά σημεία σε διάφορες θέσεις.



Εικόνα 3 - 24 : Γενικό τοπογραφικό διάγραμμα

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

- ο καθορισμός επιπέδων προβολής. Για την ορθή προβολή ενός αντικειμένου πρέπει να καθορισθεί το κατάλληλο επίπεδο προβολής στο οποίο θα υπάρχουν οι μικρότερες παραμορφώσεις. Λόγω του ακανόνιστου σχήματος που έχουν οι μορφές του μνημείου, τα επίπεδα προβολής που καθορίστηκαν είναι πέντε (2 ανατολικά, 2 δυτικά και 1 νότια).



Εικόνα 3 - 25: Επίπεδα προβολής μνημείου

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

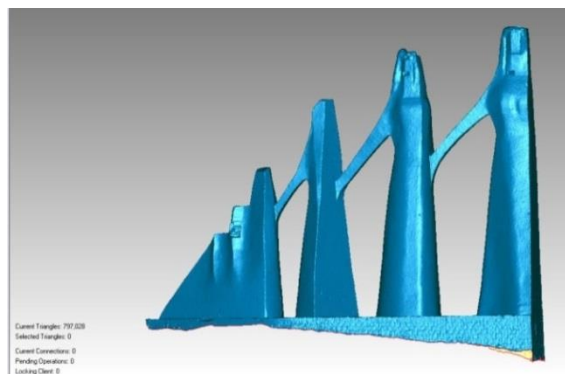
- ο παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκών. Για την παραγωγή των τελικών ορθών εικονιστικών προβολών (ορθοφωτομωσαϊκών) είναι απαραίτητη η δημιουργία ορθοεικόνων (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 3.3.2). Η τελική σύνθεση των ορθοφωτομωσαϊκών, σε ενιαία εικόνα, πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Adobe Photoshop CS3. Τα τελικά διαγράμματα όψεων περιλαμβάνουν τα ορθοφωτομωσαϊκά κάθε όψης του μνημείου και είναι κλίμακας 1:50.



Εικόνα 3 - 26 : Συνολικό διάγραμμα ορθοφωτομωσαϊκών

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

- ο επεξεργασία δεδομένων σάρωσης. Για τη συνένωση ορισμένων νεφών σημείων, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος (ICP: Iterative Closest Point), καθώς και ένας αλγόριθμος που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον MATLAB από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας. Στη συνέχεια, όλα τα νέφη εισήχθησαν σε μια ενιαία διαδικασία ευθυγράμμισης και συνόρθωσης μέσα από το λογισμικό Cyclone της Leica. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Geomagic Studio 7 της Raindrop Geomagic, όπου απομακρύνθηκε ο θόρυβος του νέφους και δημιουργήθηκε ένα ενιαίο νέφος ομοιόμορφης πυκνότητας. Στο πρόγραμμα αυτό, έγινε τέλος η παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας.

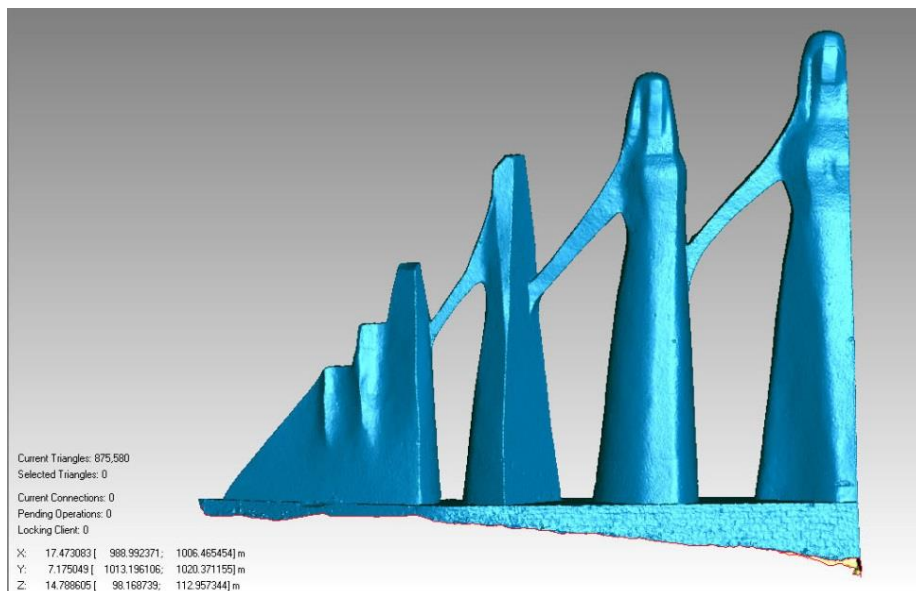


Εικόνα 3 - 27: Τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Στάδιο 4^ο: Δημιουργία της τρισδιάστατης επιφάνειας του μνημείου για την αποκατάσταση. Αυτό στο στάδιο περιλαμβάνει τις παρακάτω εργασίες:

- επεξεργασία δεδομένων για την αποκατάσταση του μνημείου. Για τις εργασίες αποκατάστασης συλλέχθηκαν φωτογραμμετρικά δεδομένα υψηλής ακρίβειας για τη λεπτομερή αποτύπωση των κεφαλών. Βάσει αυτών των δεδομένων και ακολουθώντας τις γραμμές αλλαγής κλίσης της επιφάνειας, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο από καμπύλες για τη μοντελοποίηση των κεφαλών. Μέσω του προγράμματος Rhinoceros δημιουργήθηκε η επιφάνεια του ανώτερου μέρους της κάθε κεφαλής, που παρουσίαζε πρόβλημα. Έπειτα, έγινε σάρωση των εκ νέου διαμορφωμένων μοντέλων των κεφαλών, τα οποία δημιουργήθηκαν από ειδικούς τεχνίτες σε κλίμακα 1:5.
- συγχώνευση αρχικού τρισδιάστατου μοντέλου με τα νέα μοντέλα κεφαλών.
- διαμόρφωση της τρισδιάστατης επιφάνειας σε περιοχές που έχουν υποστεί φθορές. Πέραν των κεφαλών, το μνημείο έχει υποστεί φθορές σε αρκετές περιοχές της πλευρικής του επιφάνειας. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τέτοια προβλήματα, η επιφάνεια είναι απαραίτητο να διαμορφωθεί από ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης. Στην περίπτωση αυτή, επιλέχθηκε το 3D Studio Max.



Εικόνα 3 - 28: Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας για το μνημείο μετά από τις εργασίες ηλεκτρονικής αποκατάστασης

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Στάδιο 5^ο: παραγωγή έγχρωμου φωτορεαλιστικού μοντέλου. Για την παραγωγή του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου με χρώμα, αρχικά δημιουργείται ένα πλέγμα επιφάνειας για την χρωματική επένδυση της επιφάνειας. Στη συνέχεια, προκειμένου να αποδοθεί χρώμα στην επιφάνεια του 3D μοντέλου, είναι απαραίτητη η δημιουργία αναπτυγμάτων της επιφάνειας κατά τμήματα του αντικειμένου. Τέλος, έγινε η σύνθεση των φωτομωσαϊκών αναπτυγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκαν τα τρισδιάστατα μοντέλα με χρώμα.



Εικόνα 3 - 29: Τελικό μοντέλο πριν τις εργασίες αποκατάστασης

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ



Εικόνα 3 - 30: Τελικό μοντέλο μετά τις εργασίες αποκατάστασης

Πηγή: Τεχνική έκθεση για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ

3.4 Διαθέσιμα δεδομένα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι να διερευνηθεί εάν υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης ιστορικών εικόνων τεκμηρίωσης με αυτόματες ψηφιακές μεθόδους. Η πρόκληση σε αυτήν την περίπτωση είναι η αντιμετώπιση των προβλημάτων που ενδεχομένως θα προκύψουν από τον διαφορετικό τρόπο λήψης των εικόνων για την παλαιότερη διαδικασία. Τα δεδομένα που δόθηκαν και ήταν χρήσιμα για τη συγκεκριμένη προσπάθεια ήταν:

- ✓ η τεχνική έκθεση που περιγράφει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε τότε
- ✓ οι εικόνες που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων και των δυο φάσεων, καθώς και ορισμένες γενικές εικόνες
- ✓ οι συντεταγμένες όλων των σημείων που μετρήθηκαν (φωτοσταθερών, χαρακτηριστικών σημείων, στάσεων)
- ✓ εικόνες-σκαριφήματα στα οποία απεικονίζονται οι θέσεις των φωτοσταθερών και των χαρακτηριστικών σημείων με την αντίστοιχη ονομασία τους
- ✓ η επιφάνεια που δημιουργήθηκε σε ψηφιακό αρχείο .wpr
- ✓ οι ορθοεικόνες-ορθοφωτομωσαϊκό

4. Αυτόματες ψηφιακές μέθοδοι

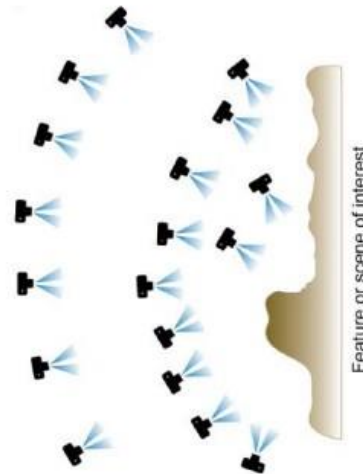
Καθώς η Φωτογραμμετρία εξελίσσεται και αυξάνουν οι ικανότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, δημιουργούνται νέες δυνατότητες επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων, ειδικότερα για το πεδίο της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων. Μια νέα δυνατότητα, είναι οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες φωτογραμμετρίας και κυρίως οι μέθοδοι «Structure From Motion – SfM»/ «Multi View Stereo – MVS», οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Η τεχνική SfM, επιτρέπει τον εντοπισμό και την τοποθέτηση σημείων στο χώρο μόνο με τη χρήση εικόνων, χωρίς καμία εμπλοκή γεωδαιτικού οργάνου. Αποτελεί την αυτοματοποιημένη εφαρμογή των κλασικών φωτογραμμετρικών διαδικασιών, δηλαδή του εσωτερικού, σχετικού προσανατολισμού και φωτοτριγωνισμού. Ουσιαστικά, η τεχνολογία SfM επιτρέπει την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από δισδιάστατες εικόνες.

Οι μέθοδοι SfM, αναφέρονται στην καταγραφή πολλών εικόνων για την απόδοση τρισδιάστατης επιφάνειας, με την ικανότητα να πετυχαίνουν υψηλότερο επίπεδο αυτοματισμού και μεγαλύτερη ευκολία στην χρήση. Ο στόχος της μεθόδου SfM είναι η ανακατασκευή της γεωμετρίας 3D σκηνών από ένα σύνολο εικόνων μιας στατικής σκηνής, συνδυάζοντας κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των εικόνων (Mancini et al. 2013).

Η προσέγγιση της μεθόδου SfM (δομή από κίνηση) στοχεύει στην εκτίμηση της 3D γεωμετρίας ενός αντικειμένου και της θέσης της κάμερας. Η χρήση ομόλογων σημείων με σωστή κατανομή, η χρήση ίδιας φωτομηχανής με γνωστή την εσωτερική της γεωμετρία δεν αποτελούν πλέον απαραίτητες προϋποθέσεις. Στην περίπτωση των αυτοματοποιημένων μεθόδων για τη δημιουργία 3D μοντέλου ενός αντικειμένου, δεν απαιτείται η γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής αλλά και ούτε και της σχετικής γεωμετρίας των εικόνων στον χώρο.

Η μέθοδος SfM περιλαμβάνει μια διαδικασία, όπου βρίσκει και ταιριάζει αυτόματα περιορισμένο αριθμό κοινών χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ εικόνων, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν τόσο οι παράμετροι του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού προσανατολισμού. Στη συνέχεια εξάγει ένα, υψηλής ακρίβειας και με χρώμα, νέφος σημείων (point cloud) με τη μέθοδο MVS. Οι εικόνες που υπόκεινται σε επεξεργασία με τη μέθοδο αυτή, δεν χρειάζεται να έχουν αποκτηθεί από την ίδια απόσταση ή να έχουν την ίδια κλίμακα (Micheletti et al. 2015). Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνονται πολλαπλές εικόνες, οι οποίες καλύπτουν ολόκληρο το αντικείμενο και έπειτα να ληφθούν εικόνες από πιο κοντά, προκειμένου να αποτυπωθούν όλες οι λεπτομέρειες, για την ακρίβεια που απαιτείται. Αυτό είναι σημαντικό όταν υπάρχουν εμπόδια μπροστά από το προς μελέτη αντικείμενο. Είναι σημαντικό να αποκτώνται εικόνες από όσο το δυνατόν

περισσότερες και διαφορετικές θέσεις. Ο ακριβής αριθμός των εικόνων εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, την ύπαρξη ή μη εμποδίων, καθώς και την κλίμακα που απαιτείται (Micheletti et al. 2015).



Εικόνα 4 - 1: Παράδειγμα φωτογράφισης αντικειμένου.

Πηγή : *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry*(Micheletti et al. 2015)

Σε αντίθεση με τις κλασσικές μεθόδους φωτογραμμετρίας, η μέθοδος SfM δεν απαιτεί τη χρήση φωτοσταθερών σημείων (GCPs) ή δεδομένων GPS/INS (Ιωαννίδης 2016). Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια, που προκύπτει, δεν έχει κλίμακα, και δεν σχετίζεται με κάποιο εγκατεστημένο σύστημα συντεταγμένων (Micheletti et al. 2015).

Η τεχνική (SfM), έχει ως δεδομένα εισόδου εικόνες γνωστού ή αγνώστου εσωτερικού προσανατολισμού, ενώ προαιρετική είναι η γνώση φωτοσταθερών ή σημείων από GPS/INS, όπως προαναφέρθηκε. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής είναι η θέση και ο προσανατολισμός όλων των εικόνων (σχετικός προσανατολισμός), ο εσωτερικός προσανατολισμός της φωτομηχανής (σε περίπτωση μη βαθμονομημένων μηχανών), το αραιό και πυκνό τρισδιάστατο νέφος σημείων (Ιωαννίδης 2016).

Τα βασικά βήματα της μεθόδου SfM για τη δημιουργία 3D ανακατασκευής, είναι:

- i. Ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων με πληθώρα αλγορίθμων, όπως SIFT, SURF κτλ. Αυτόματη ανίχνευση και περιγραφή χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε εικόνα, έτσι ώστε να είναι αμετάβλητα σε μετασχηματισμούς κλίμακας, στροφής, φωτισμού, αντίθεσης (αναλυτικότερα βλ. Ιωαννίδης 2016, Snavely et al. 2007).
- ii. Συνταύτιση σημείων. Αυτόματη εύρεση των ομόλογων σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ όλων των πιθανών ζευγών εικόνων. Κριτήριο συνταύτισης: απόσταση των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών των σημείων ενδιαφέροντος. Μετά την εξαγωγή ομόλογων σημείων, για τη μείωση θορύβου (ελαχιστοποίηση outliers) χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι όπως ο RANSAC. (αναλυτικότερα βλ. Ιωαννίδης 2016, Snavely et al. 2007).
- iii. Δημιουργία 3D δομής, όπου λαμβάνονται υπόψιν οι συντεταγμένες των ομόλογων σημείων, η θέση της φωτογραφικής μηχανής στο χώρο για κάθε μια εικόνα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το αραιό νέφος σημείων.
- iv. Εφαρμογή πυκνής πολυεικονικής στερεοσκοπικής συνταύτισης (MVS), απ' όπου προκύπτει το πυκνό νέφος σημείων.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε αρκετά προγράμματα αυτόματα. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι και το Metashape, (πρώην Photoscan) της Agisoft, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στη συγκεκριμένη διπλωματική.

4.1 Το λογισμικό Agisoft Metashape

Το Agisoft Metashape είναι ένα ψηφιακό πρόγραμμα φωτογραμμετρίας που έχει ως στόχο τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων του πραγματικού κόσμου, μέσω της ψηφιοποίησης κοινών σημείων σε εικόνες, οι οποίες λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις. Οι διαδικασίες προσανατολισμού των εικόνων και δημιουργίας 3D μοντέλου είναι αυτοματοποιημένες. Παρέχει επίσης την δυνατότητα παραγωγής ορθοφωτομωσαϊκού, DEM και άλλων σχετικών παραγώγων.

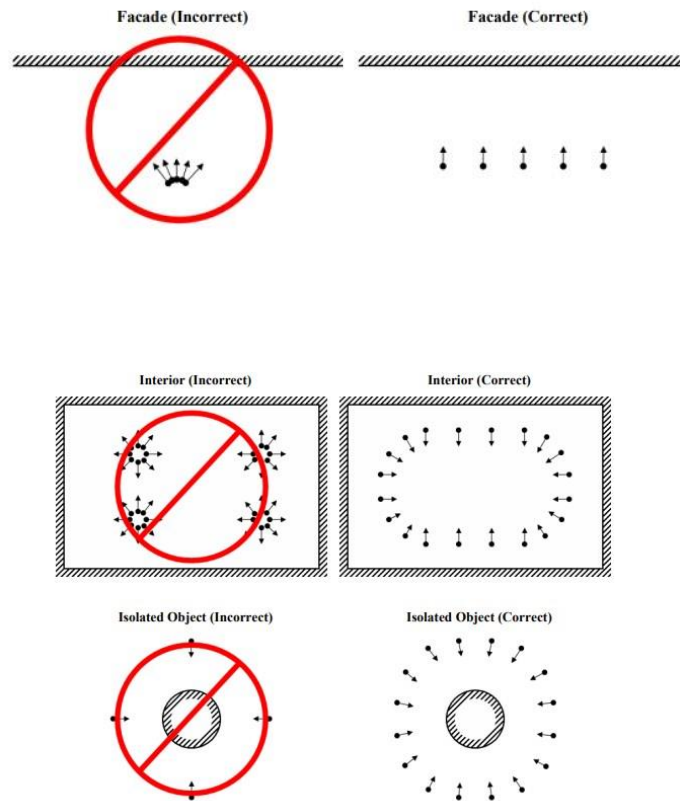
Το λογισμικό του Metashape δέχεται ως δεδομένα εικόνες που εισάγει ο χρήστης. Ωστόσο, οι εικόνες αυτές, πρέπει να τηρούν ορισμένες προϋποθέσεις, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα από το πρόγραμμα να τις επεξεργαστεί κατάλληλα.

Καλύτερα αποτελέσματα παράγονται, εάν οι λήψεις των εικόνων είναι όσο το δυνατόν πιο μετωπικές στο αντικείμενο καθώς επίσης εάν υπάρχουν μεγάλες επικαλύψεις μεταξύ των εικόνων.

Οι εικόνες μπορούν να ληφθούν από οποιαδήποτε ψηφιακή μηχανή, εφόσον ακολουθούνται συγκεκριμένες οδηγίες λήψης.

Αρχές για τη λήψη και επιλογή κατάλληλων εικόνων για την ανακατασκευή 3D μοντέλου όπως τις προτείνει το λογισμικό:

- Στην περίπτωση που υπάρχουν λαμπερά αντικείμενα, οι λήψεις τους να γίνουν με κατάλληλο φωτισμό, προκειμένου να αποφεύγονται οι αντανakλάσεις
- Αποφυγή χρήσης flash
- Το λογισμικό λειτουργεί με τις αρχικές εικόνες. Δε χρειάζεται να κοπούν ή να μετασχηματιστούν γεωμετρικά
- Οι εικόνες πρέπει να έχουν μεταξύ τους μεγάλες επικαλύψεις
- Η λήψη των εικόνων πρέπει να γίνει από πολλές, διαφορετικές οπτικές γωνίες



Εικόνα 4 - 2: Σωστοί τρόποι λήψης εικόνων

Πηγή: Agisoft Metashape Manual

Οι προσανατολισμοί των εικόνων και η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου είναι πλήρως αυτοματοποιημένες. Το λογισμικό χρησιμοποιεί την τεχνική Structure from Motion (SfM), στην οποία εντοπίζονται συσχετιζόμενα σημεία μεταξύ επικαλυπτόμενων δισδιάστατων εικόνων και αυτά τα σημεία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να υπολογιστεί η σχετική θέση και ο προσανατολισμός της φωτογραφικής μηχανής τη στιγμή της λήψης της εικόνας.

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται γενικά για τη δημιουργία ορθοεικόνων ή τρισδιάστατων μοντέλων με τη χρήση του Agisoft Metashape είναι οι εξής:

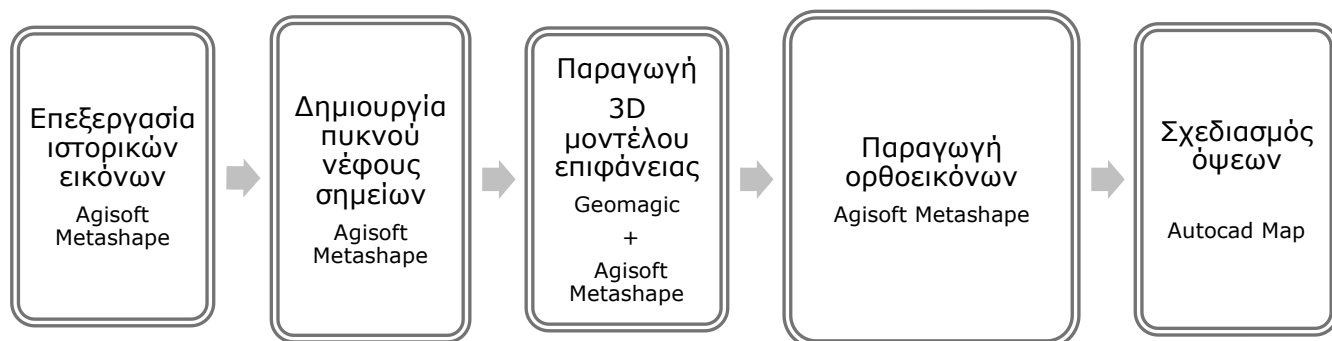
- ❖ Το πρώτο στάδιο ονομάζεται alignment. Στο στάδιο αυτό, το λογισμικό αναζητά κοινά σημεία ανάμεσα στις εικόνες, τα ταιριάζει και εντοπίζει τη θέση της φωτογραφικής μηχανής στο χώρο. Το αποτέλεσμα είναι ένα αραιό νέφος σημείων καθώς και το σύνολο των θέσεων των φωτομηχανών τη στιγμή των λήψεων. Επίσης, είναι δυνατό να καθοριστούν και να τοποθετηθούν φωτοσταθερά σημεία στις εικόνες για τη γεωαναφορά του νέφους.
- ❖ Το δεύτερο στάδιο αφορά στη δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (dense cloud). Μετά την επίτευξη του σωστού προσανατολισμού του αντικειμένου από το προηγούμενο στάδιο, σειρά έχει η δημιουργία πυκνού νέφους σημείων, το οποίο βασίζεται στις προσανατολισμένες εικόνες και στις εκτιμώμενες θέσεις της κάμερας.
- ❖ Στο τρίτο στάδιο δημιουργείται το μοντέλο επιφάνειας (mesh) με βάση είτε το νέφος σημείων (αραιό, πυκνό ή οποιοδήποτε άλλο που έχει δημιουργηθεί σε άλλο πρόγραμμα), είτε τους χάρτες βάθους. Σε αυτό το βήμα, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί διάφορους αλγόριθμους επεξεργασίας, για τη σύσταση τριγωνικών και πολυγωνικών επιφανειών, που συνθέτουν ένα μοντέλο TIN.
- ❖ Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επένδυσης του μοντέλου επιφάνειας με υφή από τις εικόνες.
- ❖ Τέλος, μπορεί να δημιουργηθεί ορθοφωτομωσαϊκό, με βάση το μοντέλο επιφάνειας που δημιουργήθηκε, καθορίζοντας παράλληλα τα επίπεδα προβολής που απαιτούνται κάθε φορά.
(Agisoft Metashape Manual).

Γενικότερα, το πρόγραμμα Agisoft Metashape, λόγω των αυτοματοποιημένων διαδικασιών που πραγματοποιεί, δεν δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει κατά τη διάρκεια αυτών. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές επιλογές σε παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν σημαντικά το αποτέλεσμα.

4.2 Εφαρμογή αυτόματων μεθόδων σε ιστορικές εικόνες τεκμηρίωσης

Στην παρούσα διπλωματική, διερευνάται το κατά πόσο είναι εφικτή η μετρητική αξιοποίηση ιστορικών εικόνων τεκμηρίωσης με αυτόματες ψηφιακές μεθόδους. Ειδικότερα, θα δημιουργηθούν το τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας, καθώς και ορθοεικόνες του μνημείου των Σουλιωτισσών, χρησιμοποιώντας εικόνες που είχαν παρθεί παλιότερα (2008-2009) και αξιοποιήθηκαν με παραδοσιακές μεθόδους φωτογραμμετρίας (αναγωγή και στερεοσκοπική φωτογραμμετρία).

Τα στάδια επεξεργασίας των ιστορικών εικόνων και η παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας, παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα, ενώ αναλυτικές πληροφορίες των εργασιών αυτών παρατίθενται στα επόμενα υποκεφάλαια.



Εικόνα 4 -3: Στάδιο επεξεργασίας ιστορικών εικόνων και παραγωγής τελικών παραγώγων

4.2.1 Επεξεργασία ιστορικών εικόνων - Agisoft Metashape

Στην αρχή, πραγματοποιείται παρατήρηση των ιστορικών εικόνων που δόθηκαν ως αρχικά δεδομένα. Έπειτα από τη διαδικασία διαλογής των εικόνων, οι επιλεγμένες εικόνες εισάγονται στο Metashape. Πραγματοποιήθηκε ένας αρχικός συνολικός προσανατολισμός, με ακρίβεια high, χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών. Το αποτέλεσμα ήταν να προσανατολιστούν λίγες εικόνες (από τις συνολικά 233 μόλις οι 46). Το λογισμικό φάνηκε να αδυνατεί να εντοπίσει ομόλογα σημεία μεταξύ όλων των εικόνων. Αυτό συνέβη, διότι οι λήψεις των εικόνων αυτών έχουν γίνει με διαφορετικές εστιακές αποστάσεις και αποστάσεις λήψης. Επίσης, οι εικόνες που εισηχθησαν είναι διαφορετικές μεταξύ τους (είτε πολύ μακρινές, είτε πολύ κοντινές), δείχνοντας διαφορετικά τμήματα του μνημείου, με συνέπεια οι επικαλύψεις μεταξύ τους να είναι είτε μηδενικές είτε ελάχιστες για τις δυνατότητες του συγκεκριμένου προγράμματος. Ακόμη, οι εικόνες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στη φωτεινότητά τους, κάτι που επίσης, εμποδίζει το πρόγραμμα από την εύρεση σωστών ομόλογων σημείων.



Εικόνα 4 - 4: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Επομένως, αποφασίστηκε να χωριστούν οι εικόνες σε διαφορετικές ομάδες (chunks), ανάλογα με τα τμήματα του μνημείου που απεικονίζει το καθένα. Επιπρόσθετα, αποφασίστηκε να μειωθεί η ακρίβεια του προσανατολισμού, από high

να γίνει medium για όλα τα chunks. Η υψηλότερη ακρίβεια οδηγεί στην ακριβέστερη εκτίμηση των θέσεων της κάμερας αλλά σε περισσότερο χρόνο σε σχέση με την επιλογή χαμηλότερης ακρίβειας. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του Agisoft Metashape, η ακρίβεια high χρησιμοποιεί την εικόνα σε πλήρη ανάλυση, ενώ επιλέγοντας μικρότερη ακρίβεια, πχ medium ή low, το λογισμικό μεγαλώνει το pixel size και χρησιμοποιεί την εικόνα σε μικρότερη ανάλυση. Η υψηλή ακρίβεια προτείνεται μόνο για αρκετά ευκρινείς εικόνες. Οπότε, στην περίπτωση των εικόνων της εργασίας αυτής (εικόνες μακρινές, μη κατάλληλες για την επεξεργασία τους στο Metashape), η ακρίβεια medium θα δώσει ικανοποιητικά και πιο γρήγορα αποτελέσματα. Τέλος, σκοπός είναι η συνένωση όλων των chunks και η δημιουργία ενός ολικού, το οποίο θα περιέχει όλες τις εικόνες που χρειάζονται για τη δημιουργία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας.

Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν 7 διαφορετικά chunks.

- ❖ Chunk 1: Περιλαμβάνει όλες τις μακρινές εικόνες, που λήφθηκαν κατά την πρώτη φάση της συλλογής δεδομένων. Οι εικόνες αυτές απεικονίζουν ολόκληρες τις μορφές, καθώς και το βάθρο, όπως φαίνονται στη δυτική, ανατολική και νότια όψη. Σύνολο εικόνων 89.

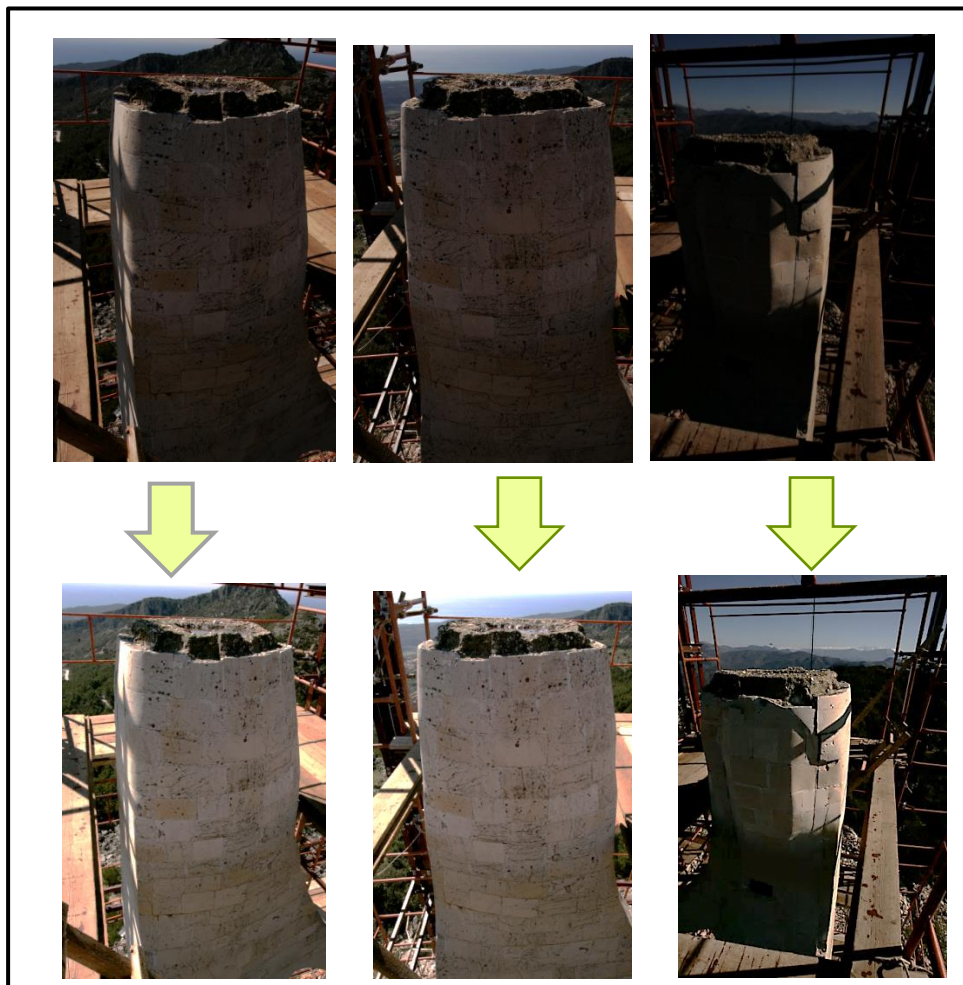


Εικόνα 4 - 5: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Τα υπόλοιπα chunks περιλαμβάνουν τις κοντινές εικόνες που λήφθηκαν, κατά τη δεύτερη φάση συλλογής δεδομένων, πάνω από τις σκαλωσιές που τοποθετήθηκαν στο μεταξύ. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αρχικές-δοσμένες εικόνες κάθε chunk με την πραγματική τους φωτεινότητα, καθώς και με αυξημένη τη φωτεινότητά τους, προκειμένου να γίνει αντιληπτό στον αναγνώστη το τμήμα του μνημείου που απεικονίζεται κάθε φορά.

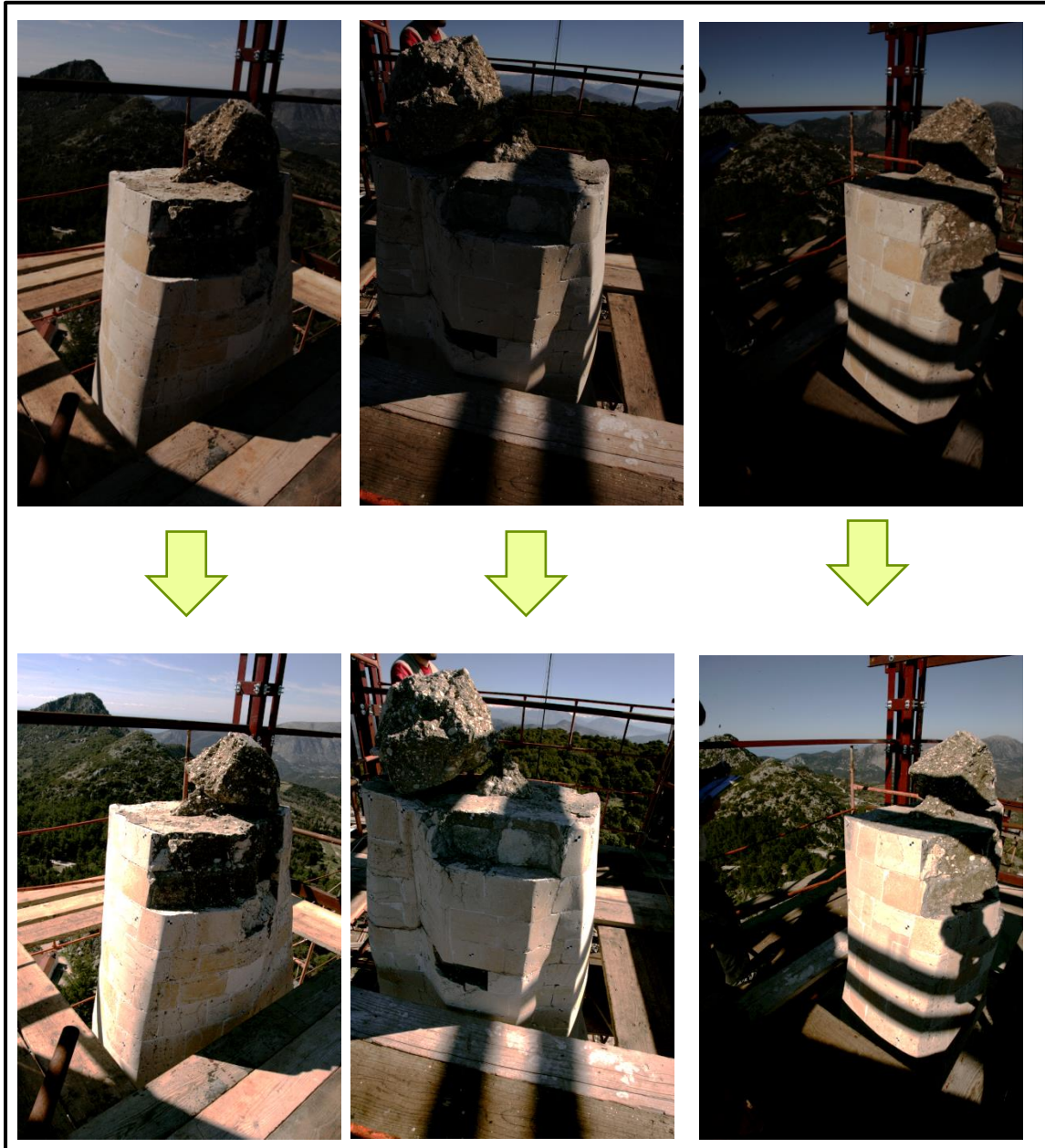
- ❖ Chunk 2: Περιλαμβάνει τις εικόνες του κεφαλιού της πρώτης μορφής. Σύνολο εικόνων 24.



Εικόνα 4 - 6: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

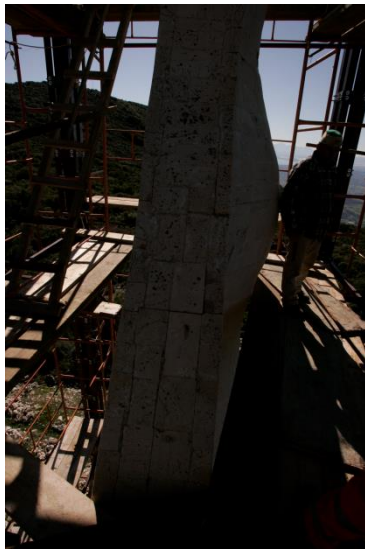
- ❖ Chunk_3: Περιλαμβάνει τις εικόνες του κεφαλιού της δεύτερης μορφής, όπως αυτό απεικονίζεται τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική όψη. Σύνολο εικόνων 30.



Εικόνα 4 - 7: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

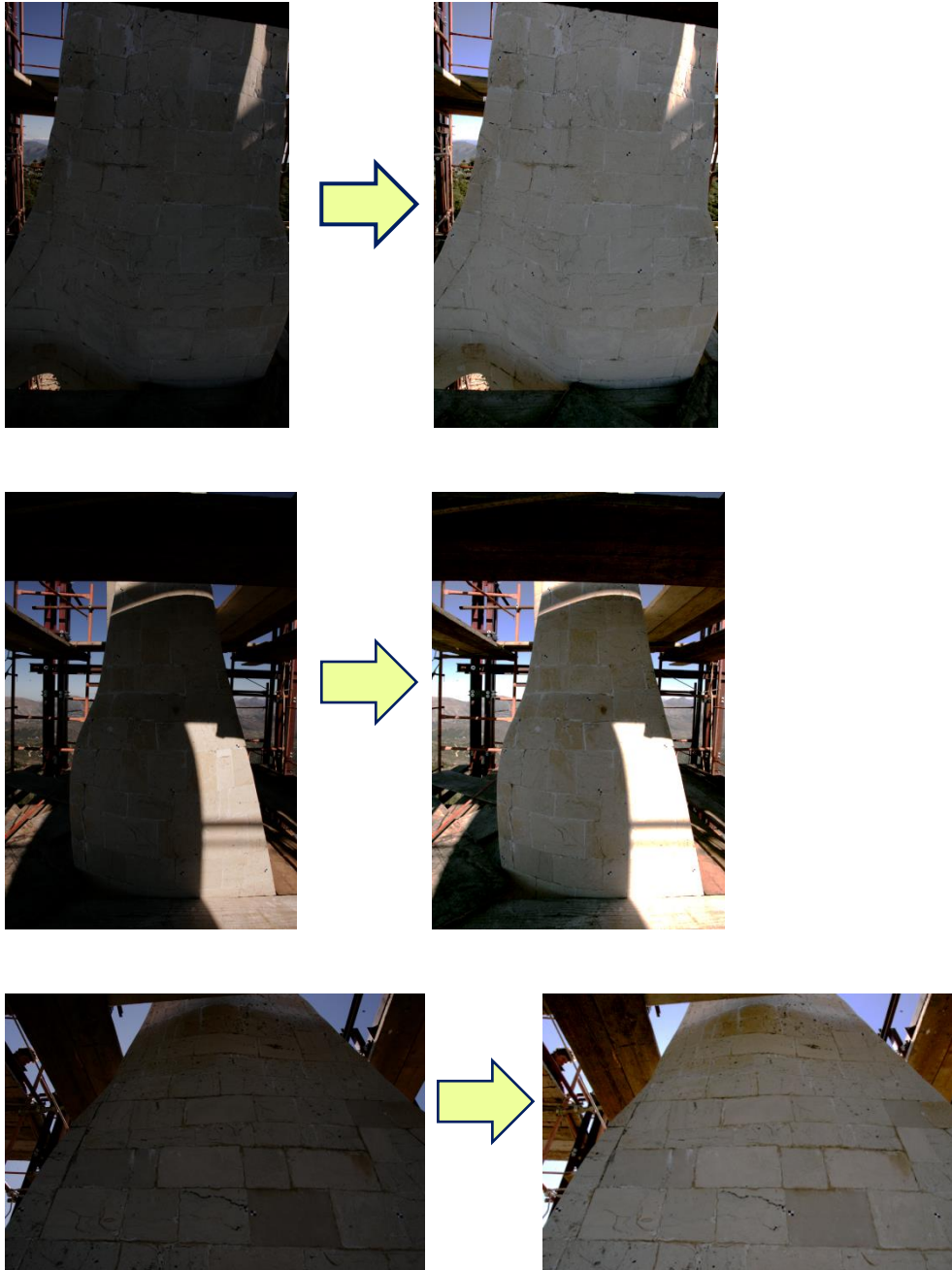
- ❖ Chunk 4: Περιλαμβάνει τις εικόνες του πάνω μέρους του χεριού της πρώτης μορφής. Σύνολο εικόνων 6.



Εικόνα 4 - 8: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

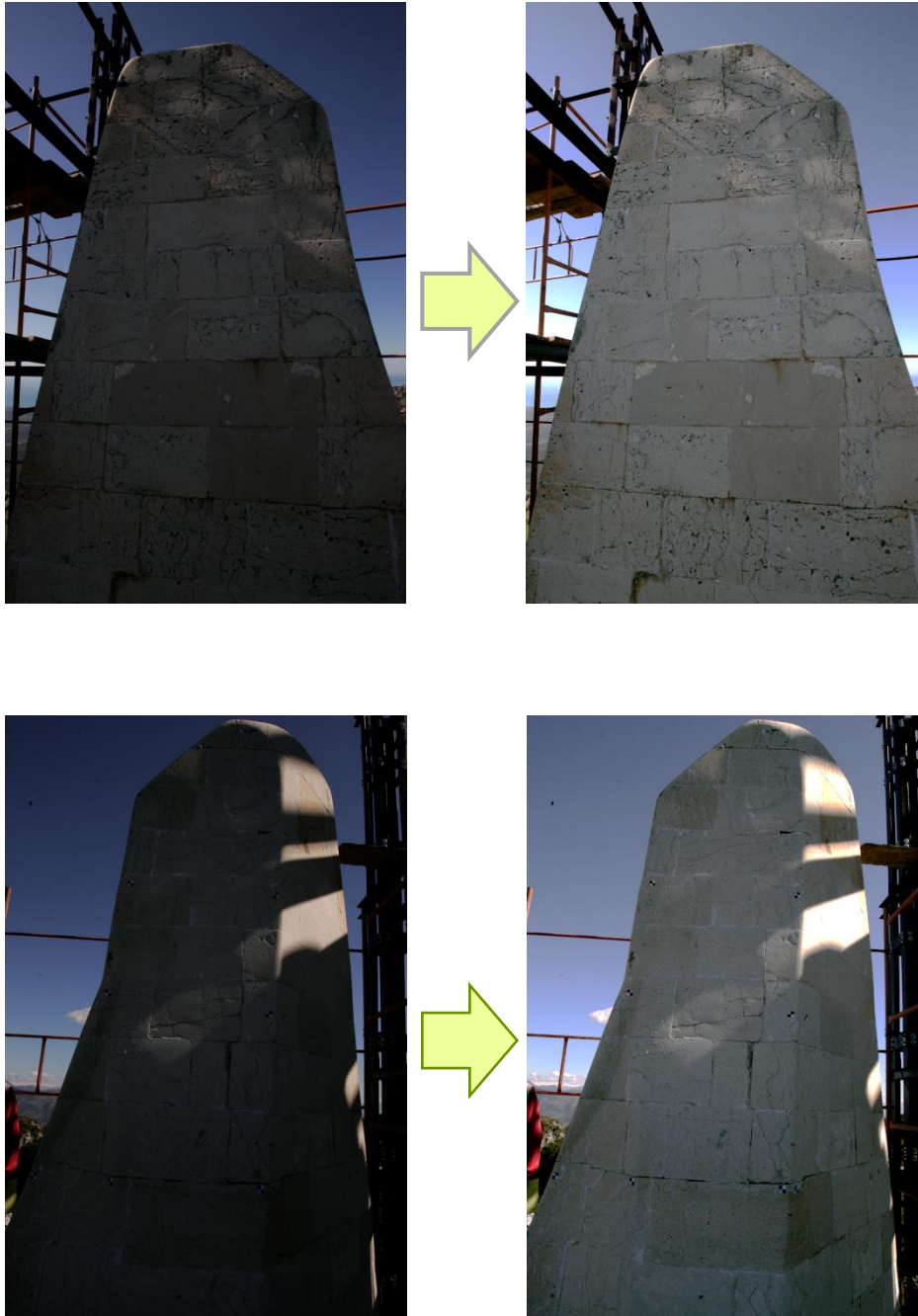
- ❖ Chunk 5: Περιλαμβάνει τις εικόνες του πάνω μέρους του κορμού της δεύτερης μορφής, όπως αυτό απεικονίζεται τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική όψη. Σύνολο εικόνων 44.



Εικόνα 4 - 9: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

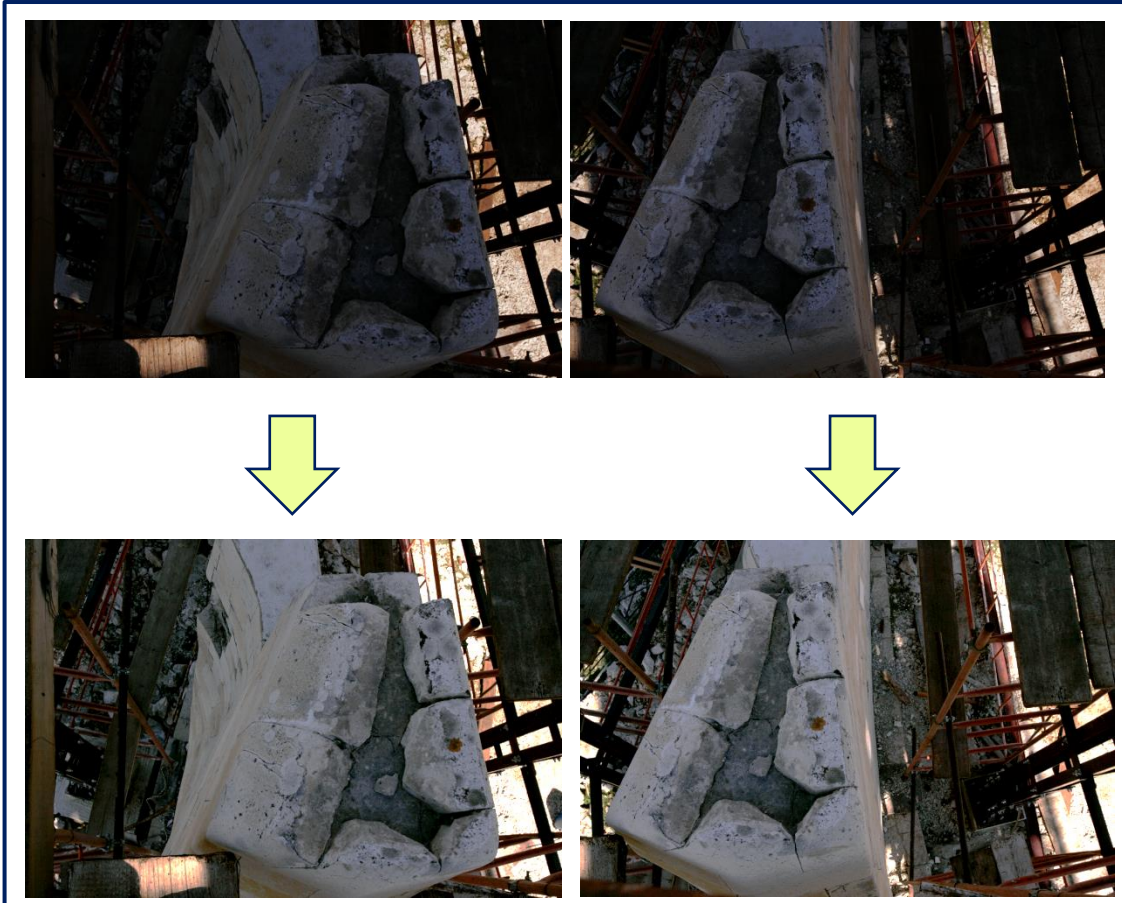
- ❖ Chunk 6: Περιλαμβάνει τις εικόνες ολόκληρου του πάνω μέρους της τρίτης μορφής, όπως αυτό απεικονίζεται τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική όψη. Σύνολο εικόνων 33.



Εικόνα 4 - 10: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

- ❖ Chunk 7: Περιλαμβάνει τις εικόνες του πάνω μέρους του κεφαλιού της τέταρτης μορφής. Σύνολο εικόνων 5.



Εικόνα 4 - 11: Ενδεικτικές εικόνες μνημείου Ζαλόγγου

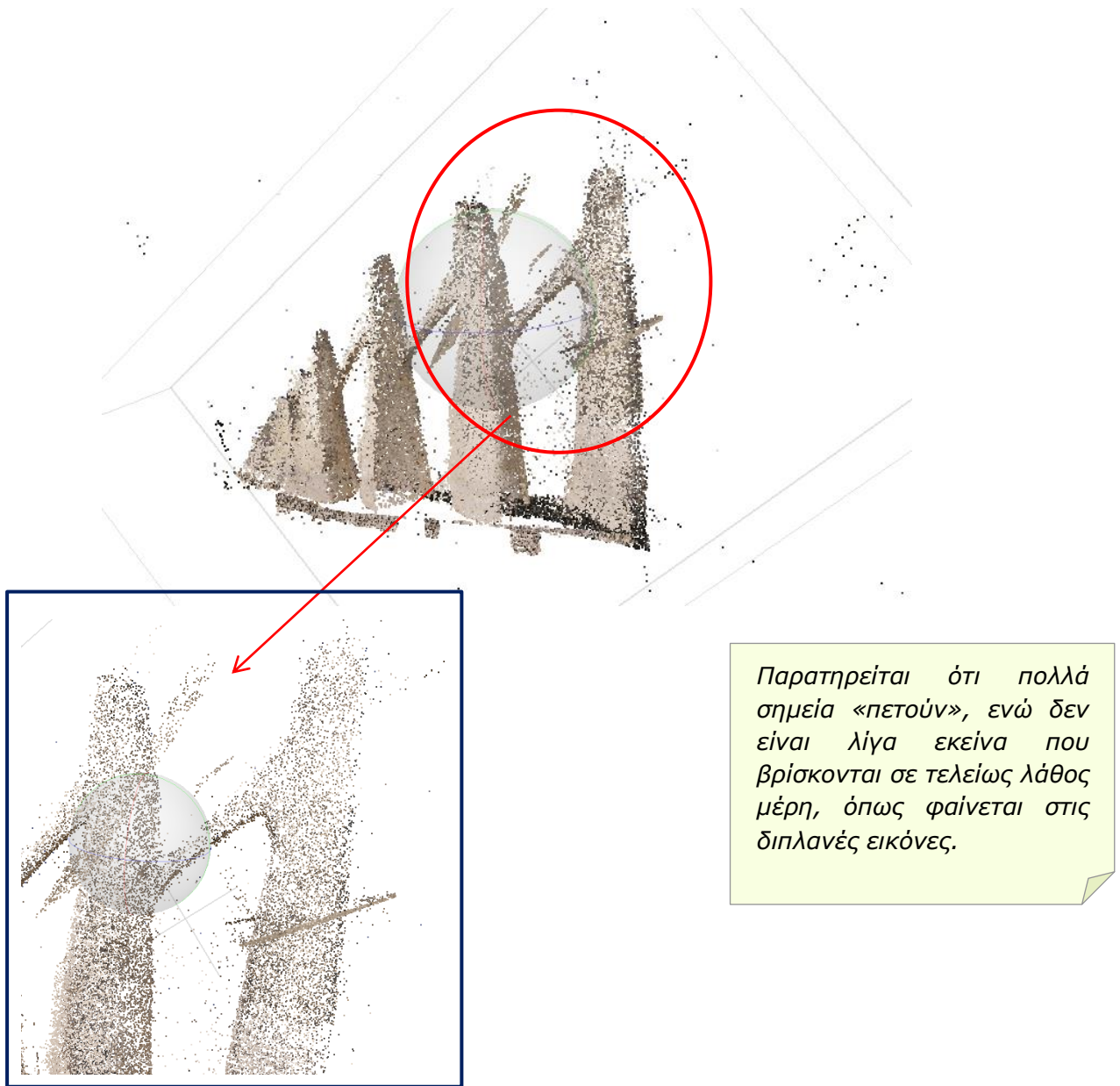
Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΕΜΠ

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε προσανατολισμός σε κάθε ομάδα εικόνων ξεχωριστά, με ακρίβεια medium, χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών. Αυτό έγινε, προκειμένου να γίνει ένας πρώτος προσανατολισμός των εικόνων και να είναι πιο εύκολη η μετέπειτα διαδικασία τοποθέτησης και σκόπευσης φωτοσταθερών. Ύστερα, έγινε εισαγωγή των συντεταγμένων των σημείων (φωτοσταθερών) και έγινε η σκόπευσή τους. Όσον αφορά τη διάταξη των φωτοσταθερών, αυτά θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, για να μειωθούν τυχόν σφάλματα στον προσανατολισμό και στην κλίμακα του στερεομοντέλου. Τα φωτοσταθερά πρέπει να επισημαίνονται σε τουλάχιστον δύο εικόνες για να είναι εφικτός ο υπολογισμός του σφάλματος θέσης τους (το λογισμικό χρειάζεται δυο ομόλογες ακτίνες για τον προσδιορισμό ενός σημείου στο χώρο). Ωστόσο, όσο αυξάνεται ο αριθμός των εικόνων, στις οποίες επισημαίνονται τα φωτοσταθερά, τόσο καλύτερα θα είναι τα τελικά αποτελέσματα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του alignment για κάθε chunk.

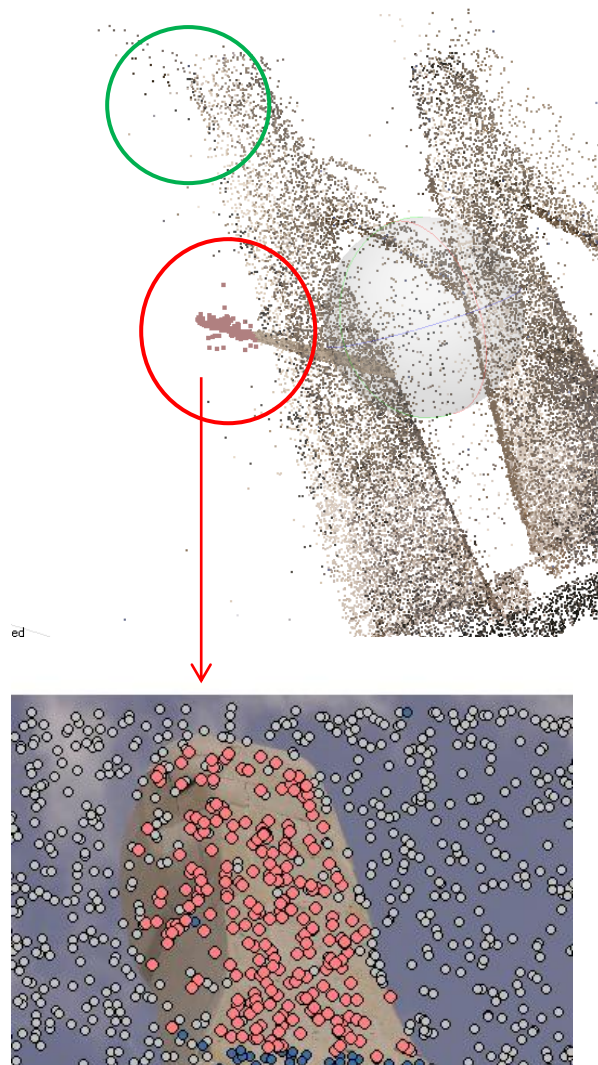
❖ **Chunk 1:**

Αφού σκοπεύθηκαν προσεκτικά όλα τα φωτοσταθερά σημεία σε όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες, έγινε το align.



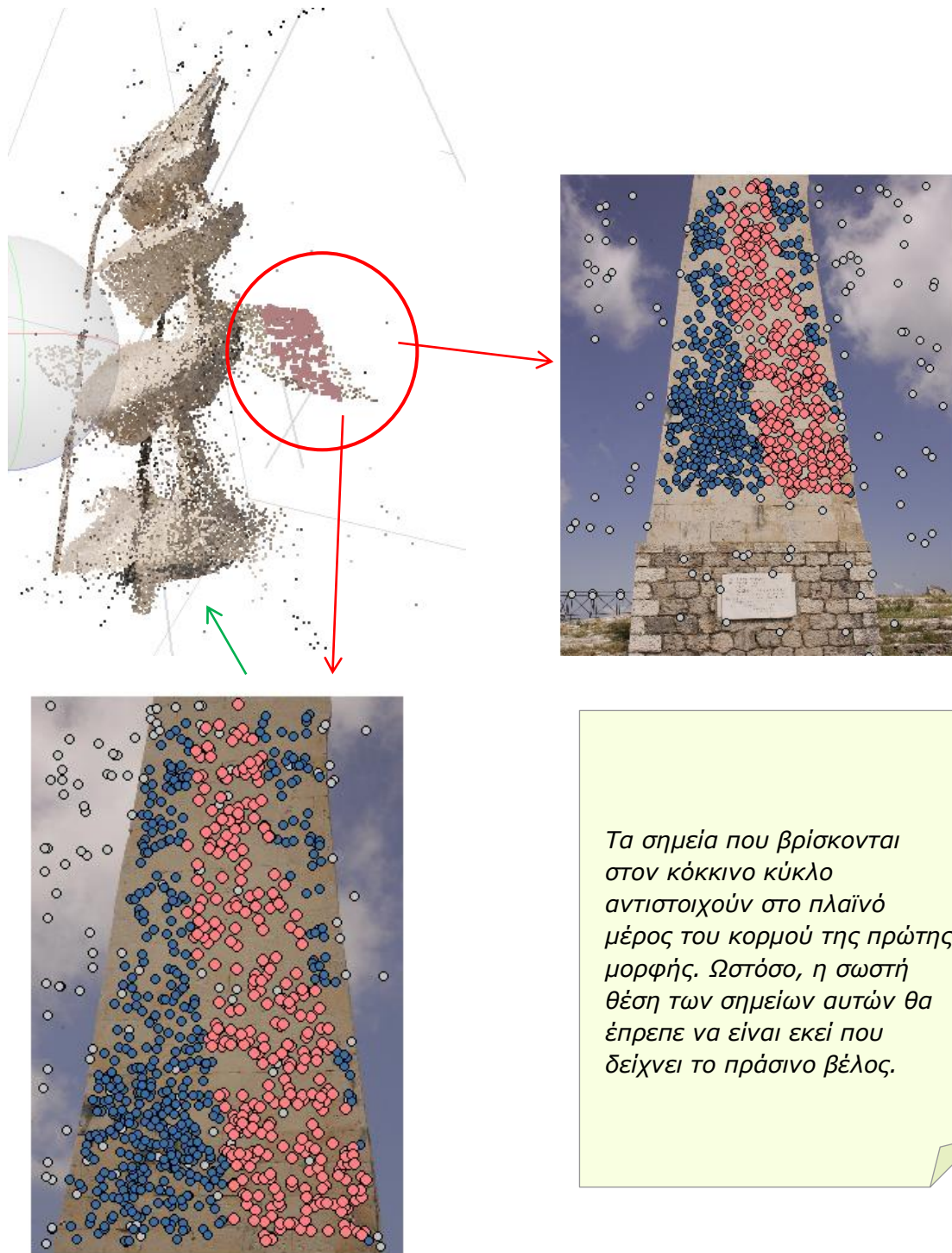
Εικόνα 4 - 12: Αρχικό alignment του chunk 1

Εντοπίζεται ότι στο αραιό νέφος σημείων, που έχει δημιουργηθεί, υπάρχουν πολλά προβλήματα. Το σχήμα του δεν είναι σωστό. Για αυτό το λόγο, γίνεται διερεύνηση για το ποιές εικόνες έχουν προσανατολιστεί λάθος, προκειμένου να διορθωθεί ο προσανατολισμός τους με τη χρήση φωτοσταθερών ή άλλων χαρακτηριστικών σημείων.



Τα σημεία που βρίσκονται στον κόκκινο κύκλο αντιστοιχούν στο πλαϊνό μέρος του κεφαλιού της πρώτης μορφής. Η σωστή θέση τους απεικονίζεται με πράσινο κύκλο.

Εικόνα 4 - 13: Προβλήματα του alignment στο chunk 1



Εικόνα 4 - 14: Προβλήματα του alignment στο chunk 1

Τα σημεία, στα οποία εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα, είναι κυρίως αυτά της νότιας όψης, δεδομένου ότι εκεί δεν υπάρχει επαρκής αριθμός εικόνων. Υπάρχει μόνο μια εικόνα για κάθε κομμάτι της, αφού στην προηγούμενη επεξεργασία, είχε πραγματοποιηθεί η μέθοδος της φωτογραμμετρικής αναγωγής (βλ. Κεφάλαιο 3.3.2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία του λογισμικού να εντοπίσει ομόλογα σημεία και να προσανατολίσει σωστά τις εικόνες.

Αυτά είναι τα βασικότερα προβλήματα. Ωστόσο, πολλά είναι τα σημεία που «πετούν» και σε άλλα μέρη του μνημείου, κυρίως στα ψηλότερα σημεία, κεφάλια των μορφών, καθώς και στα πλαϊνά των κορμών τους. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη κλίση στις λήψεις των εικόνων αυτών και καθόλου μετωπικές φωτογραφίες. Επίσης, οι επικαλύψεις μεταξύ των εικόνων δεν ήταν επαρκείς. Για αυτό το λόγο, χρειάστηκε να σκοπευθούν και άλλα σημεία. Ειδικότερα, έγιναν σκοπεύσεις ορισμένων χαρακτηριστικών σημείων, που δόθηκαν και ήταν διακριτά στις εικόνες, χωρίς όμως τη χρήση των συντεταγμένων τους, διότι ήταν αδύνατο να εντοπιστούν οι ακριβείς θέσεις τους πάνω σε αυτές. Επίσης, τοποθετήθηκαν και άλλα νέα σημεία σε μέρη του μνημείου που παρουσίαζαν σοβαρά προβλήματα, προκειμένου να δημιουργηθεί το σωστό σχήμα του νέφους. Το αποτέλεσμα ενός νέου align παρουσιάζεται παρακάτω:



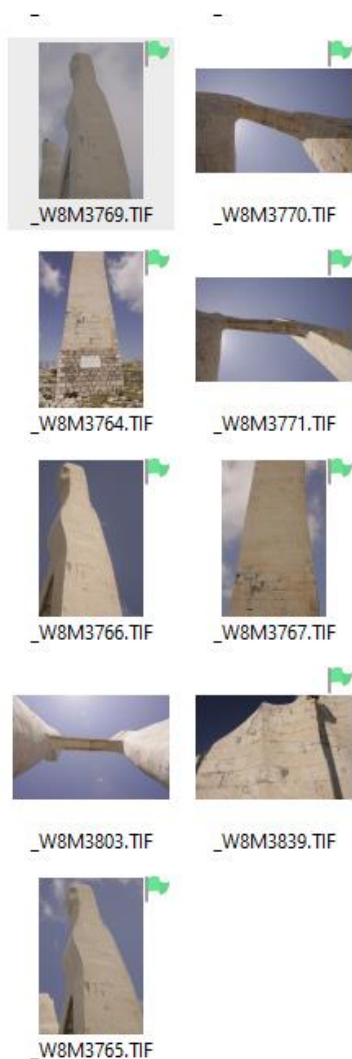
Εικόνα 4 - 15: Προβλήματα του alignment στο chunk 1

Επίσης, για τη δημιουργία πιο «καθαρού» νέφους, δηλαδή χωρίς πληροφορία από ουρανό και περιβάλλοντα χώρο, αποφασίστηκε να τοποθετηθούν μάσκες σε όλες τις εικόνες. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 4 - 17: Τελικό αραιό νέφος του chunk 1

Από τις 89 εικόνες τελικά προσανατολίστηκαν οι 80. Οι υπόλοιπες 9, φαίνεται παρακάτω ότι απεικονίζουν συγκεκριμένα τμήματα του μνημείου, χωρίς να απεικονίζεται μεγαλύτερο μέρος αυτού, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη έως αδύνατη η συσχέτισή τους με τις υπόλοιπες. Επίσης, είναι λίγες οι εικόνες των συγκεκριμένων τμημάτων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αρκετές επικαλύψεις, οι οποίες θα βοηθούσαν το πρόγραμμα να εντοπίσει ομόλογα σημεία.



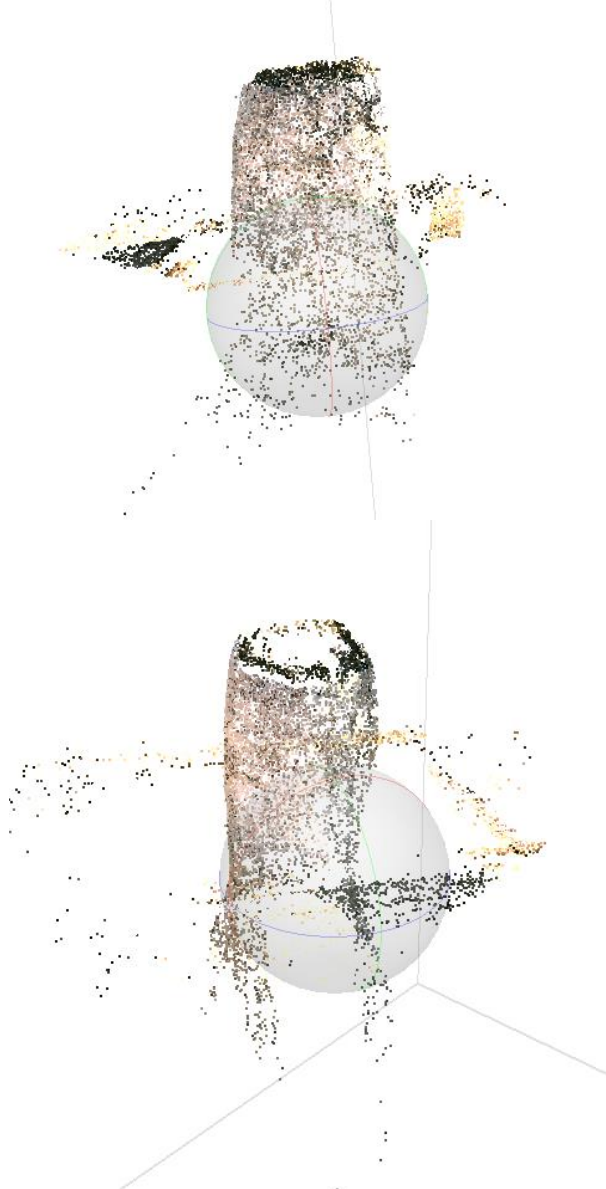
Εικόνα 4 - 18: Εικόνες που απέτυχε το alignment – chunk 1

Καταλήγοντας, για τη δημιουργία ενός σωστού αραιού νέφους σημείων για το πρώτο chunk, χρειάστηκε να σκοπευθούν πολλά σημεία (φωτοσταθερά και μη). Αυτό συνέβη λόγω των ακατάλληλων, για το συγκεκριμένο λογισμικό, εικόνων. Οι εικόνες ήταν λίγες για κάθε μέρος του μνημείου, δεν υπήρχαν πολλές επικαλύψεις, πολλά τμήματά του απεικονίζονταν σε εικόνες υπό κλίση, ενώ αρκετά απεικονίζονταν μόνο σε μια εικόνα.

Για τα υπόλοιπα chunks, η διαδικασία του προσανατολισμού δεν ήταν τόσο χρονοβόρα όσο η προηγούμενη. Σε αυτό οφείλονται οι εικόνες που είχαν παρθεί. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά τα chunks είναι αρκετά κοντινές και έχουν αρκετές επικαλύψεις μεταξύ τους. Ειδικότερα, σκοπεύθηκαν όλα τα φωτοσταθερά που απεικονίζονταν στις εικόνες κάθε chunk, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία ήταν ευδιάκριτα τόσο στις εικόνες αυτές όσο και σε κάποιες του πρώτου chunk ή οποιουδήποτε άλλου. Αυτό έγινε με σκοπό να είναι δυνατή η μετέπειτα συνένωση όλων των chunks μεταξύ τους, για τη δημιουργία ενός νέφους σημείων για ολόκληρο το μνημείο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε chunk:

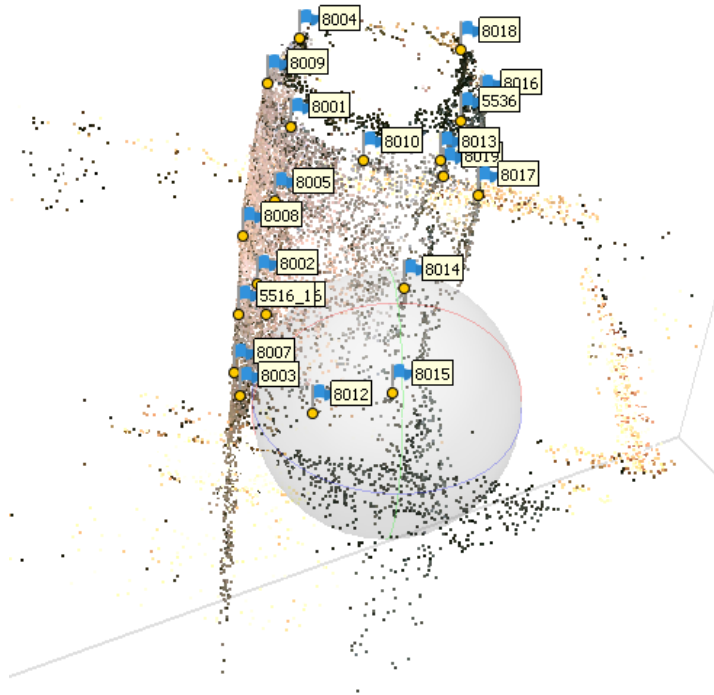
❖ **Chunk 2** – Κεφάλι πρώτης μορφής



Παρατηρώντας τις εικόνες, γίνεται αντιληπτό ότι το σχήμα του μνημείου έχει αποδοθεί αρκετά σωστά. Ωστόσο, έχουν αποτυπωθεί αρκετά σημεία, τα οποία βρίσκονται στις σκαλωσιές και στο περιβάλλοντα χώρο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπλέον θορύβου στο νέφος. Αυτό όμως φαίνεται να μην αποτελεί πρόβλημα, διότι το μετέπειτα «καθάρισμα» των σημείων αυτών είναι μια εύκολη και όχι τόσο χρονοβόρα διαδικασία.

Εικόνα 4 - 19: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 2

Στο συγκεκριμένο chunk, πραγματοποιήθηκαν σκοπεύσεις 20 συνολικά σημείων (φωτοσταθερών και χαρακτηριστικών) σε όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες. Όλες οι εικόνες προσανατολίστηκαν.



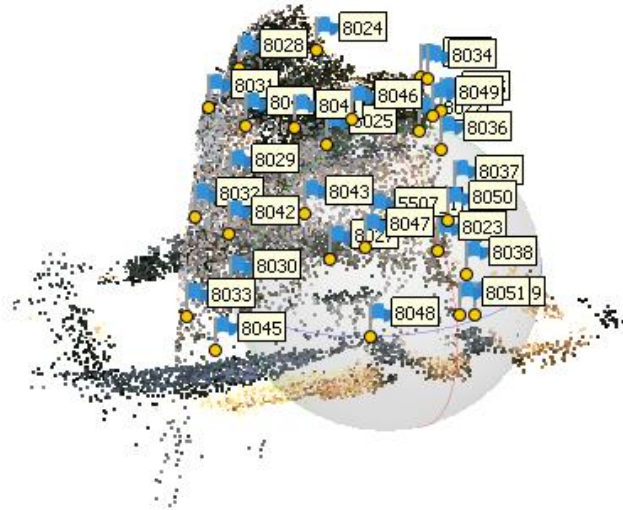
Εικόνα 4 - 20: Σκόπευση σημείων στο chunk 2

❖ **Chunk 3** - Κεφάλι δεύτερης μορφής

Εξετάζοντας προσεκτικά τις εικόνες, γίνεται κατανοητό ότι το σχήμα του μνημείου έχει αποδοθεί αρκετά σωστά. Όμως, έχουν αποτυπωθεί αρκετά σημεία λόγω των σκαλωσιών και του περιβάλλοντα χώρου, με επίπτωση τη δημιουργία επιπλέον θορύβου στο νέφος. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι το μετέπειτα «καθάρισμα» των σημείων αυτών είναι μια εύκολη διαδικασία.

Εικόνα 4 - 21: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 3

Για τη δημιουργία του παραπάνω αραιού νέφους σημείων, σκοπεύθηκαν συνολικά 30 σημεία (όλα τα φωτοσταθερά και ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία για τη σύνδεσή του με το chunk 1, προκειμένου να είναι δυνατή η συνένωσή τους στο τέλος).



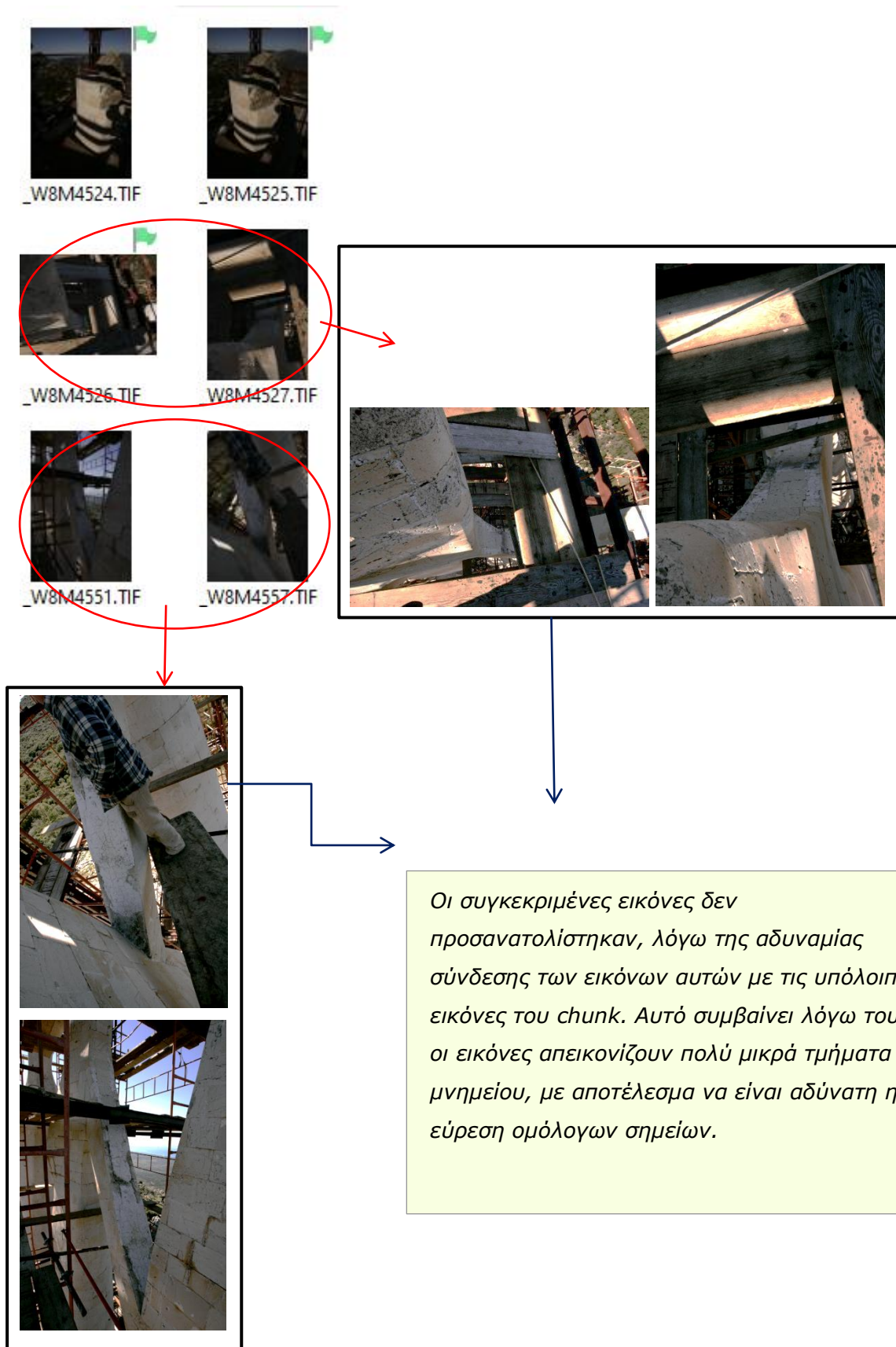
Εικόνα 4 - 22: Σκόπευση σημείων στο chunk 3

Ωστόσο, δεν προσανατολίστηκαν όλες οι εικόνες.



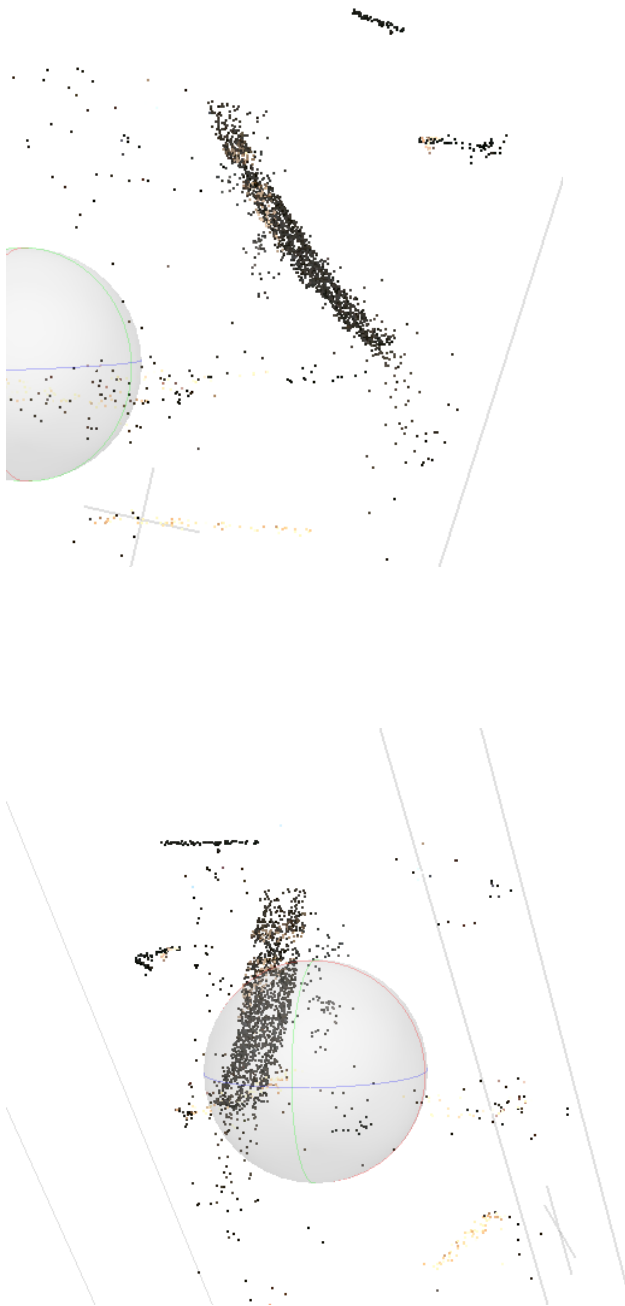
Εικόνα 4 - 23: Εικόνες που δεν έγιναν align – chunk 3

Οι εικόνες αυτές δεν προσανατολίστηκαν, λόγω της μεγάλης διαφοράς φωτεινότητας που είχαν σε σχέση με τις υπόλοιπες εικόνες του chunk (είναι αρκετά φωτεινές). Επίσης, οι εικόνες για το πλαϊνό τμήμα του κεφαλιού αυτού ήταν ελάχιστες. Ουσιαστικά μόνο σ' αυτές τις δυο εικόνες αποτυπωνόταν το συγκεκριμένο τμήμα του μνημείου. Ωστόσο, αυτό αποτυπώθηκε λίγο, λόγω της ύπαρξης εικόνων, που απεικονίζουν το εν λόγω τμήμα, από το πλάι, με ελαφριά κλίση.



Εικόνα 4 - 24: Εικόνες που δεν έγιναν align – chunk 3

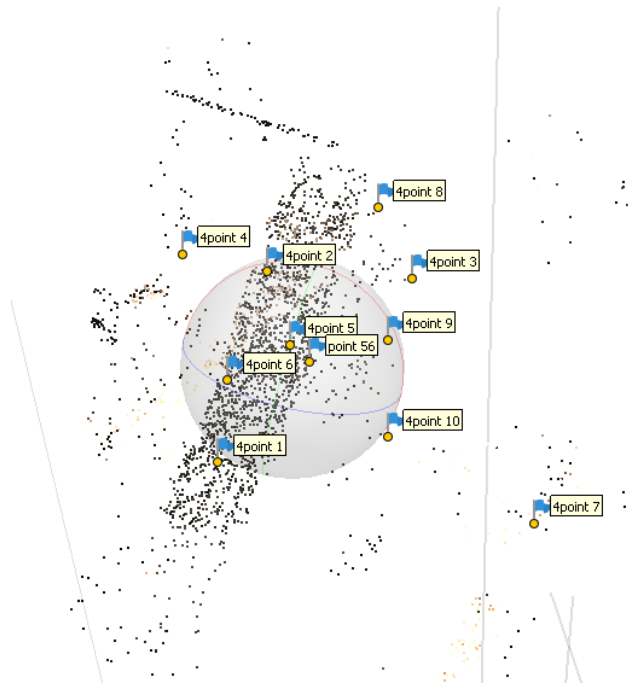
❖ **Chunk 4** - Πάνω μέρος χεριού πρώτης μορφής



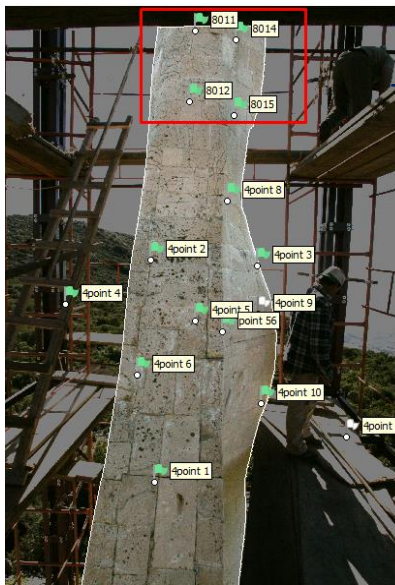
Παρατηρείται ότι οι εικόνες έχουν προσανατολιστεί σωστά. Ωστόσο, υπάρχει αρκετός θόρυβος λόγω των σκαλωσιών, ο οποίος θα αφαιρεθεί στην πορεία των επεξεργασιών.

Εικόνα 4 - 25: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 4

Για το παραπάνω αραιό νέφος σημείων, έγιναν σκοπεύσεις 15 σημείων. Επιλέχθηκαν σημεία, τόσο πάνω στο χέρι όσο και στο γύρω περιβάλλον (π.χ. σκαλωσιές), με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή σημείων πάνω στο αντικείμενο, προκειμένου να γίνει σωστά ο προσανατολισμός των εικόνων και να δημιουργηθεί το σωστό σχήμα. Ο προσανατολισμός έγινε και στις 6 εικόνες.



Ήταν αδύνατη η εύρεση και συνεπώς σκόπευση σημείων στις εικόνες αυτές, τα οποία θα απεικονίζονταν σε οποιοδήποτε άλλο chunk. Κάτι τέτοιο δυσχεραίνει τη μετέπειτα συνένωσή του με το συνολικό.

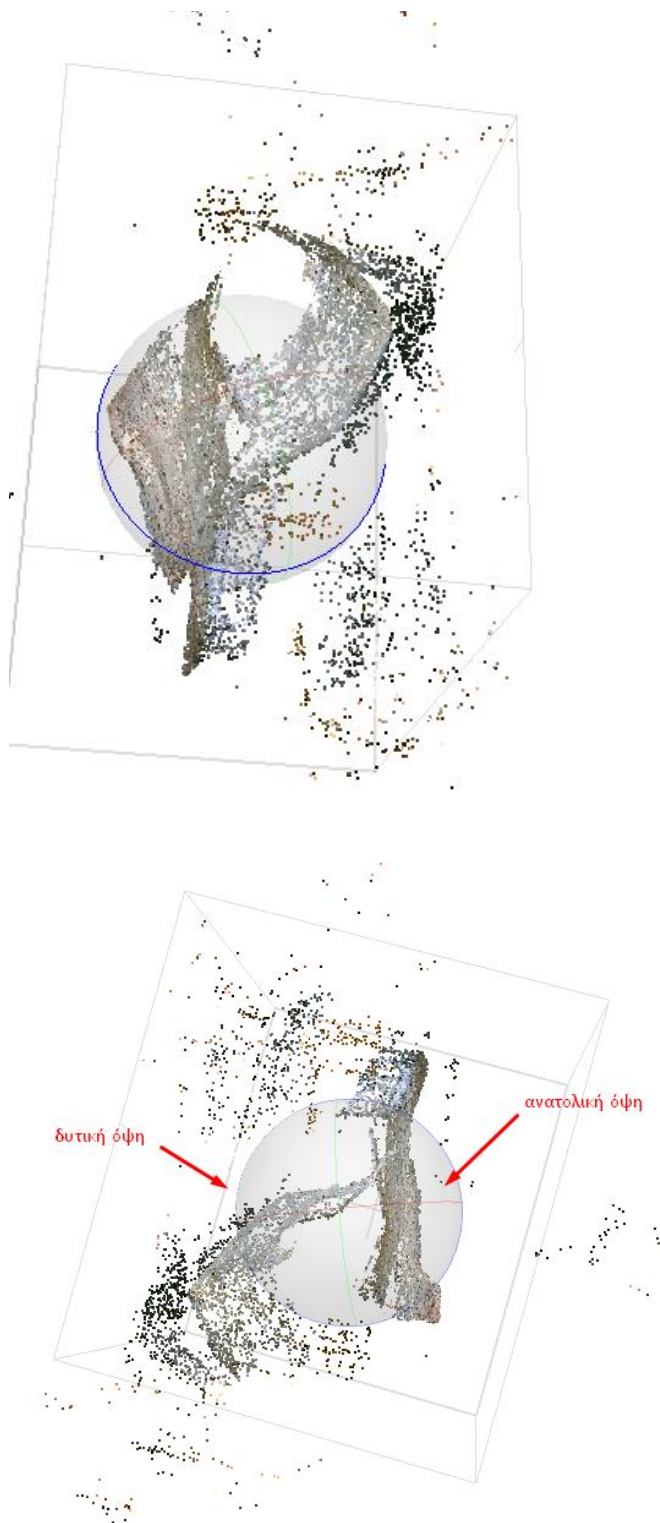


Στο συγκεκριμένο chunk δεν απεικονίζονταν ούτε φωτοσταθερά, παρά μόνο σε μια μόνο εικόνα.

Εικόνα 4 - 26: Σκόπευση σημείων chunk 4

Λόγω της αδυναμίας εύρεσης σημείων-σύνδεσης με άλλα chunk, καθώς και της ανυπαρξίας φωτοσταθερών σημείων, ενδέχεται το συγκεκριμένο chunk να μην καταφέρει να συνενωθεί με τα υπόλοιπα και επομένως να δημιουργηθεί τρύπα σ' αυτό το τμήμα του μνημείου.

- ❖ **Chunk 5** - Πάνω μέρος του κορμού της δεύτερης μορφής, όπως αυτό απεικονίζεται τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική όψη.

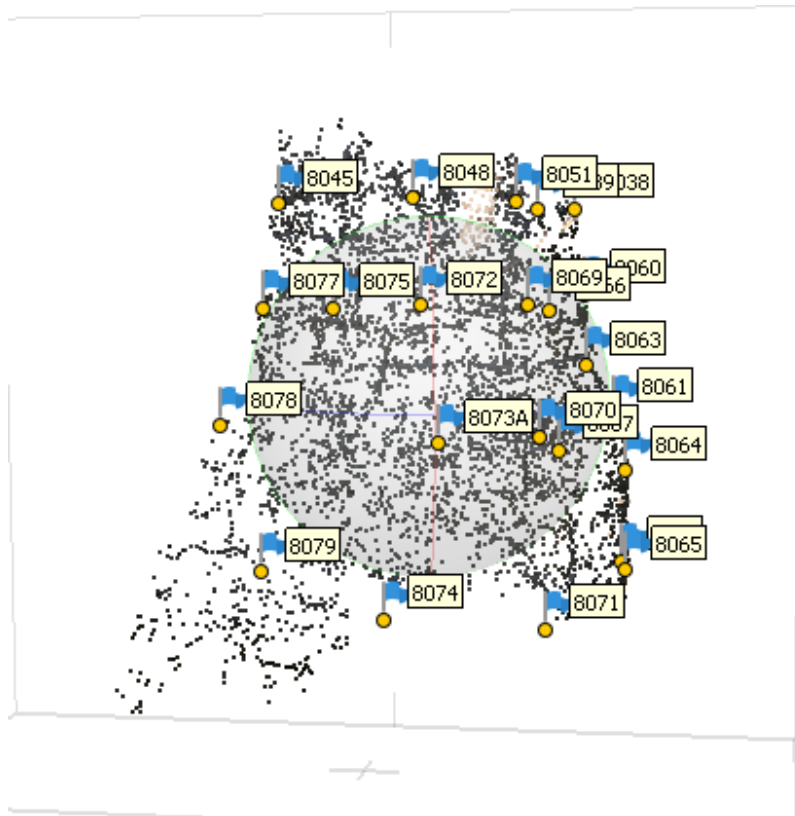


Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι ενώ τα νέφη του μπροστινού κορμού της μορφής (δυτική όψη) και του πίσω μέρους της (ανατολική όψη), έχουν σωστή γεωμετρία ξεχωριστά, στον συνδυασμό τους εμφανίζεται πρόβλημα.

Εικόνα 4 - 27: Αρχικό alignment του chunk 5

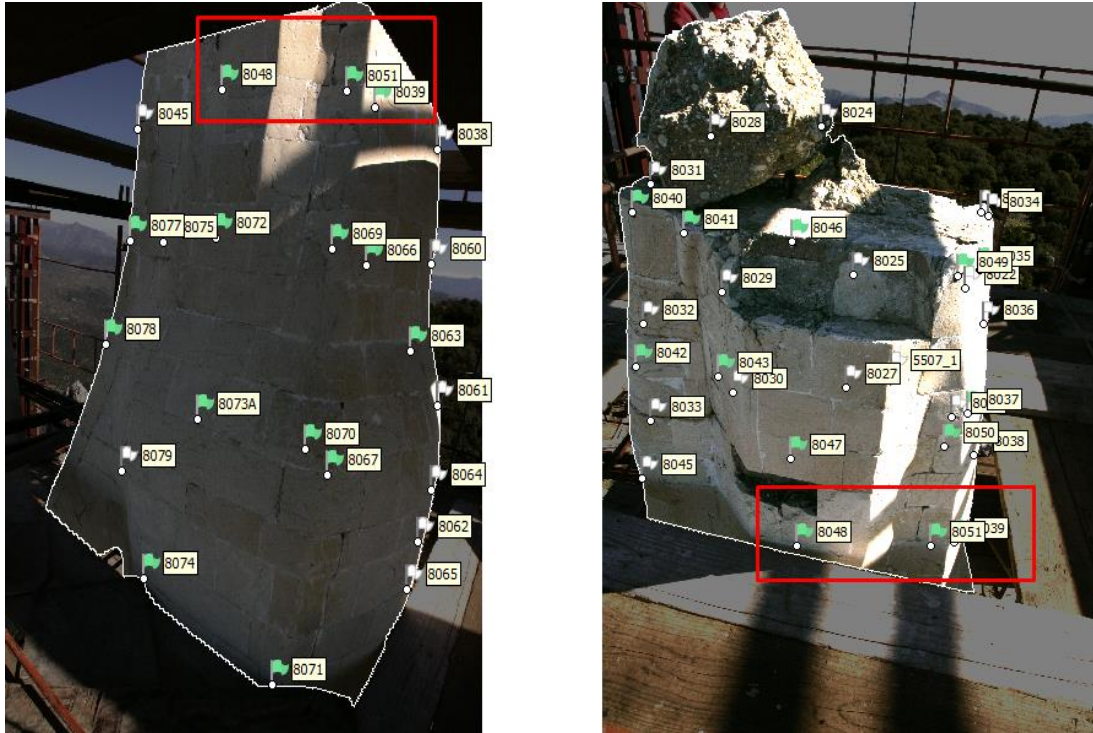
Αυτό οφείλεται στο ότι, δεν υπάρχουν εικόνες από το πλάι του κορμού της μορφής, με αποτέλεσμα το λογισμικό να αδυνατεί να βρει σωστά ομόλογα σημεία μεταξύ τους και συνεπώς να μη μπορεί να τα ενώσει ορθά. Για αυτό το λόγο, αποφασίστηκε το chunk 5 να χωριστεί σε δυο μικρότερα chunk, όπου το ένα θα περιλαμβάνει τις εικόνες του κορμού που βρίσκεται στην ανατολική όψη, και το άλλο τις εικόνες του κορμού της δυτικής όψης.

Το chunk με τις εικόνες του πάνω μέρους του κορμού της δυτικής όψης, αποτελείται πλέον από 12 εικόνες. Για τη διαδικασία του προσανατολισμού, σκοπεύθηκαν 23 σημεία, τα οποία είναι όλα φωτостаθερά.



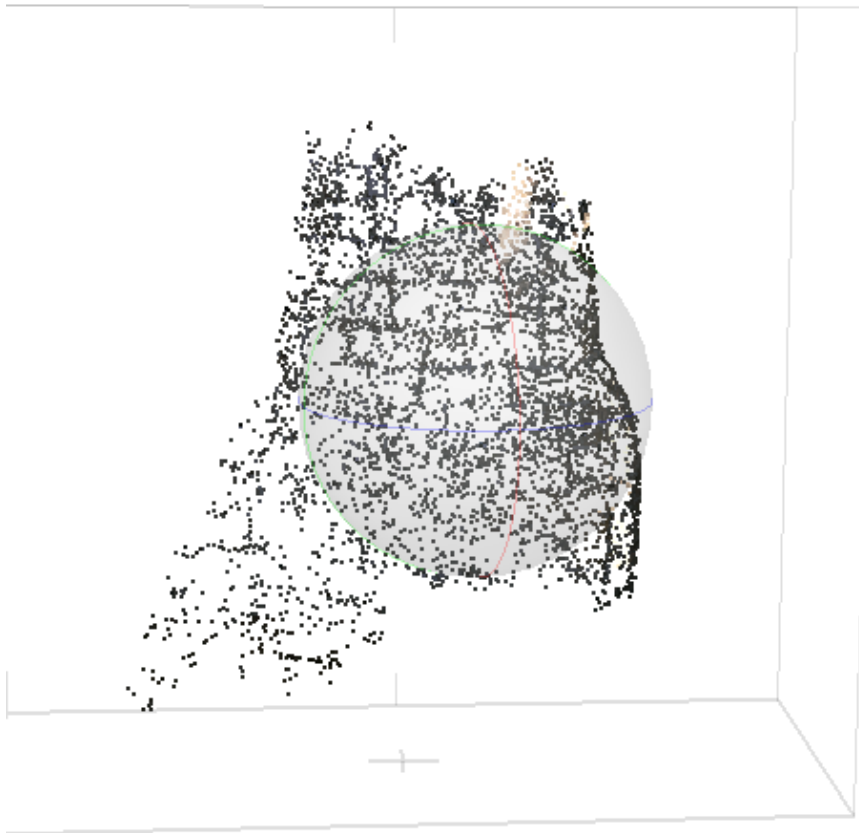
Εικόνα 4 - 28: Σκόπευση σημείων στις εικόνες chunk 5

Δεν χρειάστηκε να σκοπευθούν περισσότερα σημεία, διότι, η ένωσή του με κάποιο άλλο chunk, και πιο συγκεκριμένα το chunk 3 (εικόνες κεφαλιού της δεύτερης μορφής), ήταν εφικτή, λόγω του ότι ορισμένα φωτοσταθερά που απεικονίζονται στις εικόνες αυτές, είναι κοινά με τα φωτοσταθερά του chunk 3, χάρη στις μικρές επικαλύψεις που υπάρχουν στις εικόνες τους.



Εικόνα 4 - 29: Σκόπευση σημείων chunk 5

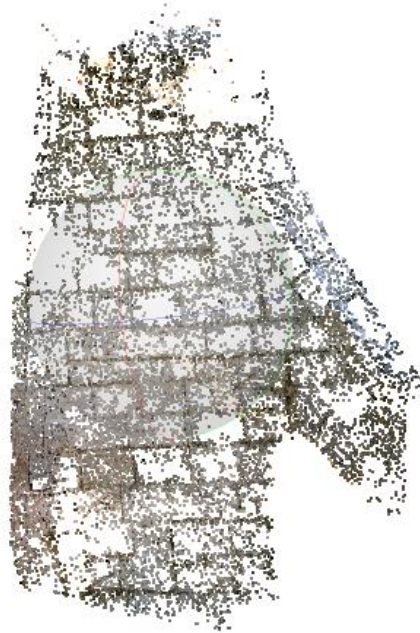
Ο προσανατολισμός έγινε σε όλες τις εικόνες και παρουσιάζεται παρακάτω:



Παρατηρείται ότι ο προσανατολισμός των εικόνων έγινε σωστά. Επίσης, δεν υπάρχει θόρυβος στο νέφος, λόγω του ότι τοποθετήθηκαν μάσκες στις εικόνες, αφού χάρη σε αυτές θα είναι ευκολότερο και γρηγορότερο το «καθάρισμα» του νέφους μεταγενέστερα.

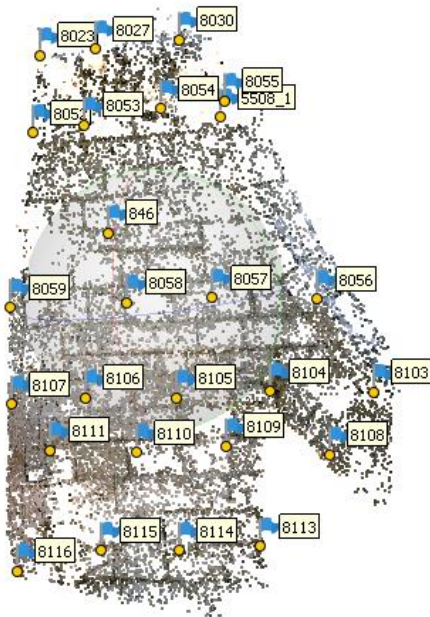
Εικόνα 4 - 30: Αποτέλεσμα align chunk 5

Το chunk του κορμού της ανατολικής όψης της δεύτερης μορφής περιλαμβάνει 34 εικόνες και το νέφος σημείων του παρουσιάζεται παρακάτω:



Διαπιστώνεται ότι η διαδικασία του προσανατολισμού των εικόνων έγινε σωστά.

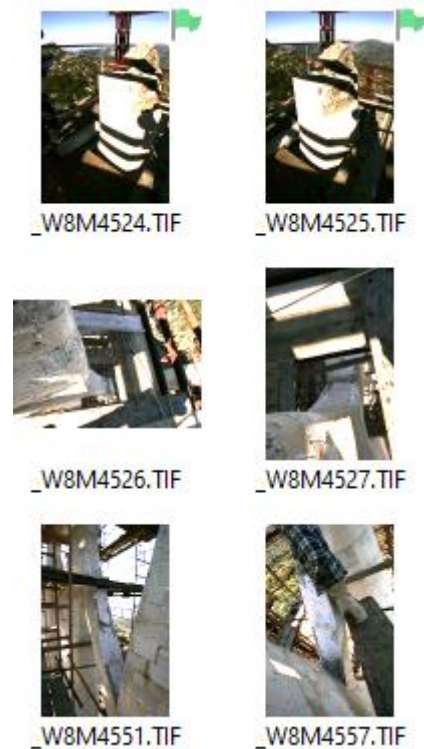
Εικόνα 4 - 31: Αποτέλεσμα align chunk 5



Για το alignment του συγκεκριμένου chunk σκοπεύθηκαν 26 σημεία (φωτοσταθερά)

Εικόνα 4 - 32: Σκόπευση σημείων chunk 5

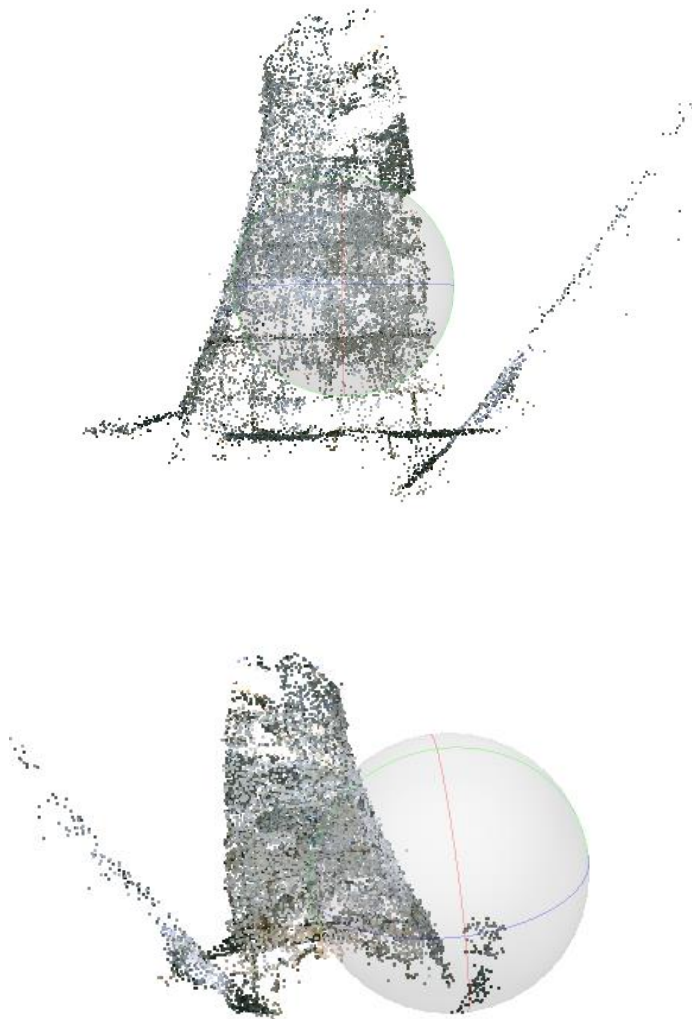
Όμως, δεν προσανατολίστηκαν όλες οι εικόνες.



Εικόνα 4 - 33: Αδυναμία alignment - chunk 5

Οι παραπάνω εικόνες, είχαν χρησιμοποιηθεί και στο chunk 3, το οποίο αφορά το κεφάλι της ίδιας μορφής. Σε κανένα από τα δυο chunk δεν κατάφερε να πραγματοποιηθεί ο προσανατολισμός των εν λόγω εικόνων. Οι λόγοι αναφέρθηκαν προηγουμένως αναλυτικότερα (βλ. Ανάλυση για chunk 3).

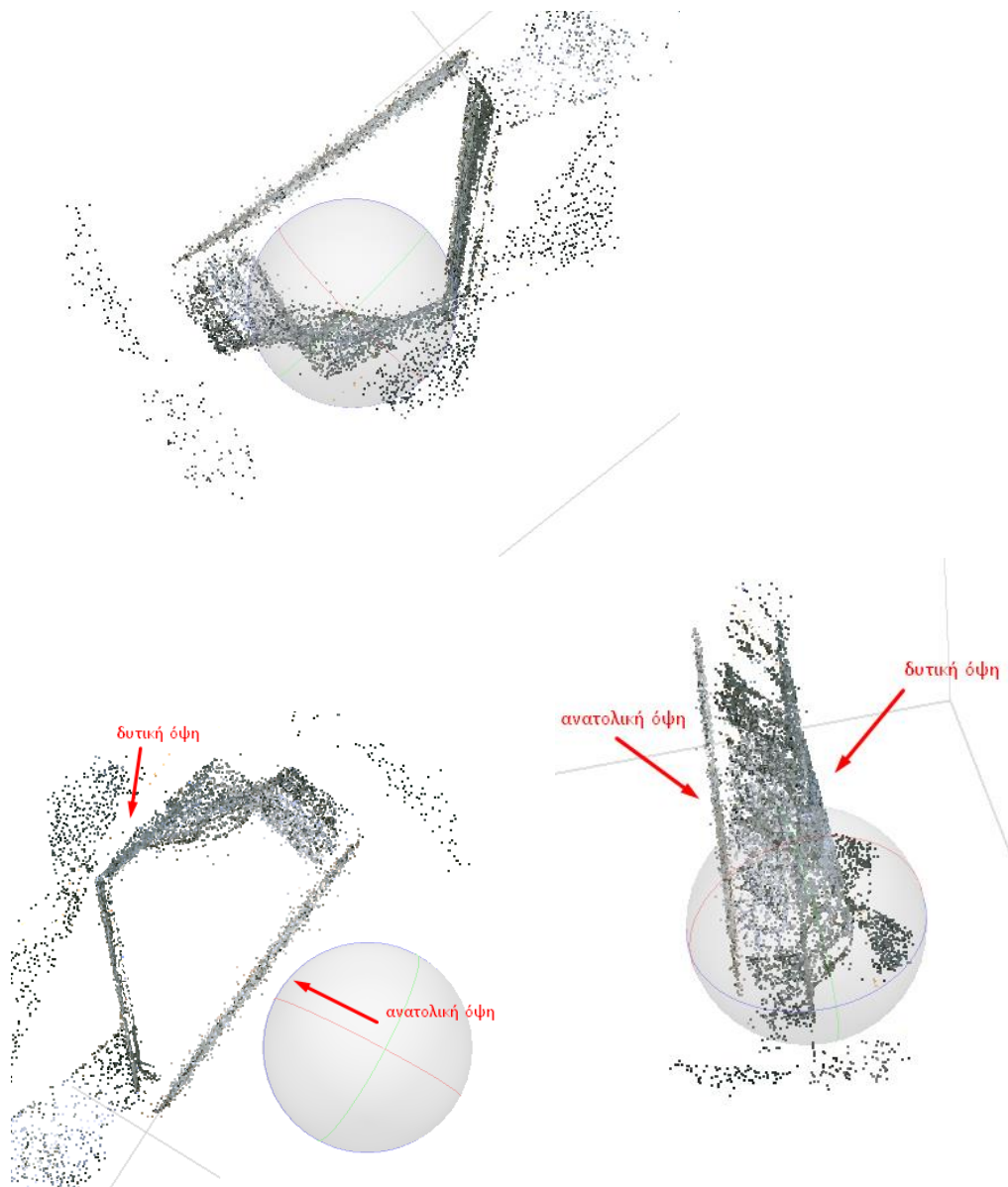
❖ **Chunk 6** - Πάνω μέρος της τρίτης μορφής (ανατολική και δυτική όψη)



Παρατηρώντας τις εικόνες, διαπιστώνεται ότι τόσο οι εικόνες για τη δυτική όψη (πρώτη εικόνα), όσο και αυτές για την ανατολική όψη (δεύτερη εικόνα) του τμήματος αυτού, έχουν προσανατολιστεί σωστά.

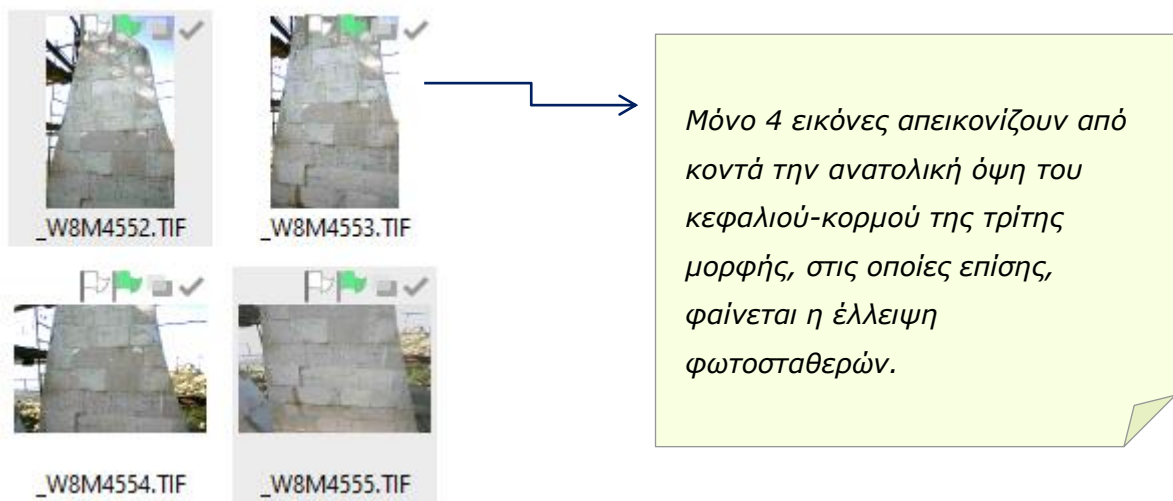
Εικόνα 4 - 34: Αποτέλεσμα του alignment του chunk 6

Ωστόσο, σύμφωνα με τις παρακάτω εικόνες, διαπιστώνεται ότι τα σημεία της δυτικής με αυτά της ανατολικής όψης δεν συνδέονται. Δημιουργείται ένα κενό μεταξύ τους, καθώς επίσης, το νέφος της ανατολικής όψης φαίνεται να είναι αρκετά απομακρυσμένο από αυτό της δυτικής.



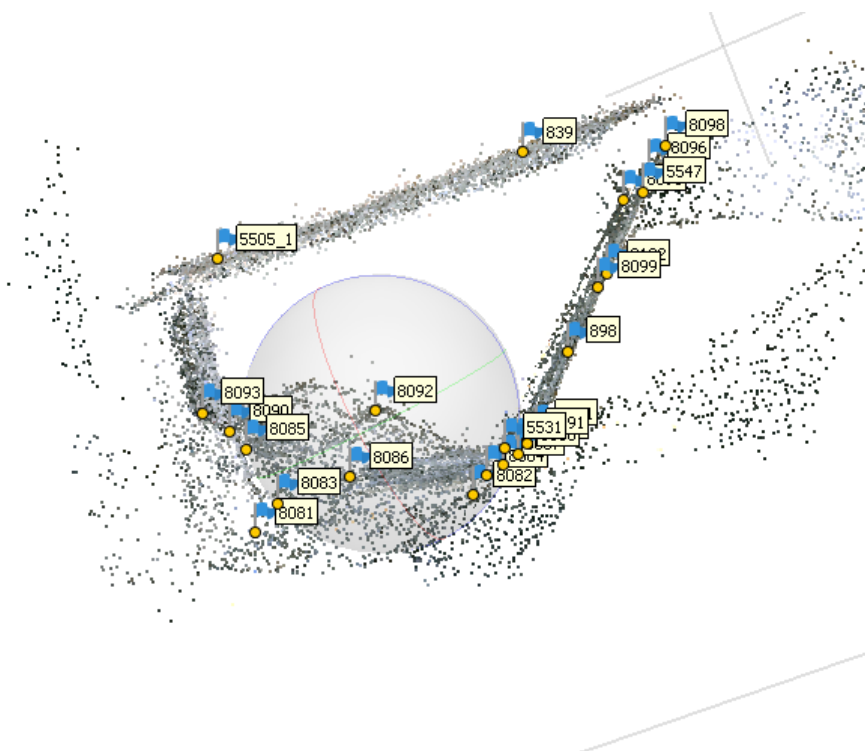
Εικόνα 4 - 35: Προβλήματα του alignment – chunk 6

Λόγω της ανυπαρξίας εικόνων στα πλαϊνά τμήματα των κορμών, δημιουργείται κενό στις περιοχές αυτές. Επιπρόσθετα, η απομάκρυνση που φαίνεται να υπάρχει, εξηγείται από το γεγονός ότι στις εικόνες της ανατολικής όψης δεν υπάρχουν καθόλου φωτοσταθερά. Για αυτό το λόγο σκοπεύθηκαν μόνο ορισμένα σημεία, τα οποία είναι ευδιάκριτα τόσο στο συγκεκριμένο chunk, όσο και στο συνολικό. Κάτι τέτοιο, οδήγησε ενδεχομένως στον εσφαλμένο προσανατολισμό των εικόνων αυτών.



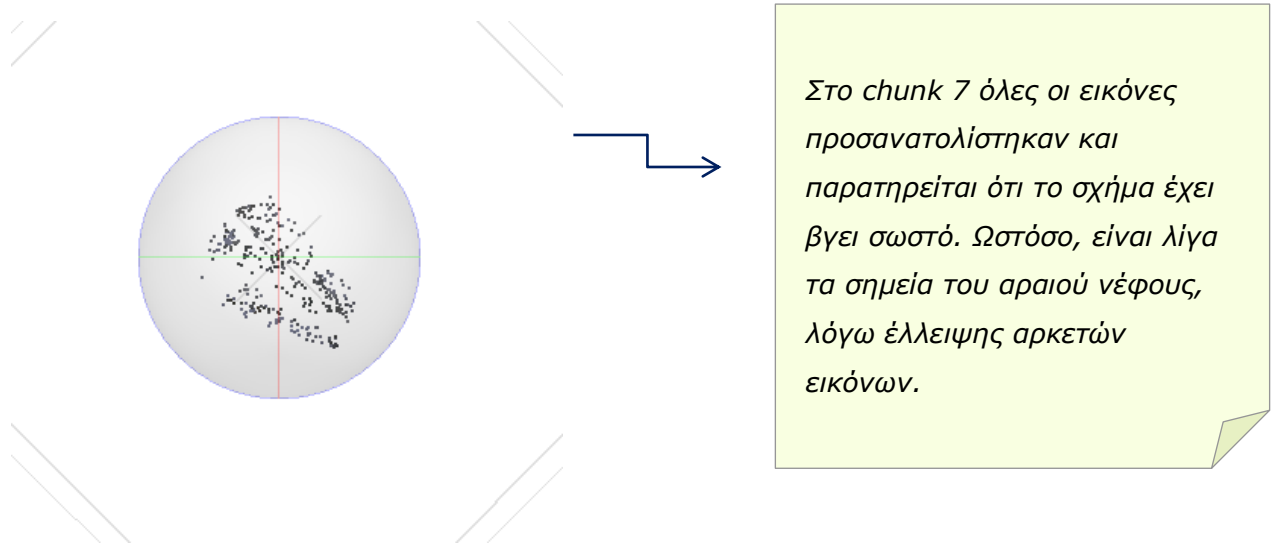
Εικόνα 4 - 36: Εικόνες ανατολικής όψης της τρίτης μορφής – chunk 6

Σκοπεύθηκαν συνολικά 25 σημεία. Στην ανατολική όψη, ήταν δυνατό να σκοπευθούν μόνο δύο κοινά σημεία με το συνολικό chunk 1. Υπήρχε τεράστια δυσκολία στη διαδικασία εύρεσης κοινών σημείων με το μεγάλο chunk, λόγω της μεγάλης διαφοράς ανάλυσης των εικόνων. Το chunk 1 περιλαμβάνει μακρινές εικόνες, οι οποίες λήφθηκαν από το έδαφος, ενώ το συγκεκριμένο chunk, περιλαμβάνει πολύ κοντινές εικόνες, τραβηγμένες πάνω στις σκαλωσιές. Ωστόσο, δεν κρίθηκε απαραίτητο να σκοπευθούν και άλλα σημεία σε αυτό το τμήμα, που θα ήταν διακριτά μόνο σε αυτό το chunk, διότι δεν υπήρχε πρόβλημα στη γεωμετρία του νέφους, παρά μόνο στη θέση του.



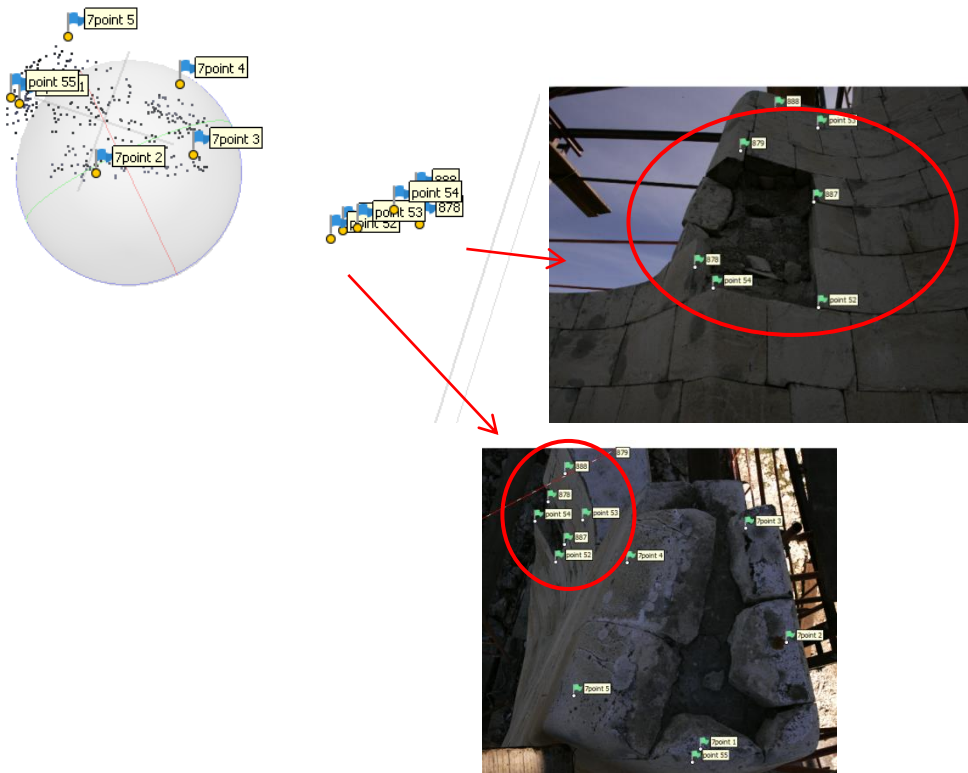
Εικόνα 4 - 37: Σκόπευση σημείων – chunk 6

❖ **Chunk 7** - Πάνω μέρος του κεφαλιού της τέταρτης μορφής



Εικόνα 4 - 38: Αποτέλεσμα alignment chunk 7

Για την επίτευξη του παραπάνω αποτελέσματος, σκοπεύθηκαν σημεία που βρίσκονται πάνω στο κεφάλι, καθώς και σημεία στον κορμό της που φαίνονταν στις εικόνες αυτές, προκειμένου να είναι δυνατή η μεταγενέστερη συνένωσή του με το chunk 1. Και σε αυτό το chunk, όπως και στο chunk 4, υπάρχει έλλειψη φωτοσταθερών σημείων.

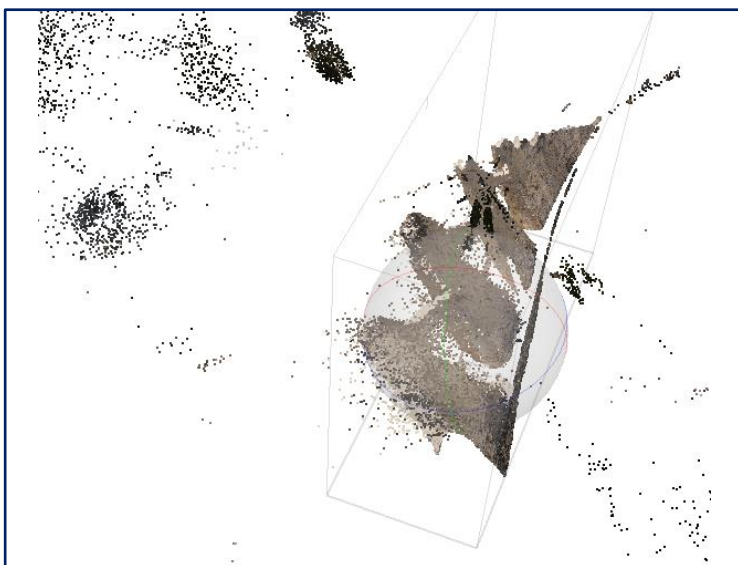
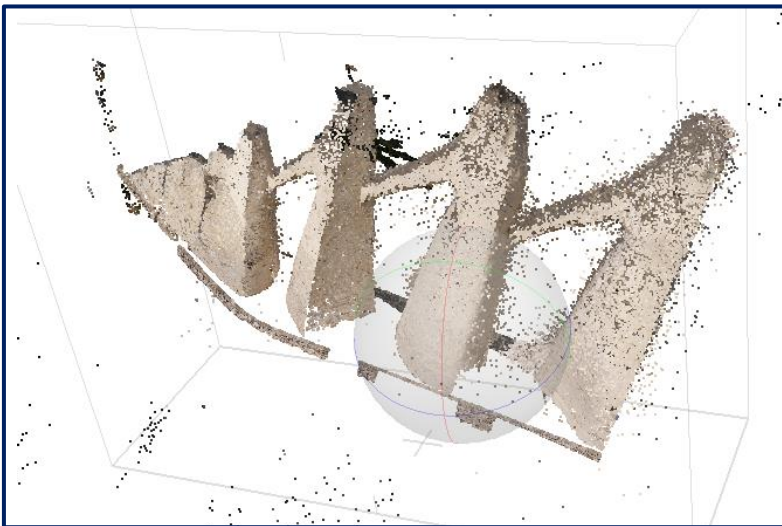


Εικόνα 4 - 39: Σκόπευση χαρακτηριστικών σημείων – chunk 7

Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιήθηκε επιτυχώς ο προσανατολισμός σε κάθε chunk ξεχωριστά, έγιναν ορισμένες προσπάθειες συνένωσης των chunks, με σκοπό να γίνει align όλων των εικόνων μαζί και κατ' επέκταση δημιουργία ενός ολικού αραιού νέφους. Για την προσπάθεια αυτή, χρειάστηκε να ελεγχθεί το κατά πόσο υπάρχουν τα απαραίτητα σημεία σύνδεσης που απαιτούνται για την ολική ένωση των chunks. Ειδικότερα, έγινε σκόπευση 3-4 σημείων, σε όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες κάθε chunk, τα οποία απεικονίζονται σε τουλάχιστον δυο chunks. Αποφασίστηκε να γίνουν τρεις προσπάθειες. Πιο συγκεκριμένα, τρία alignment με διαφορετικές ακρίβειες: high, medium, low.

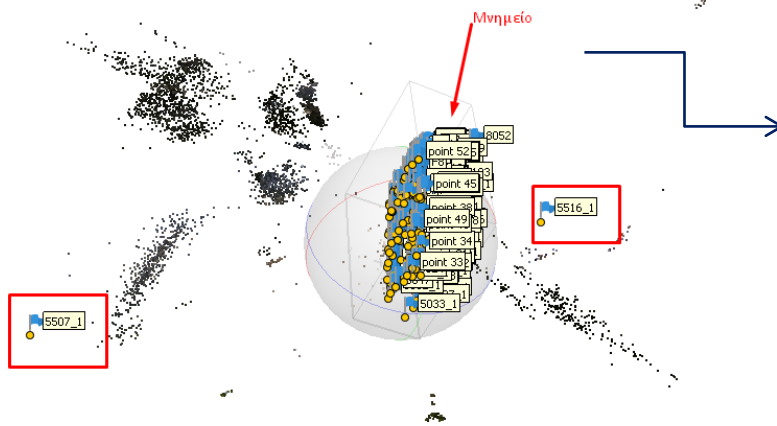
Προσπάθεια 1^η – align με ακρίβεια high

Στη συγκεκριμένη προσπάθεια align έγιναν οι 174 εικόνες από τις συνολικά 233.

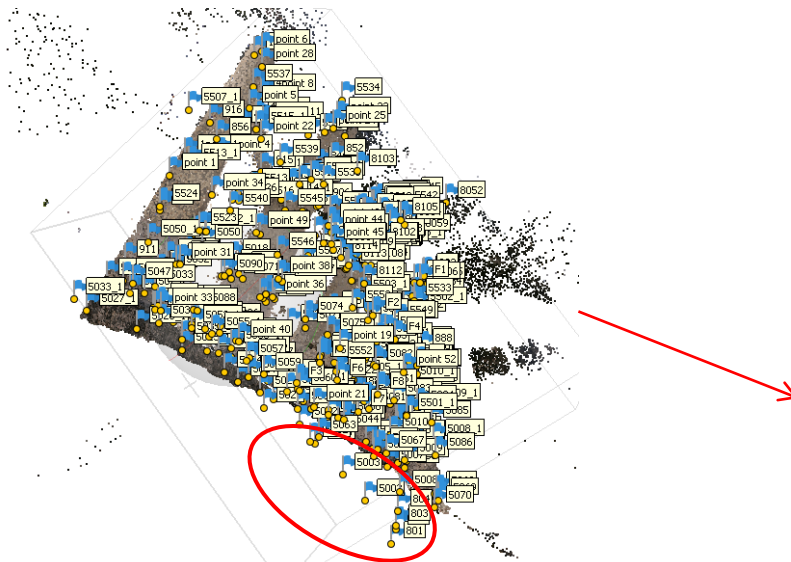


Παρατηρείται αρκετός θόρυβος στο νέφος. Πολλά σημεία «πετούν», ενώ ακόμη περισσότερα είναι σε λάθος θέσεις.

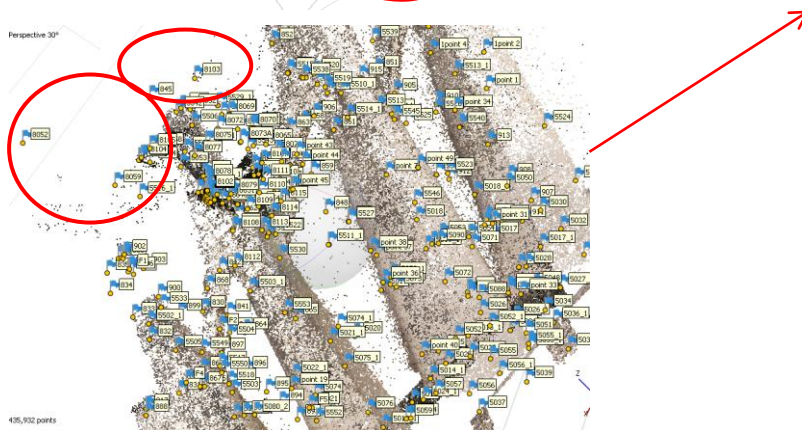
Εικόνα 4 - 40: Ολικό align με ακρίβεια high



Φαίνεται ότι δυο σημεία έχουν πολύ λάθος θέσεις. Ενώ η πραγματική τους θέση είναι πάνω στο μνημείο, παρατηρείται ότι έχουν απομακρυνθεί αρκετά από αυτό.



Μερικά ακόμη παραδείγματα σημείων σε λάθος θέσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω των εσφαλμένων προσανατολισμών των εικόνων.



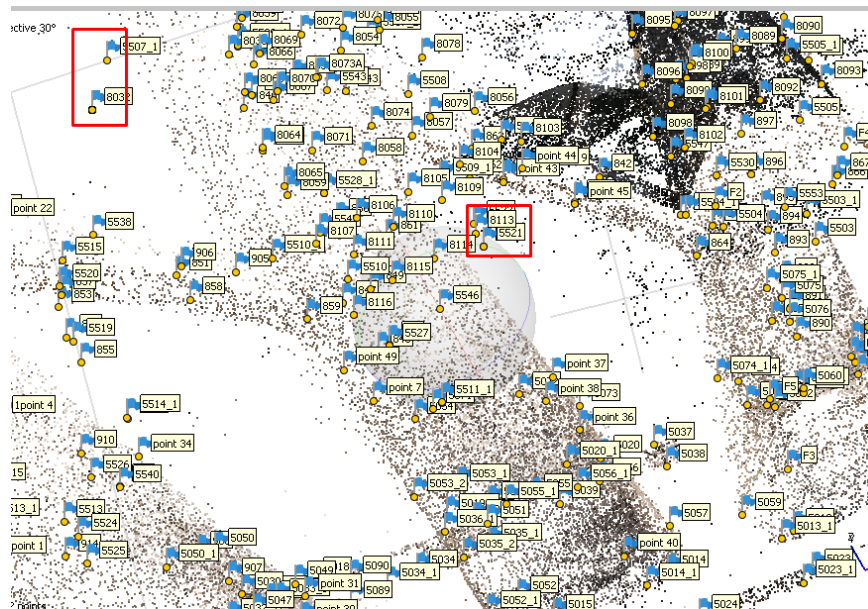
Εικόνα 4 - 41: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια high

Προσπάθεια 2^η – align με ακρίβεια medium

Στην προσπάθεια αυτή align έγιναν λιγότερες εικόνες. Μόλις οι 132 από τις 233.



Εικόνα 4 - 42: Ολικό align με ακρίβεια medium

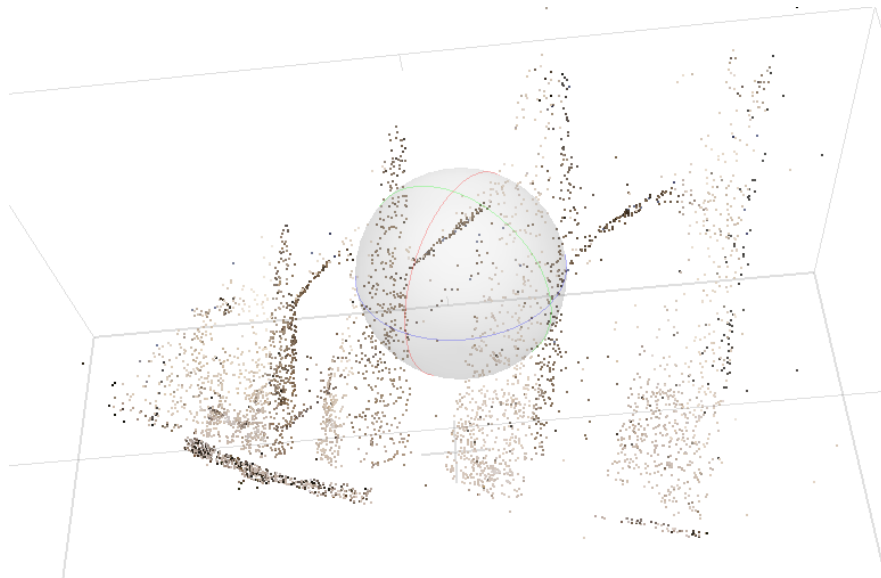


Εικόνα 4 - 43: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια medium

Όπως φαίνεται από το αποτέλεσμα στη δίπλα εικόνα, ούτε αυτή η προσπάθεια θεωρείται επιτυχημένη, αφού πάλι πολλά σημεία είναι σε τελείως λάθος θέσεις.

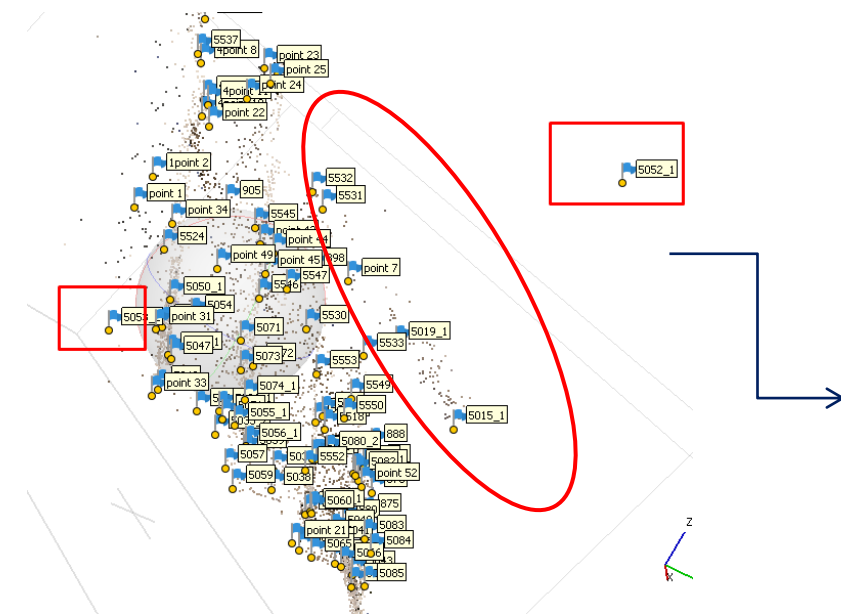
Προσπάθεια 3^η – align με ακρίβεια low

Σε αυτή την τελευταία προσπάθεια, το align έγινε σε ελάχιστες εικόνες. (42 από 233).



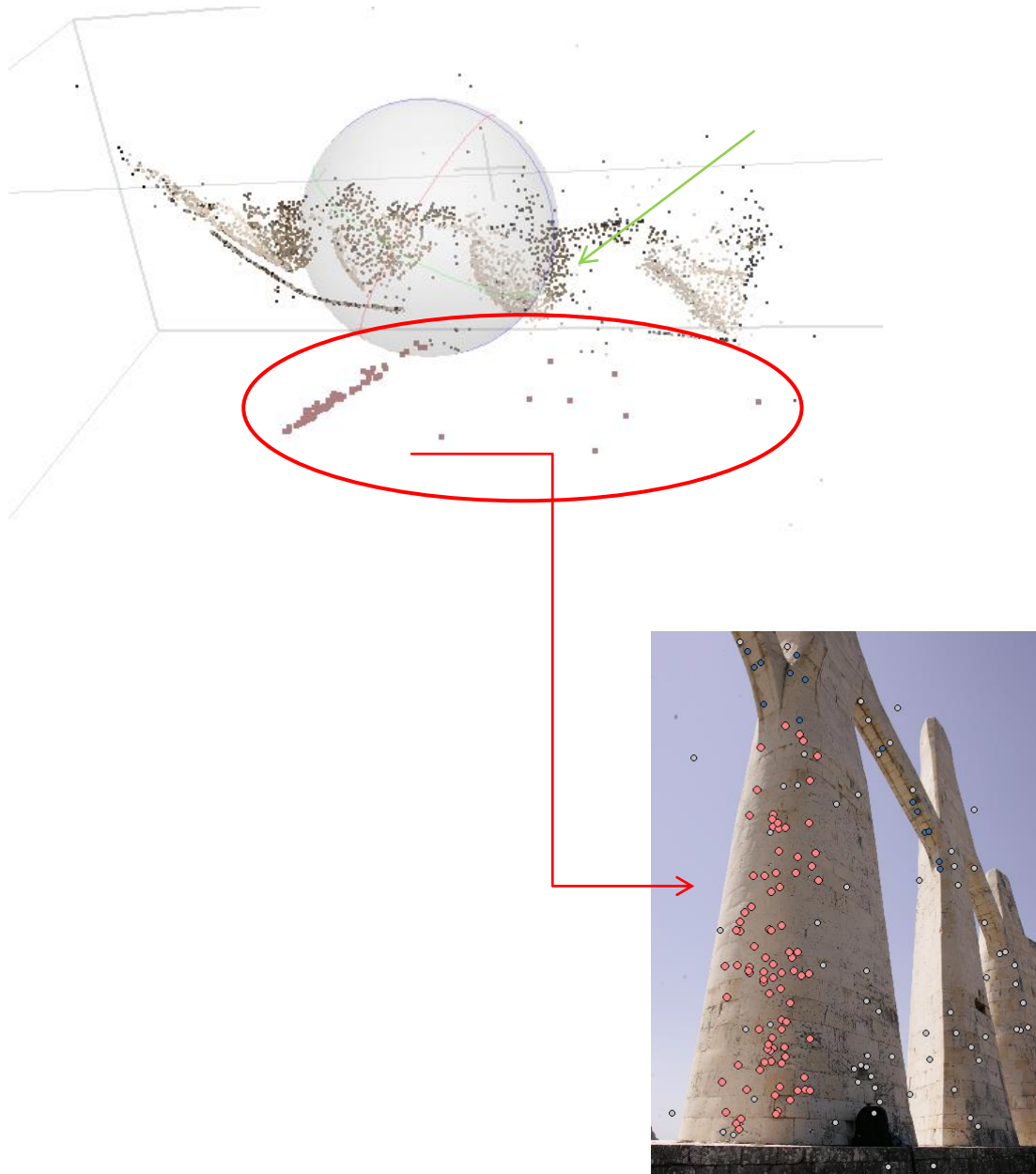
Το νέφος σημείων είναι πολύ αραιό, με αποτέλεσμα να λείπουν βασικές πληροφορίες-λεπτομέρειες του αντικειμένου.

Εικόνα 4 - 44: Ολικό align με ακρίβεια low



Επιπρόσθετα, ακόμα και με ακρίβεια low, πολλά σημεία έχουν αποδοθεί σε τελείως λάθος θέσεις.

Εικόνα 4 - 45: Προβλήματα στο ολικό align με ακρίβεια low



Εικόνα 4 - 46: Προβλήματα στο ολικό αλign με ακρίβεια low

Τα σημεία που είναι κυκλωμένα με κόκκινο χρώμα, στην πραγματικότητα ανήκουν στο πλαϊνό μέρος της δεύτερης μορφής, όπως απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα. Δηλαδή, η σωστή θέση τους στο νέφος είναι εκεί που δείχνει το πράσινο βέλος.

Με βάση όλα τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι το ολικό align είναι αδύνατο να πετύχει. Αυτό οφείλεται στις ακατάλληλες, για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, εικόνες. Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, οι λήψεις των εικόνων έχουν πραγματοποιηθεί με πληθώρα εστιακών αποστάσεων, αποστάσεων λήψης, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολύ μακρινές ή πολύ κοντινές εικόνες. Επίσης, οι εικόνες δεν έχουν πολλές επικαλύψεις μεταξύ τους. Όλα αυτά συντελούν στην αδυναμία εύρεσης ομόλογων σημείων μεταξύ όλων των εικόνων.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, αποφασίστηκε, να συνεχιστεί η διαδικασία παραγωγής μοντέλου για κάθε chunk ξεχωριστά.

Έλεγχος σφαλμάτων ύστερα από την επεξεργασία των εικόνων στο Metashape

Ύστερα από την παραγωγή αραιού νέφους σημείων για κάθε chunk, ελέγχεται το συνολικό σφάλμα των φωτοσταθερών ($error_{(m)}$), καθώς και το σφάλμα σκόπευσης των σημείων σε pixel.

Για κάθε chunk, εισήχθησαν οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών και πραγματοποιήθηκαν οι σκοπεύσεις τους. Αφού πραγματοποιηθούν όλοι οι προσανατολισμοί των εικόνων, εσωτερικός κι εξωτερικός, το λογισμικό με βάση τις σκοπεύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στις εικόνες, υπολογίζει με τη διαδικασία της εμπροσθοτομίας το πού βρίσκεται το κάθε σημείο στο χώρο. Στη συνέχεια συγκρίνει αυτή τη θέση που υπολογίζει, με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του κάθε σημείου που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα. Αυτό είναι το σφάλμα σε μέτρα ($error\ m$). Το εν λόγω σφάλμα θα πρέπει να είναι αρκετά μικρότερο από το γραμμικό σφάλμα 1.25 cm, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια στο τελικό προϊόν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα σφάλματα σχεδόν όλων των chunks είναι μικρότερα από το 1.25cm, ωστόσο οι τιμές των περισσότερων κυμαίνονται κοντά σε αυτό, δηλαδή ξεπερνούν λίγο το 1cm. Εξαιρέση, αποτελούν το chunk 1 και chunk 5 (που αφορά την ανατολική όψη), των οποίων τα σφάλματα των φωτοσταθερών είναι μικρότερα από 1cm, καθώς και το chunk 6, του οποίου το σφάλμα ξεπερνά το 1.25cm, και είναι ίσο με 1.4cm. Όσον αφορά το chunk 6, εξαιρέθηκαν πολλά φωτοσταθερά, προκειμένου να φτάσει σε αυτό το σφάλμα. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατό να εξαιρεθούν και άλλα φωτοσταθερά, γιατί έπρεπε να υπάρχουν ορισμένα πάνω στο αντικείμενο και ταυτόχρονα να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα σε αυτό. Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω σφάλματα, εξαιρέθηκαν σε κάθε chunk κάποια φωτοσταθερά, τα οποία εμφάνιζαν μεγάλα σφάλματα, με γνώμονα πάντα τη διατήρηση της ισοκατανομής των φωτοσταθερών.

Τα σφάλματα αυτά μπορεί να οφείλονται:

- Στον εσφαλμένο σχετικό προσανατολισμό των εικόνων,
- στη λάθος σκόπευση των σημείων. Δεδομένου ότι πολλές εικόνες παρουσίαζαν μεγάλη κλίση, η σωστή σκόπευση των σημείων αποτελούσε μια αρκετά δύσκολη διαδικασία
- στην χρήση λάθος συντεταγμένων των φωτοσταθερών. Ως αρχικά δεδομένα, δόθηκαν φωτοσταθερά, τα οποία είχαν μετρηθεί στο πεδίο αρκετές φορές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορετικές συντεταγμένες για κάθε ένα από αυτά. Λόγω του ότι δεν ήταν σίγουρο ποιες συντεταγμένες είναι οι σωστές, μπορεί να έγινε λάθος στην επιλογή αυτών.

Επίσης, ελέγχεται το reprojection error, που είναι το σφάλμα μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής θέσης του σημείου σε pixel. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται από την ποιότητα του alignment και πρέπει να είναι μικρότερο από 1pixel. Σε κάθε chunk το εν λόγω σφάλμα είναι μικρότερο από την απαιτούμενη ακρίβεια.

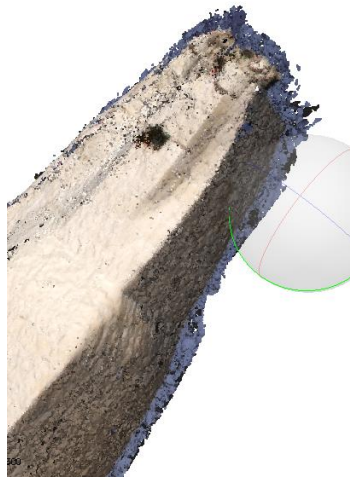
Τέλος, το Metashape εξάγει ένα φύλλο αναφοράς, στο οποίο αναγράφονται περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα αποτελέσματα και τα σφάλματα που έχουν δημιουργηθεί. Μια ακόμη πληροφορία που είναι χρήσιμη και αναγράφεται στο φύλλο αυτό, σχετίζεται με την εδαφοψηφίδα της εικόνας, που είναι αρκετά μικρότερη από τη συνιστώμενη ακρίβεια των 5mm για κάθε chunk.

Έπειτα από τον έλεγχο όλων των σφαλμάτων, πραγματοποιείται η διαδικασία παραγωγής πυκνού νέφους σημείων.

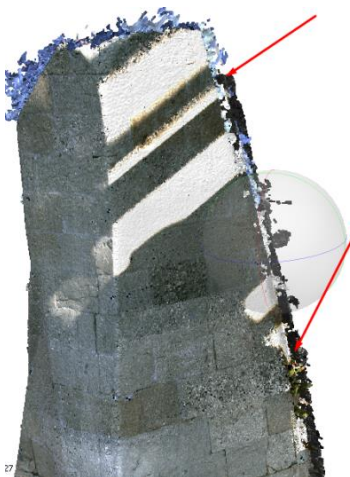
Το επόμενο βήμα, που είναι η δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (dense cloud), έγινε πάλι για κάθε chunk ξεχωριστά. Το Metashape χρησιμοποιεί τις θέσεις της μηχανής όπως προέκυψαν από τον προσανατολισμό των εικόνων, στη συνέχεια εντοπίζει ομολογίες για όλα τα σημεία (pixel) της εικόνας και τελικά δημιουργεί το πυκνό νέφος σημείων. Η ποιότητα που επιλέχθηκε για την παραγωγή όλων των dense cloud ήταν high. Όσο πιο υψηλή η ποιότητα που ορίζεται, τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια της γεωμετρίας του αντικειμένου, αλλά αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Λόγω του ότι δεν υπήρχε υπερβολικά μεγάλος αριθμός σημείων, κρίθηκε καλύτερη η επιλογή high. Επίσης, υπάρχει η παράμετρος depth filtering, η οποία χρησιμοποιείται για τη μείωση του θορύβου που προκαλείται από την κακή ποιότητα των εικόνων. Στο στάδιο αυτό, το Metashape υπολογίζει τους χάρτες βάθους για κάθε εικόνα. Για να εξαιρέσει τα σημεία που προκαλούν θόρυβο

(outliers) χρησιμοποιεί ορισμένους αλγορίθμους (Agisoft Metashape Manual). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το αντικείμενο μελέτης είναι επίπεδο και δεν περιέχει πολλές λεπτομέρειες, χρησιμοποιήθηκε η ρύθμιση Aggressive.

Αρχικά, δημιουργήθηκαν τα πυκνά νέφη σημείων, χωρίς τη χρήση масκών. Ωστόσο, αυτά έπαιρναν αρκετή πληροφορία από τον περιβάλλοντα χώρο. Πολύ κοντά στα νέφη υπήρχε αρκετή πληροφορία από τον ουρανό, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαδικασία της απομάκρυνσης θορύβου. Επίσης, αρκετός θόρυβος υπήρχε και λόγω των σκαλωσιών, στις κοντινές εικόνες. Λόγω του ότι ο θόρυβος αυτός δεν βρισκόταν μόνο γύρω και μακριά από το νέφος, αλλά και πάνω σε αυτό, αποφασίστηκε και εκεί η τοποθέτηση масκών.



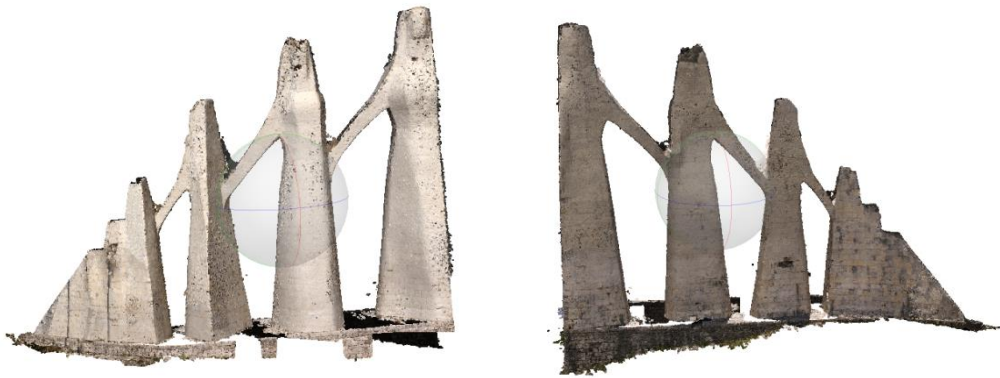
Εικόνα 4 - 47: Θόρυβος στο πυκνό νέφος σημείων



Εικόνα 4 -48: Θόρυβος στο πυκνό νέφος σημείων

Με τις μάσκες τα νέφη που θα δημιουργηθούν θα έχουν μόνο την πληροφορία που απαιτείται και το μετέπειτα καθάρισμα θα αποτελεί πλέον μια εύκολη και καθόλου χρονοβόρα διαδικασία.

Τα αποτελέσματα των dense cloud παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε chunk.



Εικόνα 4 - 49: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 1

{Με επεξεργασμένη φωτεινότητα για την εύκολη ανάγνωσή τους }



Εικόνα 4 - 50: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 2



Εικόνα 4 - 51: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 3



Εικόνα 4 - 52: Πυκνό νέφος σημείων – chunk 4 Εικόνα 4 - 53: Πυκνό νέφος σημείων – chunk 7



Εικόνα 4 - 54: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 5



Εικόνα 4 - 55: Πυκνά νέφη σημείων της δυτικής και ανατολικής όψης – chunk 6

Έπειτα από τη διαδικασία παραγωγής των dense cloud για κάθε chunk μεμονωμένα, αποφασίστηκε να γίνει μια προσπάθεια δημιουργίας ολικού πυκνού νέφους σημείων. Όμως, το αποτέλεσμα που δημιουργήθηκε δεν ήταν το επιθυμητό. Ορισμένα μέρη του μνημείου είχαν αρκετή απόκλιση, δηλαδή απόσταση, μεταξύ τους και η συνένωσή τους δεν δημιουργούσε ένα αξιόπιστο τελικό παράγωγο. Για αυτό το λόγο, κρίθηκε καλύτερο και η διαδικασία παραγωγής επιφανειών να πραγματοποιηθεί για κάθε chunk ξεχωριστά.

4.2.2 Παραγωγή 3D μοντέλου επιφάνειας – Geomagic Wrap

Η περαιτέρω επεξεργασία των πυκνών νεφών σημείων, καθώς και η δημιουργία τρισδιάστατης επιφάνειας, πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Geomagic Wrap. Πριν την παραγωγή τρισδιάστατης επιφάνειας (wrapping), πρέπει να γίνει “καθάρισμα” όλων των dense cloud. Για την αφαίρεση του θορύβου από κάθε πυκνό νέφος σημείων, χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές reduce noise και select outliers. Η εντολή reduce noise επιλέγει τα σημεία με τη μεγαλύτερη απόκλιση από την επιφάνεια του αντικειμένου, δηλαδή τα σημεία που δεν ανήκουν (ακουμπούν) σε αυτή. Επιλέχθηκε η παράμετρος Free-from-shapes, η οποία αφορά σχήματα ελεύθερης μορφής διατηρώντας το ανάγλυφο του αντικειμένου. Επίσης, στην εντολή αυτή ορίζεται το επίπεδο της ομαλότητας σε κλίμακα εύρους 0-4. Δεδομένου ότι το αντικείμενο μελέτης είναι αρκετά επίπεδο, έχοντας όμως μικρές λεπτομέρειες που δεν θα πρέπει να χαθούν (π.χ. αρμοί), θεωρήθηκε κατάλληλο επίπεδο ομαλότητας με κλίμακα 1.

Έπειτα, εφαρμόστηκε η εντολή select outliers κατά την οποία επιλέγονται σημεία που βρίσκονται εκτός εύρους, το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη μέσω του ορισμού ενός ποσοστού που εκφράζει την παράμετρο ευαισθησίας. Outliers είναι τα σημεία που δεν είναι σωστά βάσει της απόκλισής τους από το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας ή την απόστασή τους από τα γειτονικά σημεία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήθηκε κατάλληλο το ποσοστό ευαισθησίας 100%, δεδομένου ότι ήταν αρκετός ο θόρυβος στα νέφη. Ωστόσο, πάντα πραγματοποιείται έλεγχος των σημείων που επιλέγει η εντολή, καθώς ορισμένα σημεία που θεωρούνται θόρυβος από το πρόγραμμα, μπορεί να είναι χρήσιμα για τον χρήστη. Η τελευταία εντολή που χρησιμοποιείται, πριν παραχθεί η τρισδιάστατη επιφάνεια, είναι η Uniform. Με αυτή την εντολή μειώνεται ο αριθμός των σημείων του νέφους, με τρόπο ώστε να το νέφος να εξακολουθεί να παρουσιάζει ικανοποιητικά τη μορφή του αντικειμένου με τα σημεία που απομένουν. Στην εντολή αυτή ορίζονται διάφορες παράμετροι από τον χρήστη. Αρχικά, η απόσταση μεταξύ των σημείων στο νέο νέφος ορίστηκε ίση με 5mm. Αυτό συνέβη, λόγω του ότι υπάρχουν λεπτομέρειες όπως οι αρμοί, που θα πρέπει να εμφανίζονται καθαρά στην τελική επιφάνεια. Επίσης, ορίζεται το επίπεδο καμπυλότητας. Η μορφή του αντικειμένου που μελετάται δεν είναι πολύπλοκη και επίσης η επιφάνειά του είναι αρκετά επίπεδη. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε κατάλληλο το επίπεδο καμπυλότητας να οριστεί max (10).

Υστερα από την εφαρμογή όλων των παραμέτρων-εντολών “καθαρισμού” σε κάθε νέφος σημείων και τον έλεγχο της πιστότητας των αποτελεσμάτων, επόμενο βήμα είναι η παραγωγή τρισδιάστατης επιφάνειας.

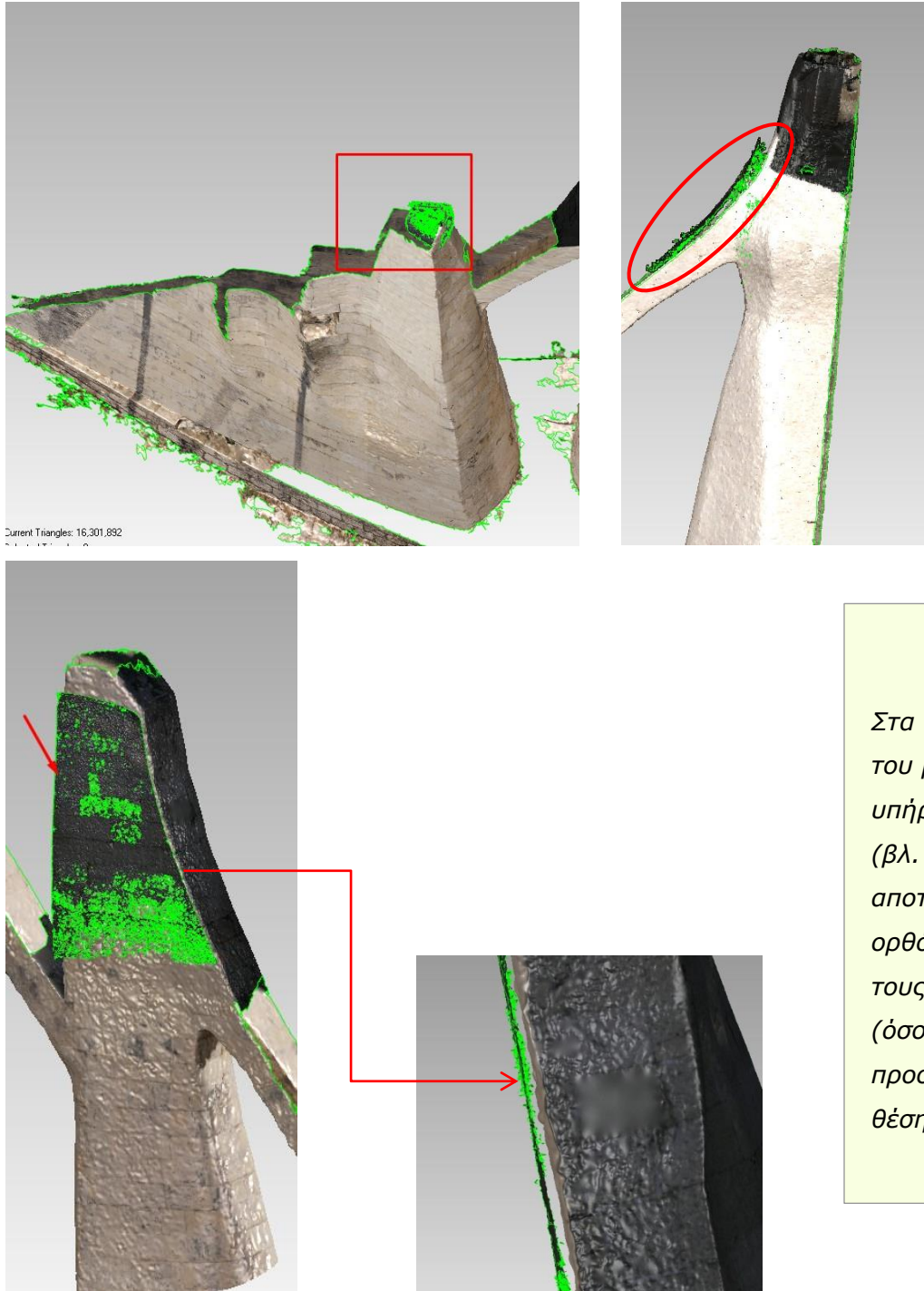
Ειδικότερα, δημιουργήθηκε η επιφάνεια για κάθε νέφος σημείων (και για τα οκτώ chunks ξεχωριστά) με την εντολή Wgap. Μέσω της εντολής αυτής κατασκευάζονται τρίγωνα μεταξύ των σημείων του νέφους.

Αφού δημιουργήθηκαν οι 8 επιφάνειες κάθε chunk, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί η συνένωσή τους, προτού εφαρμοστούν εντολές για τη διόρθωσή τους.

Παρατηρώντας τις επιφάνειες, επιλέχθηκαν από κάθε chunk τα τμήματα επιφανειών, τα οποία παρέχουν σωστή και ακριβή πληροφορία.

Έτσι, επιλέχθηκαν οι επιφάνειες όλων των κεφαλιών που παρήχθησαν από τις κοντινές εικόνες, ενώ οι κορμοί των μορφών από τις μακρινές.

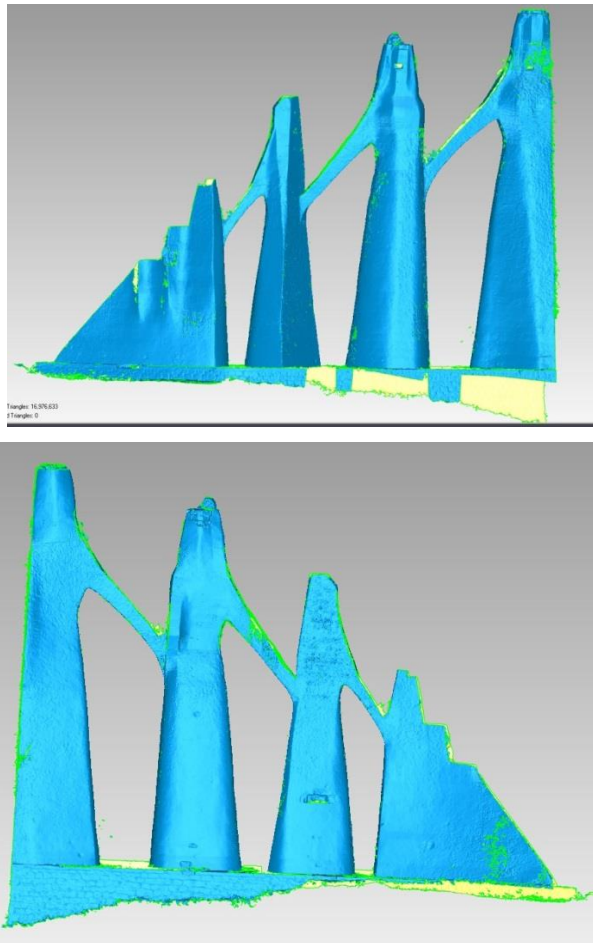
Ωστόσο, οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν στα chunk 4 (πάνω μέρος χεριού πρώτης μορφής), chunk 7 (κεφάλι τέταρτης μορφής) και chunk 6 (μόνο η πλάτη, που βρίσκεται στην ανατολική όψη), δεν χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της τελικής τρισδιάστατης επιφάνειας. Οι επιφάνειες αυτές κρίθηκε ότι δεν είναι σωστές, διότι δεν έχουν προσανατολιστεί ορθά οι εικόνες τους, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω στο κεφάλαιο 4.2.1 .



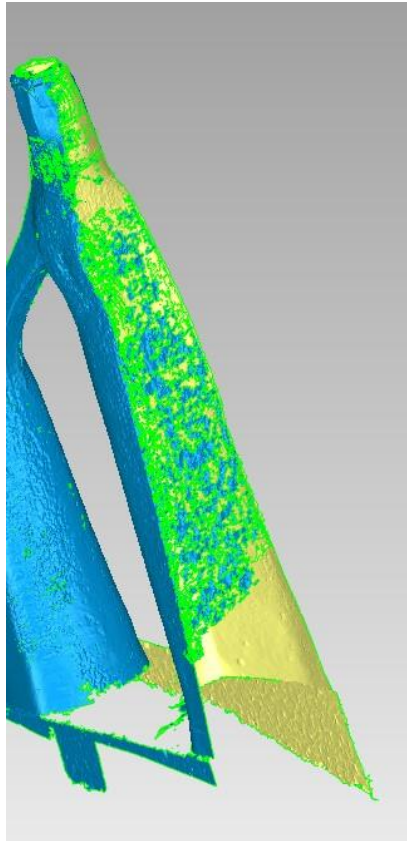
Στα τρία αυτά τμήματα του μνημείου, δεν υπήρχαν φωτοσταθερά (βλ. Κεφάλαιο 4.2.1), με αποτέλεσμα να μην είναι ορθός ο προσανατολισμός τους. (όσον αφορά τον προσανατολισμό της θέσης των εικόνων).

Εικόνα 4 - 56: Προβλήματα στη συνένωση επιφανειών

Κατά τη διαδικασία της συνένωσης των υπόλοιπων chunk μεταξύ τους, παρατηρήθηκε μια μικρή απόκλιση μεταξύ των μικρών chunk και του μεγάλου chunk (chunk 1). Οι επιφάνειες των chunk που απεικονίζουν τα κεφάλια των μορφών, παρουσίαζαν μια μικρή μετατόπιση σε σχέση με την επιφάνεια που απεικονίζει τους κορμούς τους. Αυτό συμβαίνει, λόγω της έλλειψης επικαλύψεων στις εικόνες των πάνω μερών με των κάτω, καθώς και λόγω του ότι οι μετρήσεις των φωτοσταθερών έγιναν σε διαφορετικές εποχές (κατά την πρώτη φάση μετρήθηκαν τα φωτοσταθερά των κορμών, ενώ κατά τη δεύτερη φάση έγιναν η τοποθέτηση και οι μετρήσεις των φωτοσταθερών των κεφαλιών). Τέλος, οι μετρήσεις των φωτοσταθερών των κεφαλιών, έχουν πραγματοποιηθεί από το έδαφος, δηλαδή από πολύ μεγάλη απόσταση (οριζόντια και κατακόρυφη). Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να δημιουργεί μεγάλη αβεβαιότητα στις συντεταγμένες τους. Η μετακίνηση των chunk έγινε με την εντολή Global registration. Τέλος, ύστερα από τη μετακίνησή τους, ενώθηκαν οι επιφάνειες των κεφαλιών με την επιφάνεια των κορμών και δημιουργήθηκε η ολική επιφάνεια του μνημείου. Το αποτέλεσμα της ένωσης των επιμέρους chunk και της δημιουργίας μιας συνολικής τρισδιάστατης επιφάνειας απεικονίζονται παρακάτω:

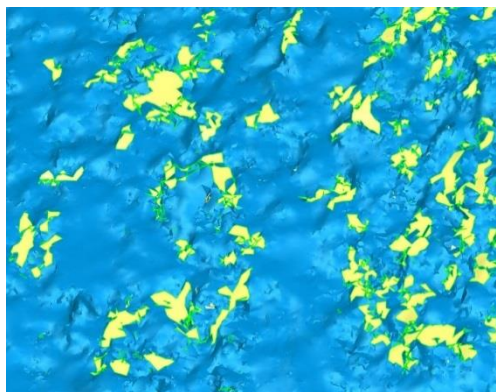


Εικόνα 4 - 57: 3D επιφάνειες δυτικής και ανατολικής όψης, πριν την επεξεργασία τους



Εικόνα 4 - 58: 3D επιφάνεια νότιας όψης, πριν την επεξεργασία της

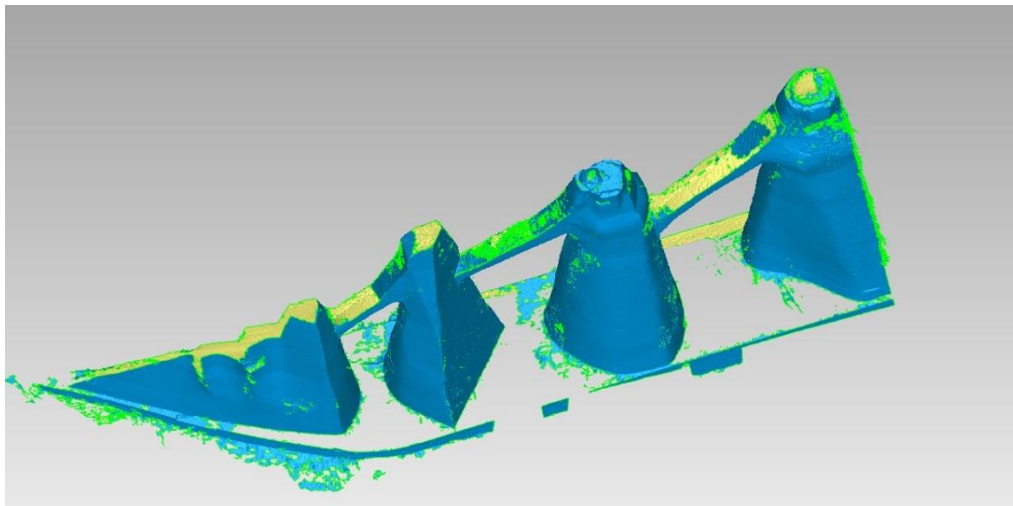
Παρατηρείται ότι στο μοντέλο έχουν προκύψει τρύπες, οι οποίες απεικονίζονται με πράσινο περίγραμμα. Στα σημεία αυτά τα τρίγωνα είναι ανεστραμμένα, τέμνονται και πρέπει να σβηστούν.



Εικόνα 4 - 59: Λάθος τρίγωνα – δημιουργία τρυπών

Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Fill Single. Με την εντολή αυτή, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, αφού καθαρίσει και σβήσει τα λάθος τρίγωνα, να κλείσει τις τρύπες με τέτοιο τρόπο που να διατηρείται η μορφή και γεωμετρία του αντικειμένου. Ωστόσο, όσον αφορά στη νότια όψη, που δεν έχει δημιουργηθεί σωστή επιφάνεια, λόγω έλλειψης εικόνων, αποφασίστηκε να σβηστούν όλα τα λάθος τρίγωνα και να δημιουργηθεί τρύπα.

Μετά το κλείσιμο των μικρών τρυπών της επιφάνειας, έγινε μια προσπάθεια προκειμένου να κλείσουν και οι μεγαλύτερες τρύπες που υπάρχουν στο πάνω μέρος των χεριών, στα κεφάλια των μορφών, στο βάθρο καθώς και στη νότια όψη,. Λόγω του ότι τα τμήματα αυτά θεωρούνται επαρκώς επίπεδα, κρίθηκε ότι η συγκεκριμένη διαδικασία θα ήταν εύκολη και εφικτή .

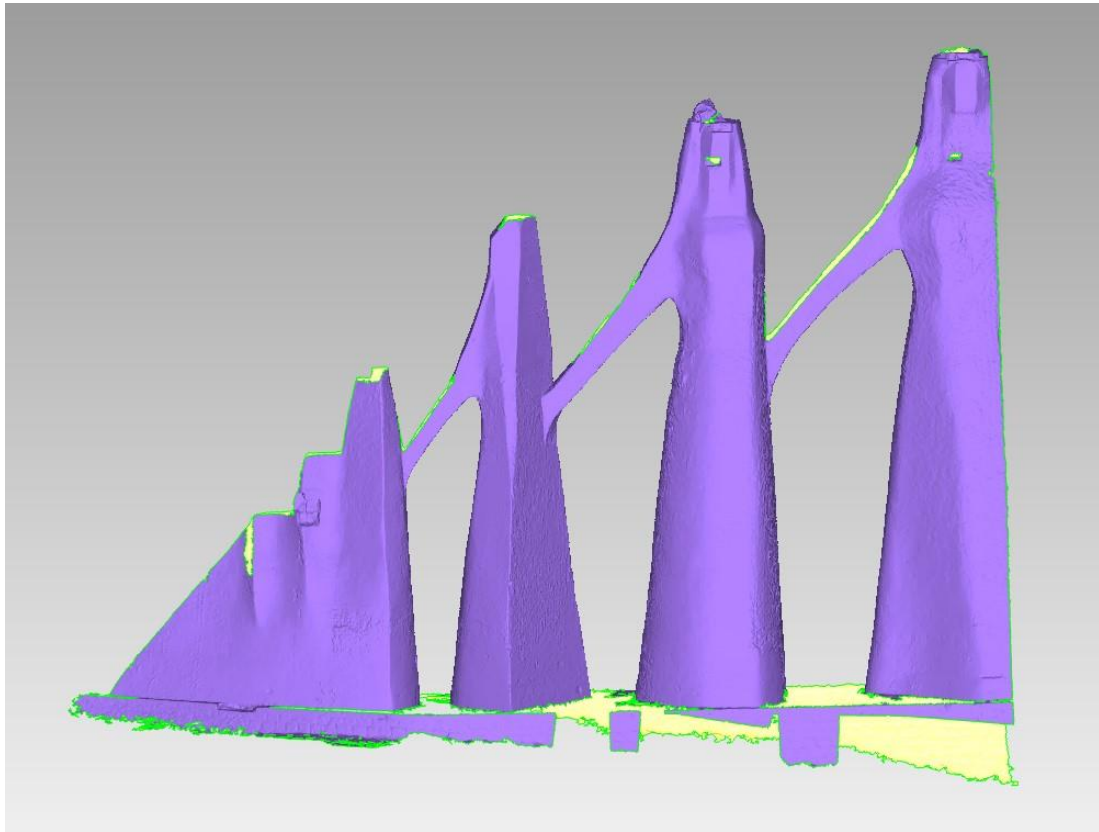


Εικόνα 4 - 60: Τρύπες στην επιφάνεια

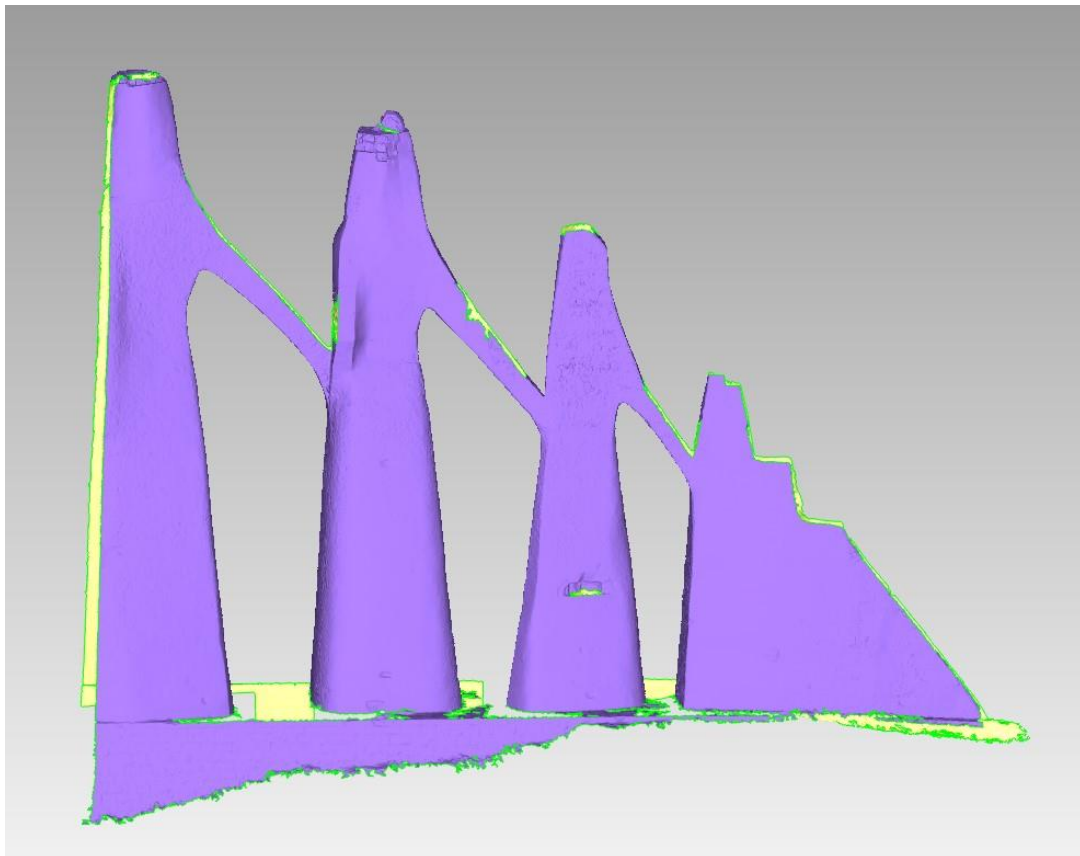
Όμως, στην πορεία ύστερα από το κλείσιμο ορισμένων από αυτές τις τρύπες, διαπιστώθηκε ότι η μορφή των συγκεκριμένων τμημάτων δεν αντιστοιχούσε πλήρως στην πραγματικότητα. Με βάση το συγκεκριμένο συμπέρασμα, καθώς και το ότι σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να αναδειχθούν οι δυνατότητες των αυτόματων μεθόδων στην παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου από ιστορικές εικόνες, θεωρήθηκε ότι είναι καλύτερο το τελικό αποτέλεσμα της επιφάνειας, να μην δεχθεί πολλές και υπερβολικές παρεμβάσεις από τον χρήστη. Έτσι, αποφασίστηκε οι μεγάλες τρύπες, για τις οποίες δεν υπάρχει η απαραίτητη πληροφορία για περαιτέρω επεξεργασία, να παραμείνουν ως έχουν. Για αυτό στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο, θα υπάρχουν τρύπες και κενά, στα κεφάλια των μορφών, στο πάνω μέρος των χεριών τους, στη νότια όψη, στο βάθρο, καθώς και όπου αλλού έχουν δημιουργηθεί τρύπες με μεγάλο βάθος, καθώς δεν υπήρχαν εξ αρχής τα απαραίτητα δεδομένα.

Μια τελική επεξεργασία της επιφάνειας γίνεται με την εντολή *Mesh Doctor*, η οποία δείχνει τις ατέλειες που υπάρχουν στην επιφάνεια και τις διορθώνει. Αρχικά, έτρεξε η εντολή *small components*, κατά την οποία διαγράφονται όλες οι μικρές επιφάνειες (ορίζεται από το χρήστη το μέγεθός τους), οι οποίες δεν ακουμπούν πάνω στην ολική επιφάνεια. Έπειτα, πραγματοποιείται αυτόματη διόρθωση (*auto repair*) για τα τρίγωνα που τέμνονται και που παρουσιάζουν απότομη άνοδο (*self-intersections, spikes, highly creased edges*). Ειδικότερα για την παράμετρο *spikes*, αυτή ορίστηκε με ευαισθησία 70%, επειδή το αντικείμενο θεωρείται αρκετά επίπεδο. Παρατηρώντας, την επιφάνεια μετά την παραπάνω διόρθωση, διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν ακόμη, αρκετά τρίγωνα λάθος, για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να τρέξει και η εντολή *defeature*, κατά την οποία δημιουργούνται τρύπες στα σημεία που τα τρίγωνα μπλέκονται μεταξύ τους και γεμίζει αυτόματα τα κενά. Τελευταία διόρθωση που έγινε ήταν η διαγραφή των τριγώνων που δημιουργούν “τούνελ” (*small tunnels*), δηλαδή βαθουλώματα, τα οποία δεν υπάρχουν στην πραγματική επιφάνεια.

Τελικά αποτελέσματα:



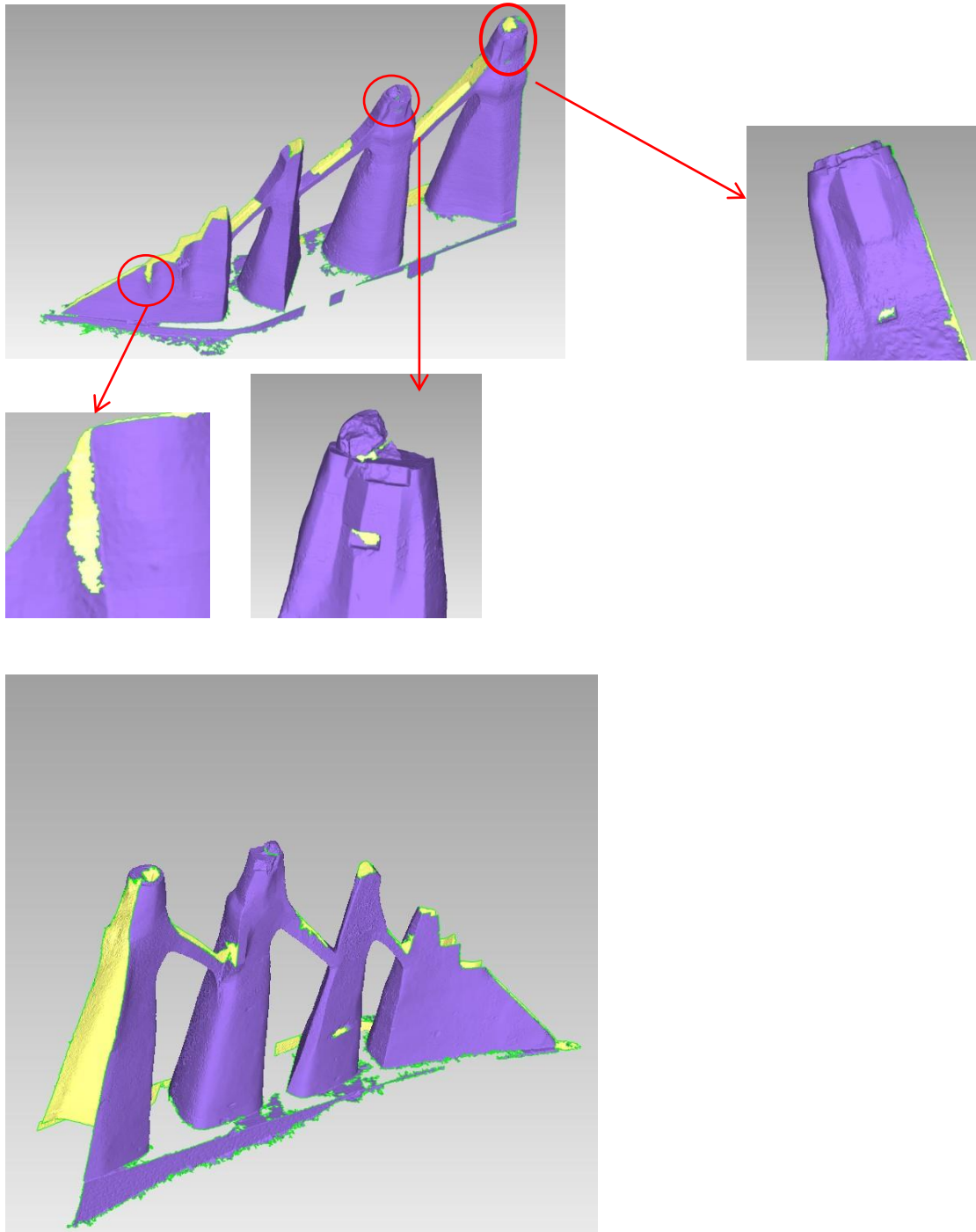
Εικόνα 4 - 61: Τελικό 3D μοντέλο επιφάνειας δυτικής όψης



Εικόνα 4 - 62: Τελικό 3D μοντέλο επιφάνειας ανατολικής όψης

❖ Έλεγχος πιστότητας και πληρότητας της τελικής 3D επιφάνειας**1. Δημιουργία τρυπών**

Με μια γρήγορη, πρώτη ματιά, παρατηρεί κανείς τις μεγάλες τρύπες που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια, και οι οποίες αποφασίστηκε να μην υποστούν επεξεργασία, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 4 - 63: Τρύπες στην τελική 3D επιφάνεια

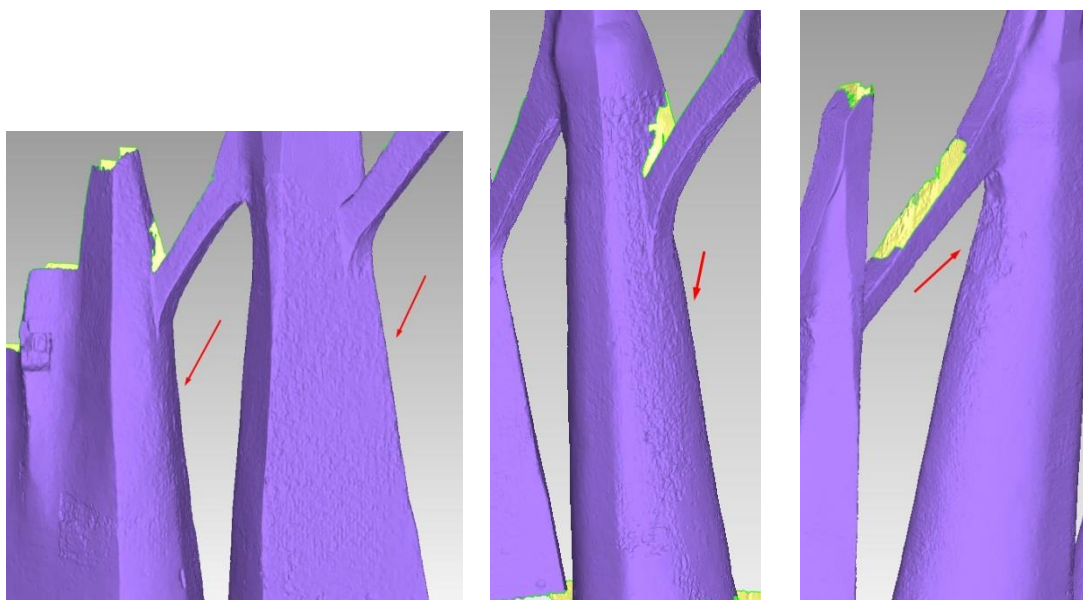
Διαπιστώνεται ότι στο βάθρο, στα κεφάλια όλων των μορφών, στο πάνω μέρος των χεριών τους, σε όλη τη νότια όψη, καθώς και σε σημεία με αρκετό βάθος (περιοχές μνημείου που έχουν υποστεί ζημιές), παρουσιάζονται τρύπες. Αυτό συμβαίνει λόγω έλλειψης εικόνων που θα έδιναν τις απαραίτητες πληροφορίες για την εξαγωγή όλων των λεπτομερειών στο τελικό μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη νότια όψη του μνημείου, καθώς και τμήματα του βάθρου της δυτικής όψης, αυτά δεν αποτυπώθηκαν διότι οι εικόνες που δόθηκαν ως αρχικά δεδομένα ήταν ελάχιστες για τα συγκεκριμένα τμήματα του μνημείου (κάθε κομμάτι της νότιας όψης και του βάθρου απεικονιζόταν μόλις σε μια εικόνα).

Για τα υπόλοιπα τμήματα το γεγονός ότι δεν υπάρχει πληροφορία, οφείλεται στις λίγες εικόνες (π.χ. δύο εικόνες για ένα τμήμα). Αυτά τα τμήματα, μπορεί να φαίνονταν από άλλες μακρινές εικόνες, υπό κλίση, που είχαν σκοπό την απεικόνιση ενός άλλου τμήματος του μνημείου. Για αυτό το λόγο, όση (ελάχιστη) πληροφορία δημιουργείται σε αυτά τα μέρη δεν ήταν ιδιαίτερα σωστή και για αυτό αφαιρέθηκε και παρέμεινε τρύπα στο τελικό αποτέλεσμα.

2. Τραχιά – «Σαγρέ» επιφάνεια

Παρατηρείται ότι σε αρκετά σημεία, κυρίως στα πλαϊνά των κορμών των μορφών, η επιφάνεια είναι αρκετά τραχιά, “σαγρέ”.

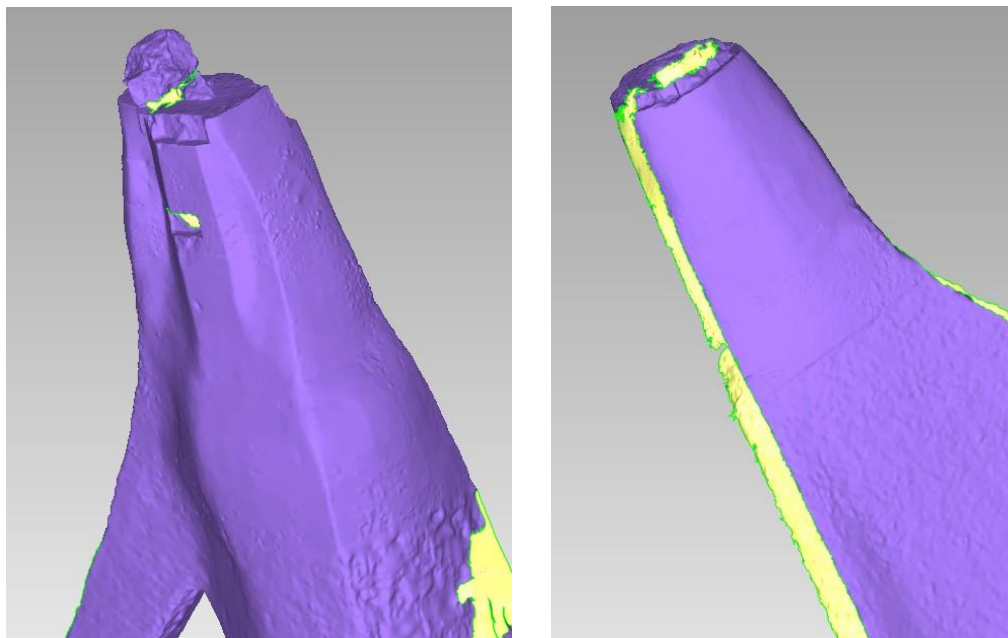


Εικόνα 4 - 64: Τραχιές επιφάνειες σε τμήματα του μνημείου

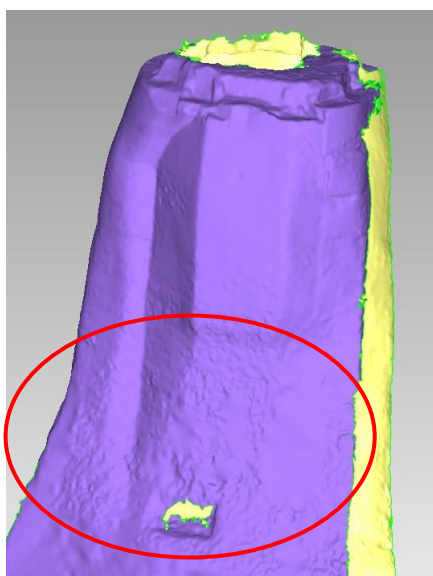
Αυτό εντοπίζεται στα τμήματα για τα οποία δεν υπάρχουν αρκετές – μετωπικές εικόνες, και η πληροφορία τους λαμβάνεται από μακρινές και υπό κλίση εικόνες.

Ωστόσο, τα κεφάλια των μορφών, δεν εμφανίζουν την τραχύτητα που παρουσιάζεται στους κορμούς τους.

Αυτό συμβαίνει επειδή η επιφάνεια των κεφαλιών παρήχθη χρησιμοποιώντας εικόνες μετωπικές, κοντινές και με περισσότερες επικαλύψεις.



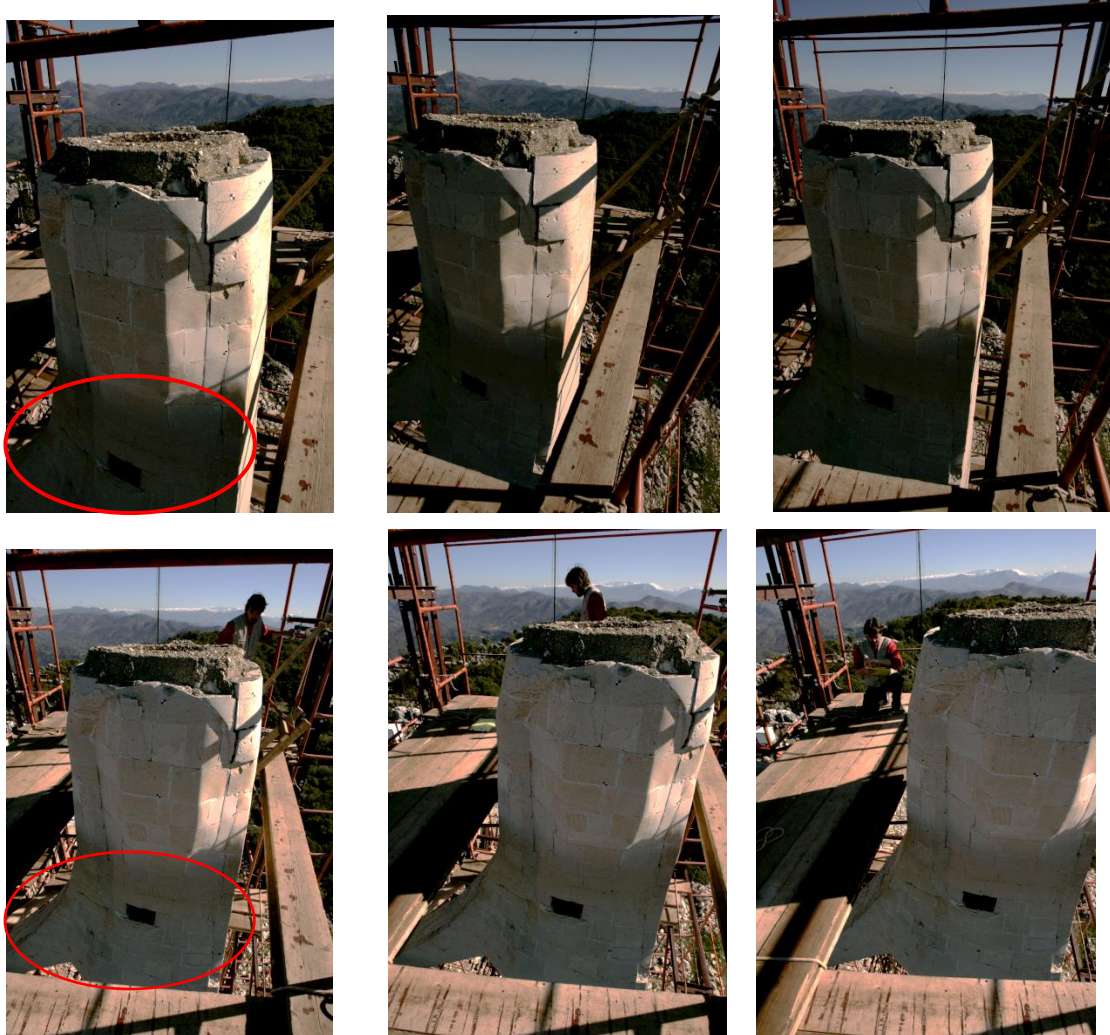
Εικόνα 4 - 65: Διαφορά τραχύτητας μεταξύ των κεφαλιών και των κορμών των μορφών
Εξαιρεση αποτελεί το μπροστινό μέρος του κεφαλιού της πρώτης μορφής.



Εικόνα 4 - 66: Πρόβλημα στην επιφάνεια του κεφαλιού της πρώτης μορφής

Παρότι και για την παραγωγή της συγκεκριμένης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν κοντινές εικόνες, όπως και στα υπόλοιπα κεφάλια, αυτή παρουσιάζει τραχύτητα, κυρίως στο τμήμα που απεικονίζεται με το κόκκινο περίγραμμα.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η μεγάλη διαφορά φωτεινότητας μεταξύ των εικόνων που απεικονίζουν το συγκεκριμένο τμήμα, το οποίο σημειώνεται με κόκκινο χρώμα στις παρακάτω εικόνες.



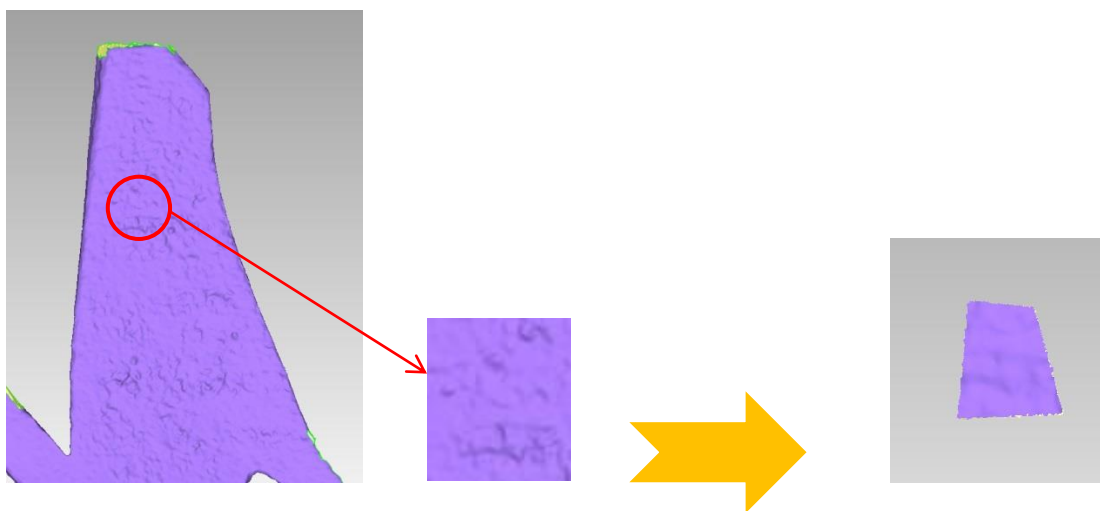
Εικόνα 4 - 67: Εικόνες κεφαλιού πρώτης μορφής

Για τη δημιουργία επιφάνειας στο συγκεκριμένο τμήμα, χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω εικόνες. Συνολικά το τμήμα απεικονίζεται σε 6 εικόνες, εκ των οποίων οι τρεις (πρώτες) έχουν αρκετή σκιά στο σημείο αυτό, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες. Λόγω αυτού, δημιουργείται πρόβλημα στην επιφάνεια. Πιθανή αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος, θα ήταν η χρήση μασκών στις εικόνες με τη σκιά και η δημιουργία επιφάνειας μόνο από τις τρεις (τελευταίες) εικόνες.

Το πρόγραμμα Geomagic δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της τραχύτητας της επιφάνειας. Υπάρχουν διάφορες εντολές στο περιβάλλον του λογισμικού που το επιτυγχάνουν αυτό. Ωστόσο, ύστερα από μια μικρή και σύντομη έρευνα πάνω στις εντολές αυτές, η πιο χρήσιμη φάνηκε να είναι η Sandpaper (γυαλόχαρτο). Η συγκεκριμένη εντολή αποτελεί μια χειροκίνητη διαδικασία εξομάλυνσης της επιφάνειας. Με αυτήν, ο χρήστης πετυχαίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς έχει τον πλήρη έλεγχο καθ' όλη τη διάρκεια της ομαλοποίησής της. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει, είναι ότι αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, και ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων επιφανειών, όπως αυτή του μνημείου των Σουλιωτισσών. Η διόρθωση της τραχύτητας της επιφάνειας, ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής, ωστόσο, παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα στο οποίο παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σε ένα πολύ μικρό τμήμα του μνημείου.

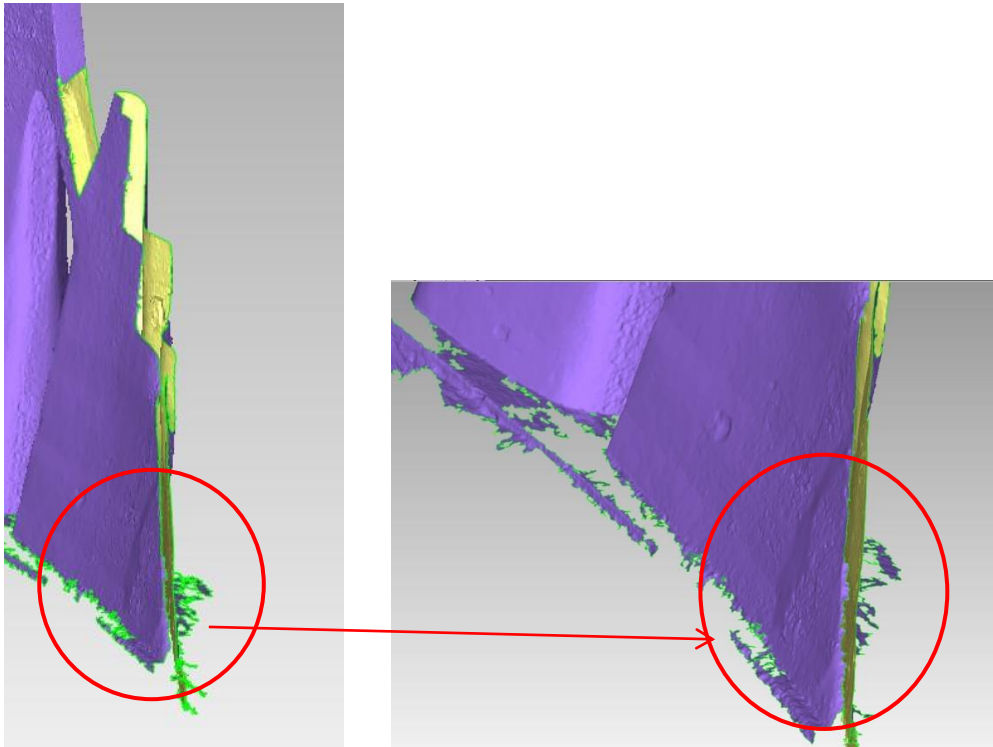


Εικόνα 4 - 68: Εντολή ομαλοποίησης στο πρόγραμμα Geomagic Wrap



Εικόνα 4 - 69: Παράδειγμα εξομάλυνσης τραχύτητας

3. Πρόβλημα στην ανατολική όψη της τέταρτης μορφής του μνημείου



Εικόνα 4 - 70: Πρόβλημα επιφάνειας σε τμήμα της τέταρτης μορφής

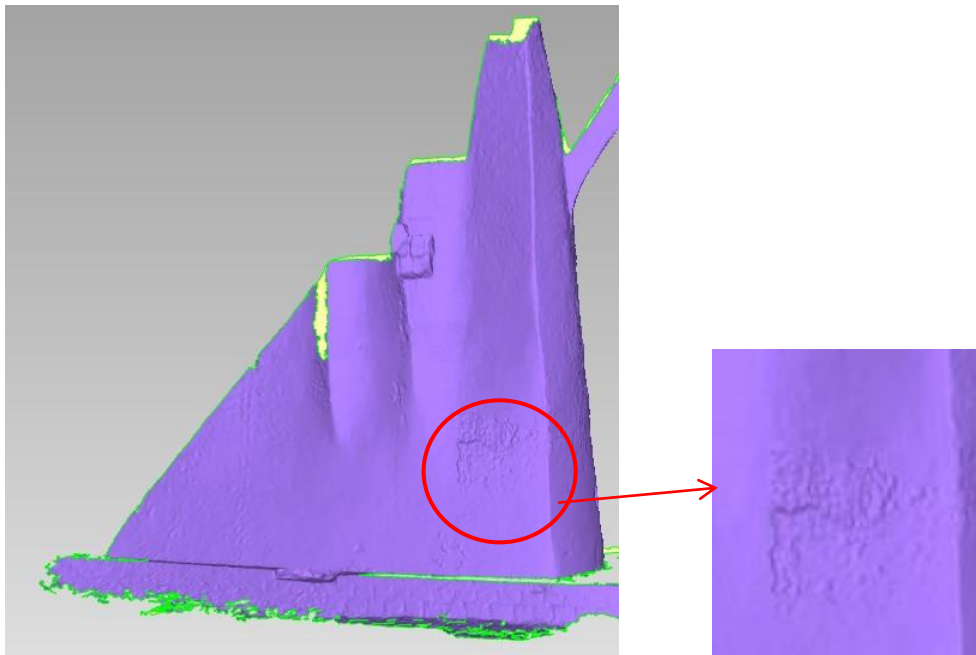
Παρατηρείται μια ελαφριά μετατόπιση του τμήματος που σημειώνεται παραπάνω με κόκκινο χρώμα. Η έλλειψη επαρκούς αριθμού εικόνων, καθώς και η ύπαρξη εικόνων υπό κλίση, για το συγκεκριμένο τμήμα, συντελούν στην εσφαλμένη δημιουργία επιφάνειάς του.



Εικόνα 4 - 71: Εικόνες της τέταρτης μορφής του μνημείου

Το τμήμα αυτό, απεικονίζεται μόνο σε δυο μετωπικές εικόνες, ενώ ένα μικρό κομμάτι του, σε ακόμη μια εικόνα υπό κλίση.

4. Πρόβλημα στη δυτική όψη της τέταρτης μορφής του μνημείου



Εικόνα 4 - 72: Πρόβλημα στην επιφάνεια της δυτικής όψης

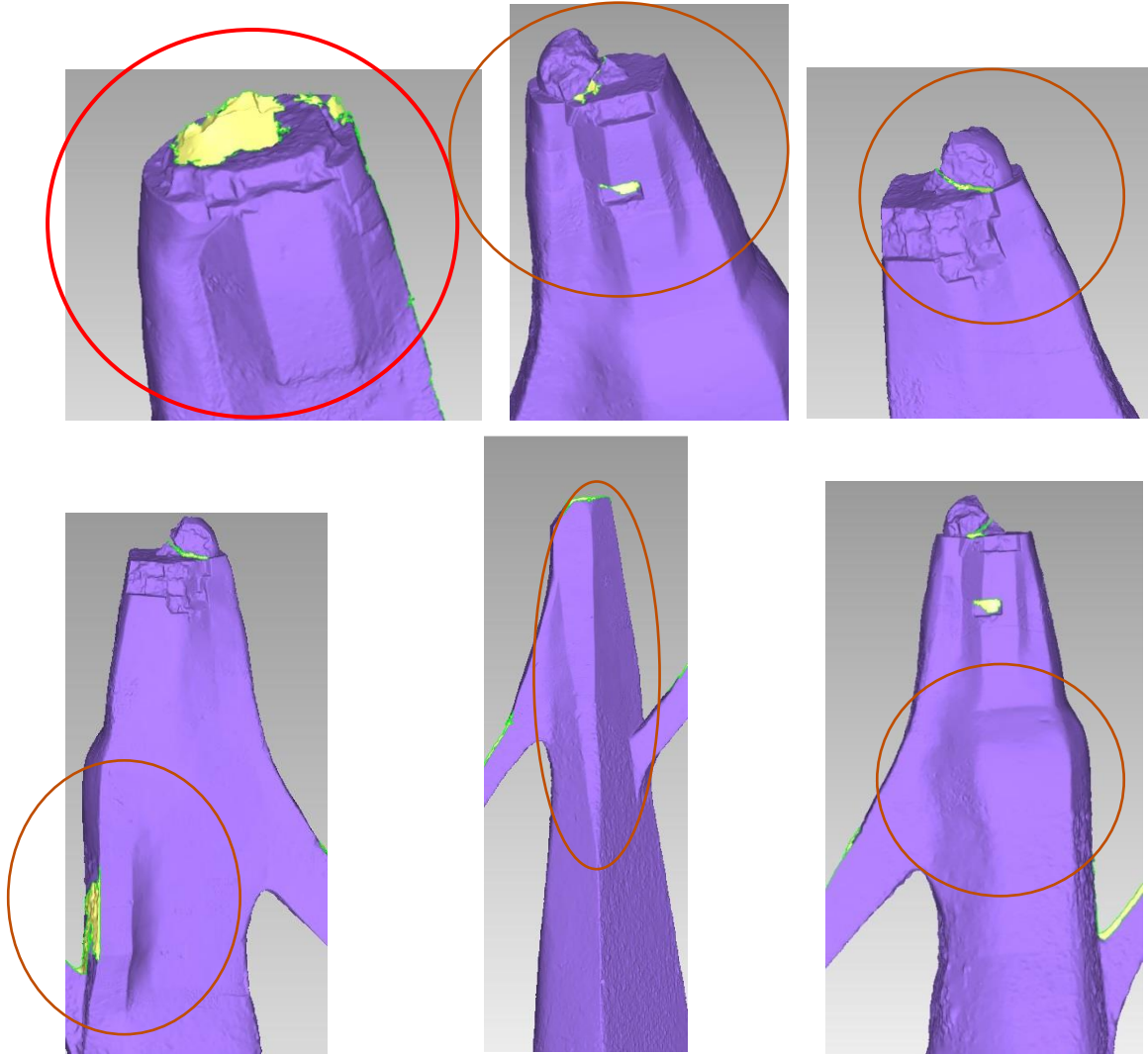
Η προβληματική επιφάνεια, που δημιουργείται στο παραπάνω τμήμα της τέταρτης μορφής του μνημείου, οφείλεται στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της. Οι εικόνες που απεικονίζουν το εν λόγω τμήμα, είναι όλες υπό κλίση, με αποτέλεσμα το λογισμικό να αδυνατεί να βρει σωστά ομόλογα σημεία, γεγονός που δημιουργεί το συγκεκριμένο πρόβλημα.



Εικόνα 4 - 73: Παραδείγματα λήψης εικόνων της δυτικής όψης της τέταρτη μορφής

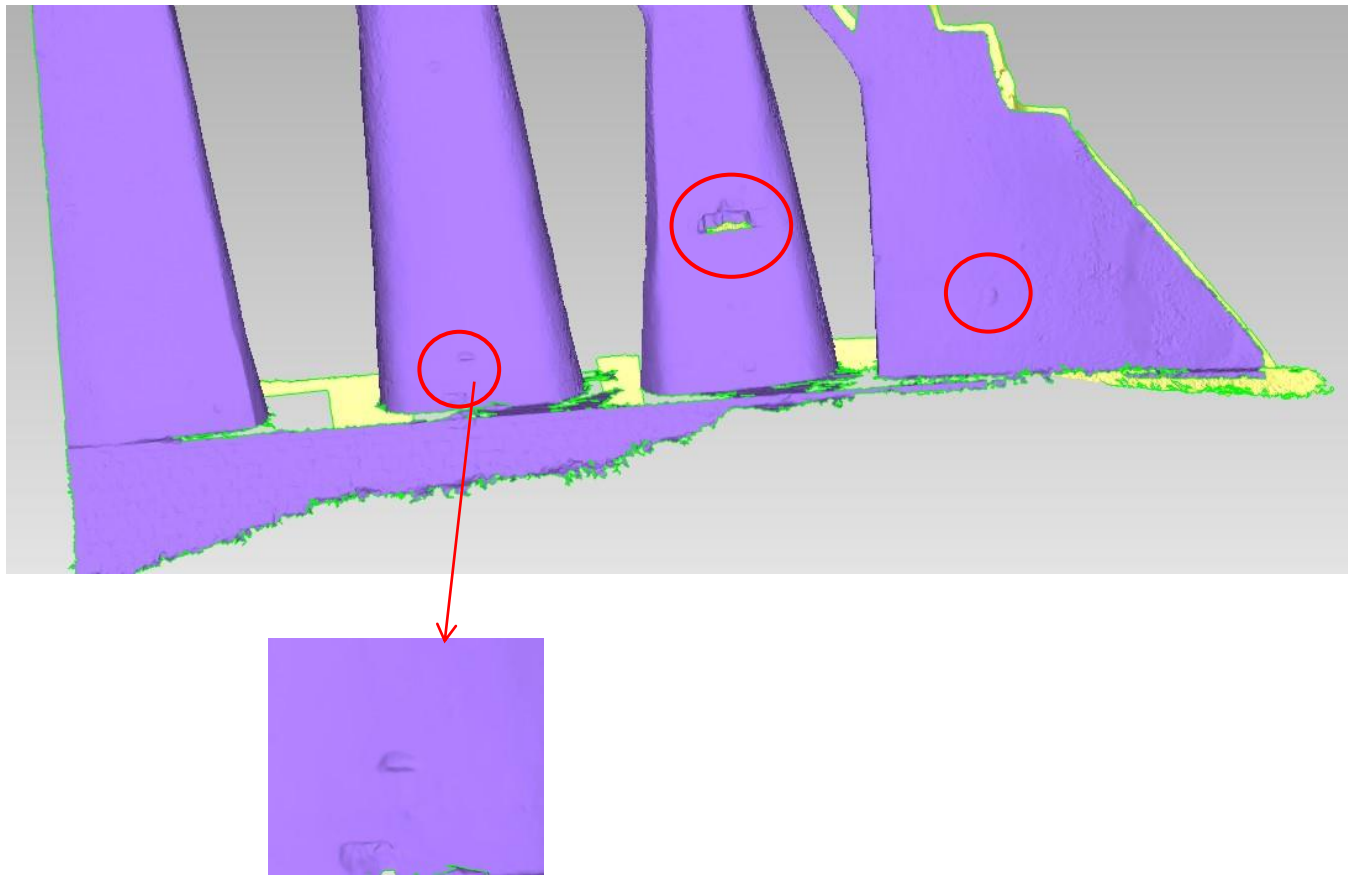
5. Απόδοση λεπτομεριών

Αρκετές λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην τελική επιφάνεια, κυρίως όσον αφορά στα κεφάλια των μορφών του μνημείου, χάρη στις κοντινές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 4 - 74: Αποτύπωση λεπτομερειών στην τελική επιφάνεια

Ωστόσο, και στις μακρινές εικόνες έχουν αποτυπωθεί λεπτομέρειες (όπως βαθουλώματα, σπασίματα).



Εικόνα 4 - 75: Αποτύπωση λεπτομερειών στην τελική επιφάνεια

4.2.3 Παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκού

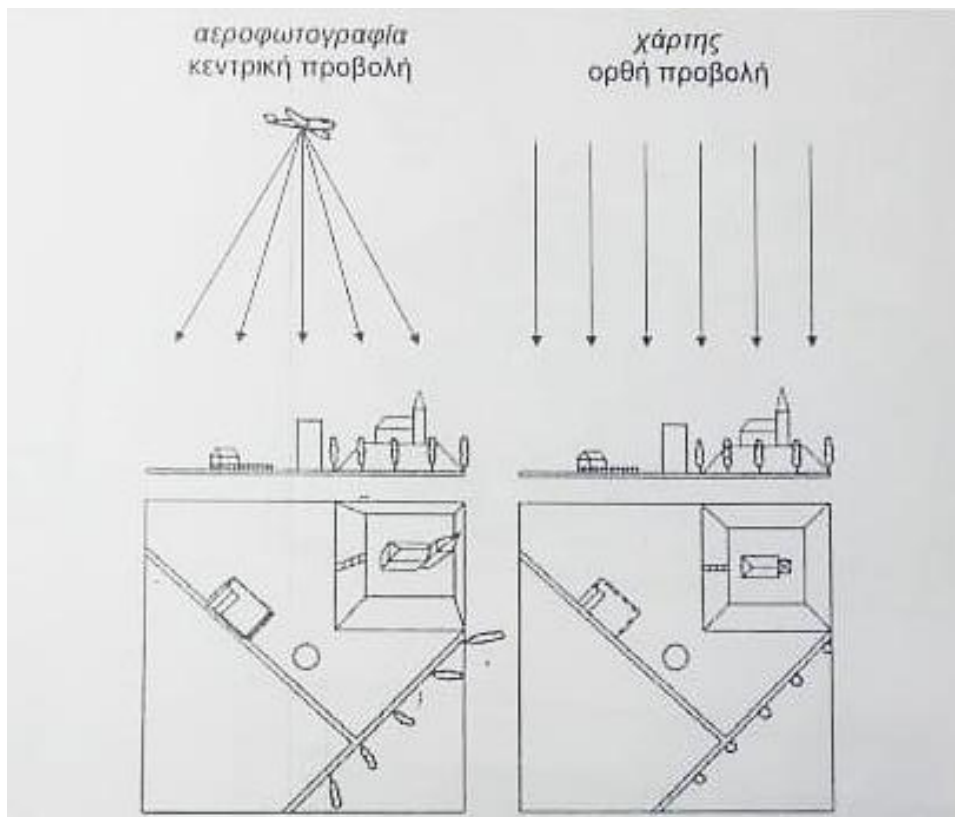
Μετά την αποκατάσταση των προσανατολισμών (εσωτερικού, σχετικού και απόλυτου) των ιστορικών εικόνων και τη δημιουργία ενός συνολικού ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, μπορεί να ακολουθήσει η διαδικασία παραγωγής ορθοεικόνων.

Η διαδικασία δημιουργίας μια ορθοφωτογραφίας αποτελεί την μετάβαση από την κεντρική προβολή μιας εικόνας σε μια νέα εικόνα, στην οποία τα αντικείμενα προβάλλονται στις ορθές τους θέσεις (ορθή προβολή).

Κεντρική προβολή: είναι η προβολή του τρισδιάστατου χώρου σε άλλον τρισδιάστατο χώρο μέσω ακτίνων προβολής που διέρχονται από το κέντρο προβολής.

Ορθή προβολή: είναι η προβολή του τρισδιάστατου χώρου σε επίπεδο μέσω ευθειών κάθετων στο επίπεδο προβολής (Πέτσα, 2000).

Η μεταβλητή κλίμακα, που είναι εγγενής στην κεντρική προβολή, έχει ως άμεση συνέπεια προοπτικές παραμορφώσεις της απεικόνισης που προκαλούν την εκτροπή λόγω αναγλύφου, δηλαδή το να καταγράφονται στην εικόνα στοιχεία και των τριών διαστάσεων του χώρου και όχι μόνο των δύο, όπως συμβαίνει στην ορθή προβολή (Πέτσα, 2000).



Εικόνα 4 -76: Διαφορές μεταξύ κεντρικής και ορθής προβολής

Πηγή: Πέτσα 2000

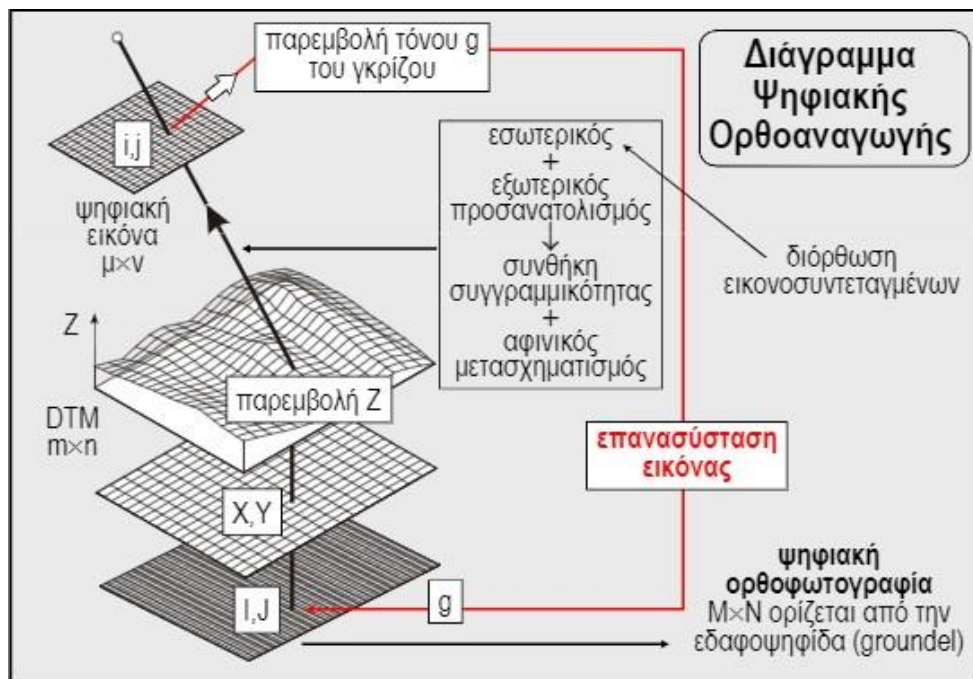
Μια εικόνα η οποία είναι ορθή προβολή της περιοχής που απεικονίζει, ονομάζεται ορθοφωτογραφία.

Ορθοφωτογραφία είναι μια φωτογραφική εικόνα που έχει αναχθεί διαφορετικά ώστε να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις της αρχικής εικόνας, που οφείλονται στην επίδραση των κλίσεων, στις εκτροπές λόγω αναγλύφου κ.λ.π. Οι κυριότερες ιδιότητές της είναι ότι έχει ενιαία κλίμακα, περιέχει ποιοτική πληροφορία, έχει μετρητική αξιοπιστία και αποτελεί ευέλικτο ψηφιακό προϊόν. Η παραγωγή της διαφορετικά ανηγμένης εικόνας ή ορθοφωτογραφίας είναι σήμερα μια αυτοματοποιημένη ψηφιακή μονοεικονική φωτογραμμετρική διαδικασία, που έχει ως αποτέλεσμα την απεικόνιση του χώρου σε ορθή προβολή. Ακτινική μετατόπιση στην παραγόμενη εικόνα εμφανίζεται μόνον στις οριζοντιογραφικές θέσεις των σημείων των υπερκείμενων της επιφάνειας του εδάφους, π.χ. κτιρίων ή άλλων τεχνικών έργων (Σημειώσεις ορθοφωτογραφίας, μάθημα Φωτογραμμετρία II ΣΑΤΜ).

Για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας, αρχικά απαιτείται ο καθορισμός του επιπέδου προβολής. Η προβολή της ορθοφωτογραφίας, συνήθως γίνεται σε επίπεδο παράλληλο με το κύριο επίπεδο, δηλαδή την μεγαλύτερη επίπεδη επιφάνεια του προς αποτύπωση αντικειμένου. Όσον αφορά στις επίγειες εφαρμογές, δεν είναι δυνατό να υπάρχει μόνο ένα επίπεδο κατάλληλο. Ο καθορισμός του επιπέδου προβολής εξαρτάται από το σχήμα και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, καθώς και από το ποιο είναι το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της ψηφιακής ορθοαναγωγής. Ως δεδομένα εισάγονται οι προσανατολισμοί (εσωτερικός και εξωτερικός) και το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας. Έπειτα, επιλέγεται η περιοχή της ορθοφωτογραφίας, η κλίμακά της, και η εδαφοψηφίδα. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας που θα έχει το τελικό προϊόν προκύπτει από την τελική ανάλυση του προϊόντος.

Η διαδικασία της ορθοαναγωγής ξεκινά από το πάνω-αριστερό ρικελ της ορθοφωτογραφίας. Εντοπίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες X, Y του κέντρου κάθε ρικελ, πραγματοποιείται παρεμβολή στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τον υπολογισμό του αντίστοιχου υψομέτρου Z . Εφαρμόζεται αντίστροφα η συνθήκη συγγραμμικότητας για τον υπολογισμό των συντεταγμένων της εικόνας (x, y) . Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο αντίστροφος αφινικός μετασχηματισμός για να υπολογίσει τη θέση i, j στην αρχική ψηφιακή εικόνα, από όπου υπολογίζεται η τιμή του τόνου του γκρι μέσω κάποιας μεθόδου παρεμβολής (Καρράς, 2017).



Εικόνα 4 -77: Διάγραμμα ψηφιακής ορθοαναγωγής

Πηγή: Καρράς 2017

Τέλος, η δημιουργία του τελικού ορθοφωτομωσαϊκού περιλαμβάνει τον ακριβή προσδιορισμό των τμημάτων των αναχθεισών εικόνων από τα οποία θα απαρτίζονται τα φύλλα των ορθοεικόνων, τη χρήση μοντέλων γεωμετρικής και ραδιομετρικής διόρθωσης των αναχθεισών εικόνων και των ενώσεών τους, την εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης της εικόνας, με χωρικά φίλτρα, ενίσχυση της διαβάθμισης κ.ά. και την προσθήκη της απαραίτητης διανυσματικής πληροφορίας, όπως σύμβολα, ονοματολογία, υψομετρικές καμπύλες κ.ά. (Σημειώσεις ορθοφωτογραφίας, μάθημα Φωτογραμμετρία ΙΙ ΣΑΤΜ).

Για την παραγωγή των ορθοεικόνων των ιστορικών εικόνων του μνημείου των Σουλιωτισσών, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Agisoft Metashape, ενώ η δημιουργία των τελικών ορθοφωτομωσαϊκών πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Autocad.

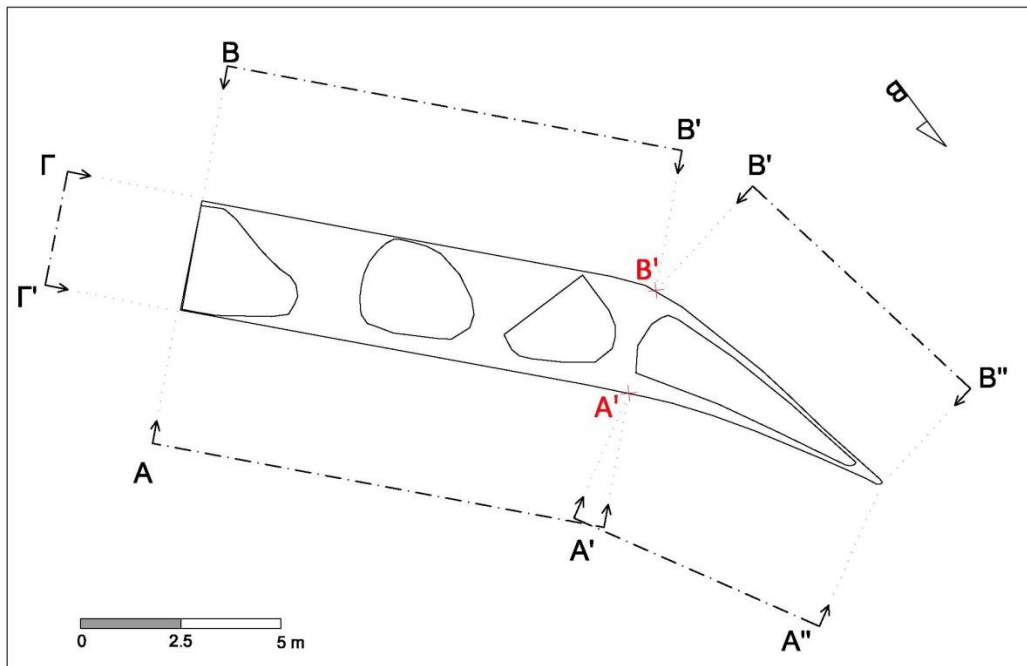
Αρχικά, καθορίστηκαν τα κατάλληλα επίπεδα προβολής, δηλαδή αυτά στα οποία θα υπήρχαν οι μικρότερες παραμορφώσεις. Στην περίπτωση παραγωγής όψεων ενός αντικειμένου, χρησιμοποιούνται σημεία μετρημένα επάνω σε κάθε όψη, ώστε να ορισθεί το επίπεδο που περιγράφει καλύτερα αυτά τα σημεία. Το μνημείο των Σουλιωτισσών αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, τις μορφές και το βάθρο. Οι μορφές είναι ακανόνιστου σχήματος και επομένως τα σημεία τους δεν μπορούν να ορίσουν με ασφάλεια το επίπεδο προβολής των όψεων. Το βάθρο αποτελείται από επίπεδα τμήματα και ειδικότερα: η νότια όψη είναι επίπεδη, ενώ η ανατολική και δυτική όψη του αποτελούνται από 2 τμήματα η κάθε μια, που μπορούν με τη σειρά τους να θεωρηθούν επίπεδα, με σημεία αλλαγής επιπέδων τα Α' και Β', αντίστοιχα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το αζιμούθιο του ίχνους κάθε επιπέδου προβολής και εκτελούνται οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί συντεταγμένων. Το αζιμούθιο του ίχνους των επιπέδων υπολογίζεται με βάση τα δυο σημεία που ορίζουν τη βέλτιστη ευθεία για κάθε όψη. Το αζιμούθιο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε διατρέχοντας το ίχνος προβολής, τα προβαλλόμενα στοιχεία να βρίσκονται αριστερά, έτσι ώστε να ακολουθείται ο κανόνας από τα αρνητικά προς τα θετικά.

Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια αζιμούθια με αυτά που είχαν προσδιοριστεί από την γεωμετρική τεκμηρίωση που είχε πραγματοποιηθεί.

Δεν θα παραχθεί ορθοφωτογραφία για τη νότια όψη του μνημείου, λόγω της έλλειψης απαραίτητων εικόνων για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας, όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όψη	Επίπεδο προβολής	Αζιμούθιο (grad)
Ανατολική όψη	A-A'	111.6878 ^{grad}
	A'-A''	126.4218 ^{grad}
Δυτική όψη	B'-B	311.6878 ^{grad}
	B''-B	342.9144 ^{grad}

Πίνακας 4 - 1: Επίπεδα προβολής για κάθε όψη



Εικόνα 4 - 78: Ίχνη επιπέδων προβολής όψεων

Η παραγωγή των ορθοεικόνων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Agisoft Metashape.

Για την παραγωγή ορθοεικόνων χρησιμοποιείται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η τελική, συνολική επιφάνεια που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Geomagic μόνο για τους κορμούς και το βάθρο των μορφών. Για τα ψηλότερα τμήματα (κεφάλια) δεν ήταν δυνατή η χρήση της, λόγω του ότι η επιφάνεια στα τμήματα αυτά έχει υποστεί μετατόπιση, προκειμένου να ενωθεί με την υπόλοιπη επιφάνεια (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 4.2.2). Επομένως, για την παραγωγή ορθοεικόνων στα εν λόγω τμήματα, δημιουργήθηκαν εκ νέου επιφάνειες στο λογισμικό Agisoft Metashape.

Στη συνέχεια για κάθε ορθοφωτογραφία, ορίστηκε η τρισδιάστατη επιφάνεια, η εδαφοψηφίδα (μικρότερη από 5mm που είναι η απαιτούμενη), καθώς και εισήχθησαν οι συντεταγμένες των τριών σημείων που ορίζουν το κάθε επίπεδο προβολής.

Τα αποτελέσματα των ορθοεικόνων:

❖ Επίπεδο A-A':



Εικόνα 4 - 79: Ορθοεικόνες επιπέδου A-A'

Για την τελική ορθοφωτογραφία του επιπέδου προβολής A-A', θα χρησιμοποιηθεί η συνολική ορθοφωτογραφία, που παρήχθη από τις μακρινές εικόνες και αφορά σε όλα τα τμήματα του μνημείου (στους κορμούς των τεσσάρων μορφών), ενώ για τα κεφάλια των δυο πρώτων μορφών, θα χρησιμοποιηθούν οι ορθοεικόνες που παρήχθησαν από τις κοντινές εικόνες, λόγω του ότι αυτές έχουν καλύτερη ανάλυση και συνεπώς παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες. Η ένωση των ορθοφωτογραφιών θα πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον του Autocad, ενώ οι ραδιομετρικές διορθώσεις θα πραγματοποιηθούν στο Photoshop.

❖ Επίπεδο A'-A'':



Εικόνα 4 - 80: Ορθοεικόνες επιπέδου A'-A''

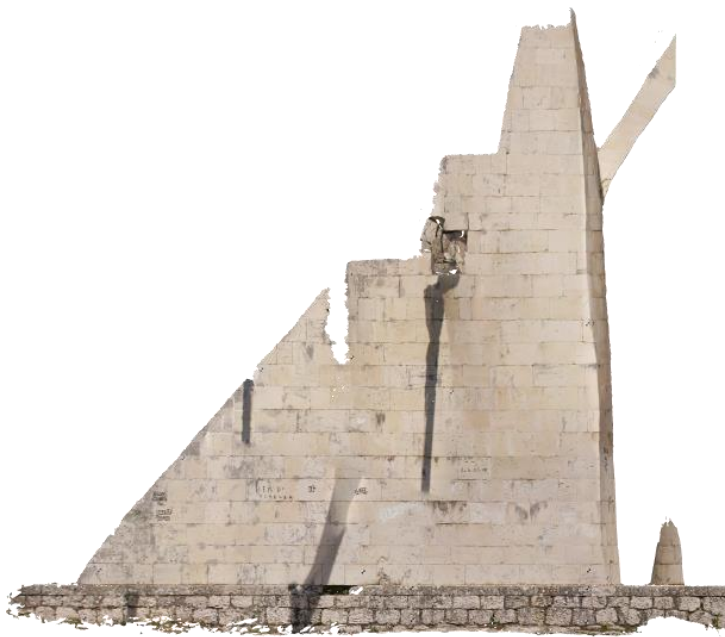
❖ Επίπεδο Β'-Β:



Εικόνα 4 - 81: Ορθοφωτογραφίες επιπέδου Β'-Β

Για τη δημιουργία του ορθοφωτομωσαϊκού του επιπέδου προβολής B'-B, θα χρησιμοποιηθεί η συνολική για όλα τα τμήματα του μνημείου (για τους κορμούς των τεσσάρων μορφών), ενώ για τα κεφάλια των τριών μορφών, θα χρησιμοποιηθούν οι ορθοεικόνες που παρήχθησαν από τις κοντινές εικόνες. Η ένωση των ορθοφωτογραφιών θα πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα Autocad, και στη συνέχεια θα υποστούν επεξεργασία στο περιβάλλον του Photoshop.

❖ Επίπεδο B''-B':

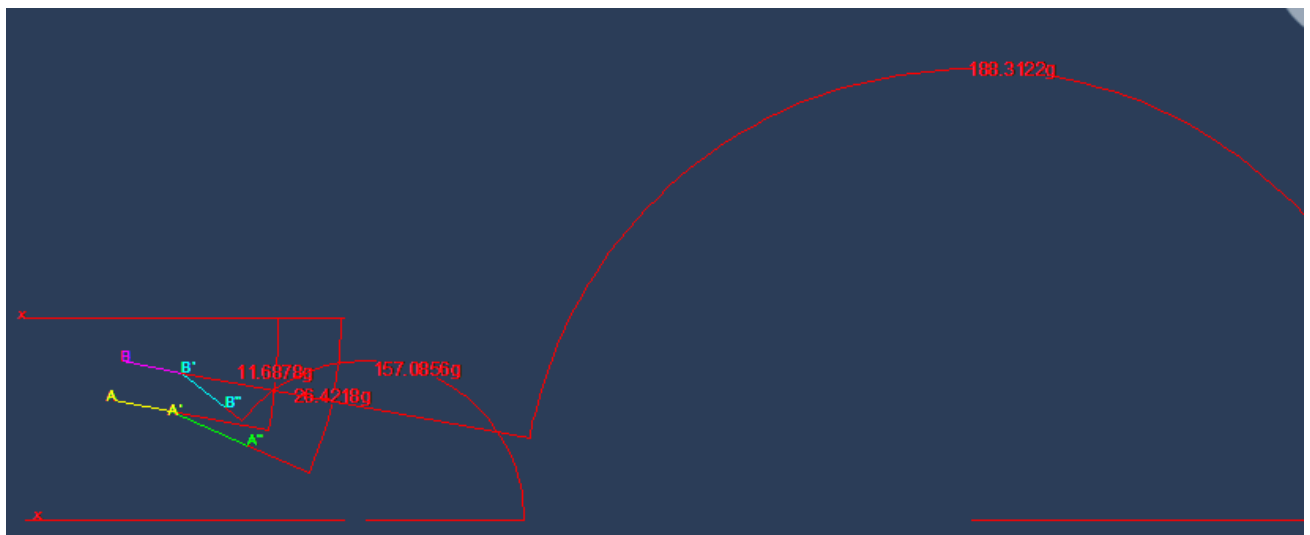


Εικόνα 4 - 82: Ορθοφωτογραφίες επιπέδου B''-B'

Πριν εισαχθούν οι ορθοφωτογραφίες στο Autocad, θα πρέπει οι συντεταγμένες όλων των σημείων (φωτοσταθερών, χαρακτηριστικών, των επιπέδων προβολής) να στραφούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι παράλληλα προς το επίπεδο αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με δυο μετασχηματισμούς.

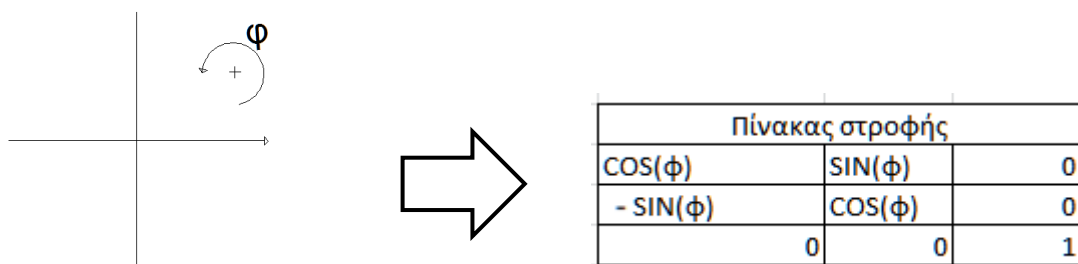
1ος μετασχηματισμός:

Αρχικά τα σημεία έχουν μετρηθεί σε ένα γεωδαιτικό αυθαίρετο σύστημα. Το γεωδαιτικό σύστημα πρέπει να στραφεί προκειμένου να είναι παράλληλο με το ίχνος προβολής. Γίνεται στροφή του γεωδαιτικού συστήματος γύρω από τον άξονα Z κατά γωνία ϕ , έτσι ώστε ο άξονας X να γίνει παράλληλος με το ίχνος του επιπέδου προβολής. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων σε ένα προσωρινό σύστημα. Η γωνία που σχηματίζει ο άξονας των x (γωνίας διεύθυνσης 100^g) με τα επίπεδα προβολής (γωνία διεύθυνσης=αζιμούθιο) είναι η γωνία στροφής ϕ .



Εικόνα 4 - 83: Γωνίες στροφής στο λογισμικό Autocad

Ορίζεται η θετική φορά των γωνιών στροφής και κατ'επέκταση ο πίνακας στροφής που θα χρησιμοποιηθεί.



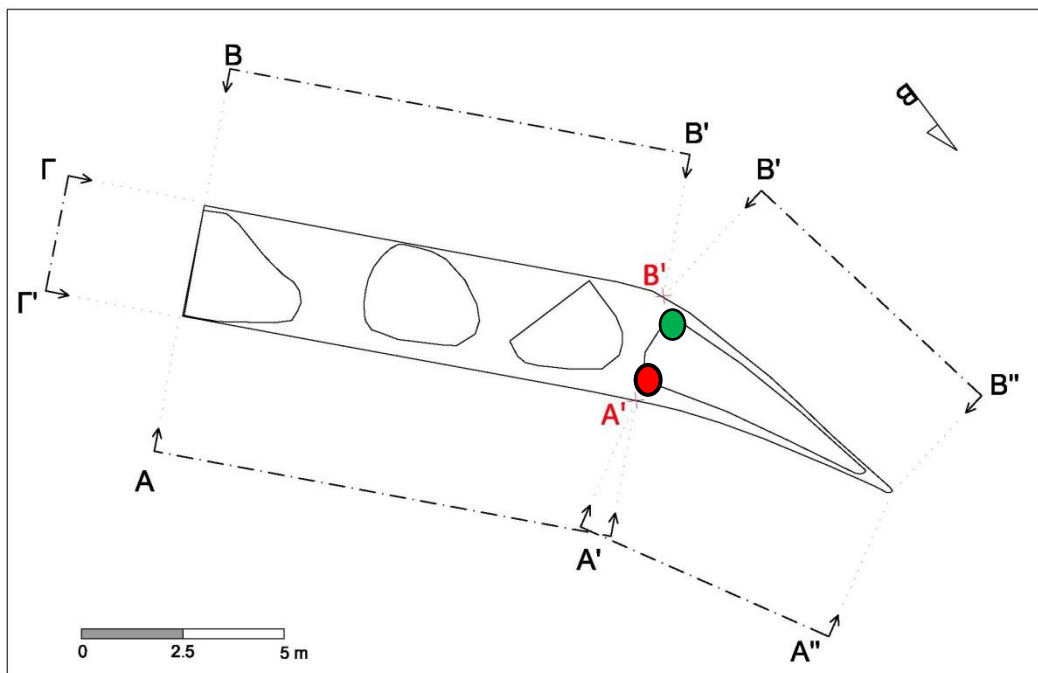
Εικόνα 4 - 84: Σχέση γωνίας στροφής με πίνακα στροφής

Συνεπώς οι γωνίες στροφής:

- για το επίπεδο A-A' $\longrightarrow -11.6878^{\circ}$
- για το επίπεδο A'-A'' $\longrightarrow -26.4218^{\circ}$
- για το επίπεδο B''-B' $\longrightarrow 157.0856^{\circ}$
- για το επίπεδο B'-B $\longrightarrow 188.3122^{\circ}$

Ωστόσο, επειδή κάθε πλευρά του μνημείου αποτελείται από δυο διαφορετικά επίπεδα προβολής, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα με τη στροφή και μετάθεση προκειμένου το τελευταίο σημείο του προηγούμενου τμήματος να συμπίπτει με το πρώτο σημείο του επόμενου τμήματος.

Για αυτό το λόγο, για τα επίπεδα A-A' και A'-A'', επιλέχθηκε το φωτοσταθερό σημείο 5004(κόκκινη βούλα), το οποίο βρίσκεται στην αρχή του επιπέδου A'-A'' και στο τέλος του A-A', ενώ για τα επίπεδα B''-B' και B'-B, επιλέχθηκε το φωτοσταθερό σημείο 5066(πράσινη βούλα), το οποίο βρίσκεται στο τέλος του επιπέδου B''-B' και στην αρχή του B'-B.



Εικόνα 4 - 85: Επίπεδα προβολής-κάτοψη μνημείου

Επομένως, ο πρώτος μετασχηματισμός είναι της μορφής:

$$\begin{array}{|c|} \hline X_{\pi} \\ \hline Y_{\pi} \\ \hline Z_{\pi} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|ccc|} \hline \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ \hline -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline X_{\gamma} \\ \hline Y_{\gamma} \\ \hline Z_{\gamma} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \Delta X \\ \hline \Delta Y \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}$$

Πίνακας 4 - 2: Μετασχηματισμοί στροφής και μετατόπισης

$X_{\pi}, Y_{\pi}, Z_{\pi}$: προσωρινές συντεταγμένες σημείων

φ : γωνία στροφής

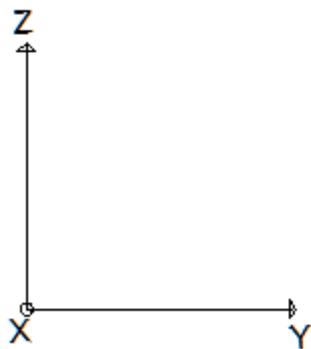
$X_{\gamma}, Y_{\gamma}, Z_{\gamma}$: γεωδαιτικές συντεταγμένες

$\Delta X, \Delta Y$: σημεία μετάθεσης, $\Delta Z=0$ διότι δεν υπάρχει μετατόπιση στον άξονα των Z

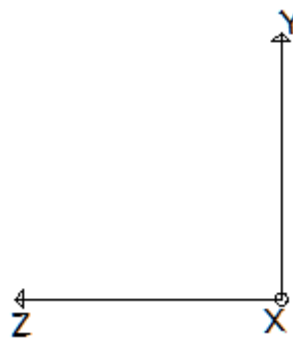
2ος μετασχηματισμός:

Στη συνέχεια πραγματοποιείται στροφή γύρω από τον άξονα X του προσωρινού συστήματος, προκειμένου το επίπεδο XY να γίνει παράλληλο με το επίπεδο προβολής-όψης.

Το γεωδαιτικό σύστημα:



Σύστημα όψης:



Άρα:

Χτελικό = Χπροσωρινό

Υτελικό = Ζπροσωρινό

Ζτελικό = -Υπροσωρινό

Οι ορθοφωτογραφίες, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από τους παραπάνω μετασχηματισμούς, εισήχθησαν στο πρόγραμμα Autocad. Εκεί πραγματοποιήθηκε η τελική σύνθεση των ορθοφωτομωσαϊκών, ενώ στη συνέχεια υπέστησαν επεξεργασία στο λογισμικό Adobe Photoshop. Στο Photoshop πραγματοποιήθηκε ραδιομετρική εξομάλυνση των εικόνων με τη χρήση εργαλείων ραδιομετρικής επεξεργασίας, διότι οι εικόνες είχαν έντονες χρωματικές διαφορές, λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των φωτογραμμετρικών λήψεων (ηλιοφάνεια, συννεφιά, σκιές).

4.2.4 Έλεγχος πιστότητας, πληρότητας και ακρίβειας τελικών προϊόντων

Ο έλεγχος των παραγόμενων προϊόντων για πιθανά σφάλματα και ελλείψεις είναι απαραίτητος. Όπως αναλύεται παρακάτω, λόγω παραλείψεων και γενικά προβληματικών χαρακτηριστικών του προς αποτύπωση αντικειμένου, τα κριτήρια ποιοτικού ελέγχου της ακρίβειας, πληρότητας και πιστότητας έχουν ικανοποιηθεί μερικώς.

Ο έλεγχος για την ακρίβεια πραγματοποιείται εξετάζοντας την εδαφοψηφίδα των τελικών ορθοφωτογραφιών, η απόκλιση της θέσης των φωτοσταθερών με τα αντίστοιχα ίχνη τους στην ορθοφωτογραφία, καθώς επίσης θα χρησιμοποιηθούν σημεία ελέγχου για να αναδειχθεί το κατά πόσο ταυτίζονται με τα ίχνη τους στις ορθοεικόνες. Για όλες τις ορθοφωτογραφίες, χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία, των οποίων οι συντεταγμένες είναι γνωστές και η θέση τους είναι σαφής και διακριτή στα σκαριφήματα που δόθηκαν ως δεδομένα.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2.1, η εδαφοψηφίδα σε όλες τις ορθοεικόνες είναι μικρότερη από την απαιτούμενη των 5mm. Οι υπόλοιποι έλεγχοι για την ακρίβεια θα αναλυθούν παρακάτω, καθώς διαφέρουν ανά επίπεδο προβολής.

Η πιστότητα εκφράζει το κατά πόσο η απεικόνιση του αντικειμένου στα σχέδια ύστερα από όλες τις επεξεργασίες, ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και ο έλεγχος είναι κατά κύριο λόγο οπτικός. Σε ελάχιστες περιοχές η ποιότητα του mesh δεν ήταν η κατάλληλη, με συνέπεια τη δημιουργία θολών και μερικώς παραμορφωμένων απεικονίσεων.

Επίσης, εξετάζεται το κριτήριο της πληρότητας, δηλαδή το κατά πόσο όλα τα στοιχεία αποδίδονται στα τελικά προϊόντα.

Επίπεδο A-A':

Εικόνα 4 - 86: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου A-A'

Για τη δημιουργία του ορθοφωτομωσαϊκού του επιπέδου A-A', έχουν επιλεγθεί οι παραπάνω ορθοεικόνες. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από τέσσερις ορθοεικόνες:

- ✓ μια που απεικονίζει τους κορμούς των δυο πρώτων μορφών και ολόκληρη την τρίτη μορφή. Έχει δημιουργηθεί από την συνολική επιφάνεια που παρήχθη στο Geomagis και από τις μακρινές εικόνες.
- ✓ μια που απεικονίζει το κεφάλι της πρώτης μορφής και δημιουργήθηκε από την επιφάνεια που παρήχθη στο Metashape, για το συγκεκριμένο μέρος του μνημείου και χρησιμοποιώντας τις κοντινές εικόνες.
- ✓ και άλλες δυο, οι οποίες απεικονίζουν το πάνω μέρος του κεφαλιού της δεύτερης μορφής και το ψηλό μέρος του κορμού της. Κάθε μια από αυτές δημιουργήθηκε από την αντίστοιχη επιφάνεια που είχε παραχθεί στο Metashape και από τις αντίστοιχες κοντινές εικόνες.

Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις φωτεινότητες των ορθοεικόνων, λόγω των σκαιών και του ήλιου κατά τη διάρκεια των φωτογραφικών λήψεων. Επίσης, όσον αφορά στην συνολική ορθοφωτογραφία για το επίπεδο αυτό, εντοπίζονται δυο μέρη με ελλιπή πληροφορία, λόγω του ότι στα σημεία αυτά δεν δημιουργήθηκε τρισδιάστατη επιφάνεια.



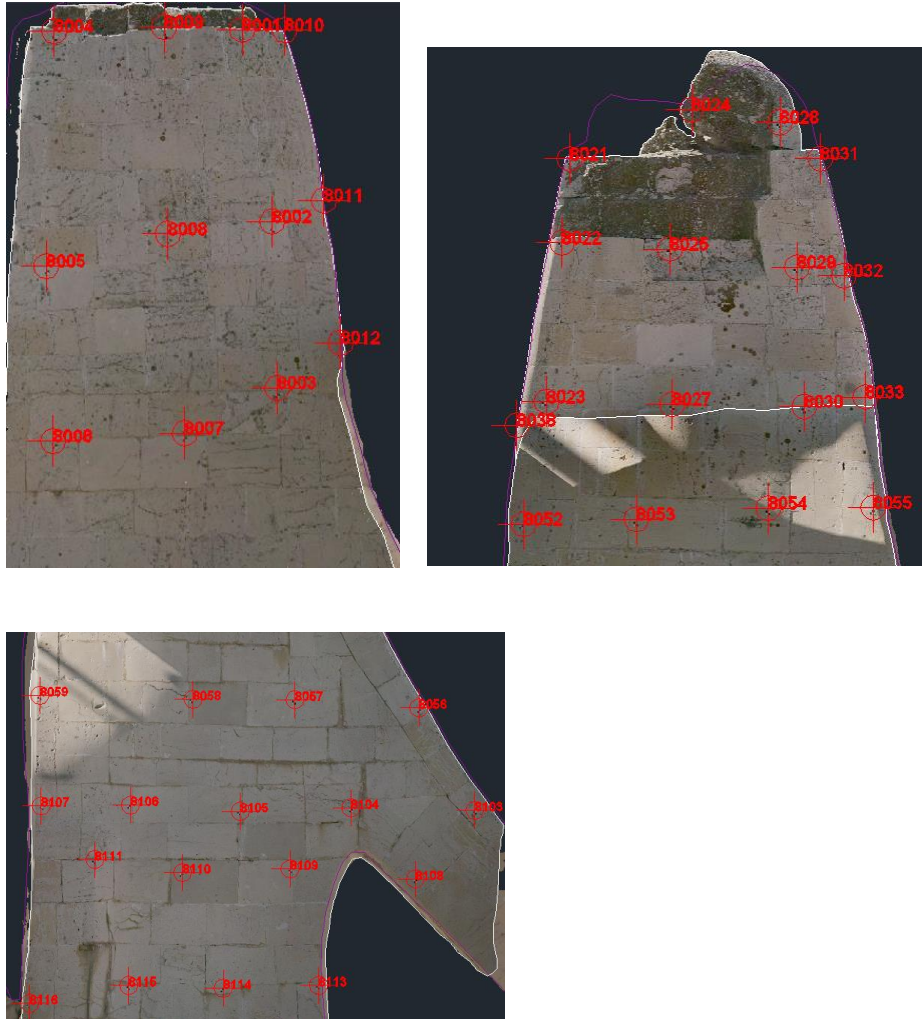
Εικόνα 4 - 87: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου A-A'

Όταν εισήχθησαν οι ορθοεικόνες στο περιβάλλον του Autocad, παρατηρήθηκε μια μικρή απόκλιση των ορθοφωτογραφιών, που αφορούν στα κεφάλια των μορφών, από την συνολική ορθοφωτογραφία. Για αυτό το λόγο χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια μικρή μετατόπιση των ορθοεικόνων αυτών, προκειμένου να ταυτιστούν με την συνολική (δηλαδή με την ορθοφωτογραφία που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις μακρινές εικόνες). Δεν ήταν δυνατό οι ορθοφωτογραφίες να ταυτίζονται και με τα αντίστοιχα φωτοσταθερά τους και με την συνολική ορθοεικόνα. Παρατηρώντας, ταυτόχρονα, τις αντίστοιχες παλιές ορθοφωτογραφίες, εντοπίζεται και σε αυτές αδυναμία ταύτισής τους με τα φωτοσταθερά. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι υπάρχει πρόβλημα με τα συγκεκριμένα φωτοσταθερά και για αυτό το λόγο δεν δόθηκε περαιτέρω σημασία σε αυτά. Επομένως, «νομιμοποιείται» και η μετατόπιση των ορθοεικόνων, προκειμένου αυτές να συμπίπτουν με την συνολική ορθοφωτογραφία.

Ο έλεγχος για την εν λόγω ταύτιση, έγινε ψηφιοποιώντας γραμμικά αρμούς και χαρακτηριστικά σημεία στις ορθοεικόνες που απαιτούνταν κάθε φορά. Οι αποκλίσεις πρέπει να είναι μικρότερες από το γραμμικό σφάλμα, το οποίο είναι ίσο με 1.25cm για την κλίμακα 1:50, που μελετάται. Σε πολλά σημεία οι (πάνω) ορθοεικόνες ταυτίζονται με την ολική (κάτω). Ωστόσο, σε ορισμένα σημεία, υπάρχουν αποκλίσεις της τάξης των 2-3 mm, καθώς επίσης υπάρχουν και λίγα τμήματα στα οποία η απόκλιση να πλησιάζει τα 8mm.

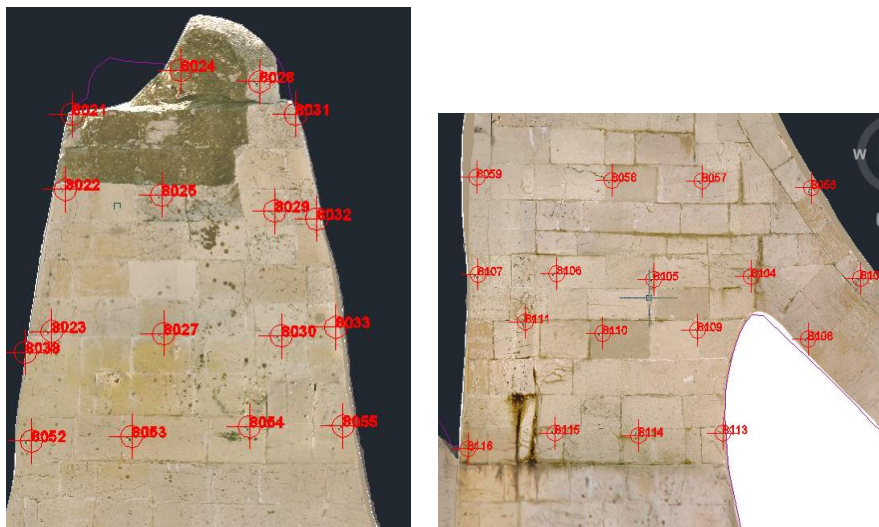
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος χρησιμοποιώντας τα φωτοσταθερά, καθώς και ορισμένα σημεία ελέγχου.

Παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα, γίνεται αντιληπτό ότι τα φωτοσταθερά των κεφαλιών των μορφών δεν συμπίπτουν με το ίχνος τους στις αντίστοιχες ορθοεικόνες.



Εικόνα 4 - 88: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A'

Ωστόσο, κάτι αντίστοιχο παρατηρήθηκε και στις ορθοεικόνες που είχαν παραχθεί με τις κλασικές μεθόδους.



Εικόνα 4 - 89: Φωτοσταθερά στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A'

Με βάση τα παραπάνω, θεωρήθηκε ότι το πρόβλημα εντοπίζεται στη μέτρηση των φωτοσταθερών. Λόγω του ότι τα συγκεκριμένα τμήματα του μνημείου βρίσκονται σε μεγάλο ύψος, η μέτρηση των φωτοσταθερών αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, η οποία μπορεί να επιφέρει σημαντικά σφάλματα, όπως τα παραπάνω.

Για την συνολική ορθοφωτογραφία, δηλαδή αυτή που έχει δημιουργηθεί από τις μακρινές εικόνες θα ελεγχθεί το κατά πόσο τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου, συμπίπτουν με τα αντίστοιχα ίχνη τους στην ορθοφωτογραφία.

Όλα τα φωτοσταθερά, που έχουν χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία προσανατολισμού συμπίπτουν πλήρως με την ορθοφωτογραφία:



Εικόνα 4 - 90: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο A-A'

Επιπρόσθετα, θα γίνει έλεγχος με τη χρήση των σημείων ελέγχου, δηλαδή σημείων με γνωστές συντεταγμένες, τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία των προσανατολισμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ελεγχθούν οι θέσεις των χαρακτηριστικών σημείων πάνω στις ορθοεικόνες. Στα περισσότερα σημεία, οι διαφορές κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως 1cm. Ωστόσο, σε ορισμένα τμήματα, οι διαφορές είναι μεγαλύτερες από την απαιτούμενη γραφική ακρίβεια του 1.25cm, ξεπερνώντας σε ορισμένες περιπτώσεις και τα 2cm. Αυτό οφείλεται στον εσφαλμένο προσανατολισμό των εικόνων. Όμως, αντίστοιχες αποκλίσεις (που ξεπερνούν το 1.25cm) εμφανίζονται σε ορισμένα σημεία και στις παλιές ορθοεικόνες, που είχαν δημιουργηθεί με τις κλασσικές μεθόδους φωτογραμμετρίας. Συνεπώς, υπάρχει περίπτωση οι συγκεκριμένες αποκλίσεις να οφείλονται και σε πιθανά σφάλματα μέτρησης των σημείων αυτών.

Επίπεδο Α'-Α'':



Εικόνα 4 - 91: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου Α'-Α''

Παρατηρώντας την παραπάνω ορθοφωτογραφία, γίνεται αντιληπτό ότι έχουν αποδοθεί όλες οι λεπτομέρειες της τέταρτη μορφής, εκτός από ορισμένα τμήματα του πάνω μέρους, λόγω έλλειψης πληροφορίας στην τρισδιάστατη επιφάνεια.



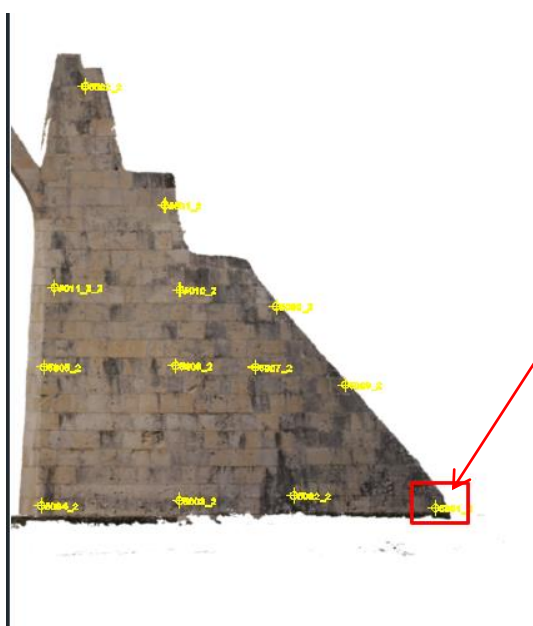
Εικόνα 4 - 92: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου Α'-Α''

Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία προσανατολισμού, συμπίπτουν στα αντίστοιχα ίχνη τους στην ορθοφωτογραφία:



Εικόνα 4 - 93: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επιπέδο Α'-Α''

Ωστόσο, ένα φωτοσταθερό έχει μεγάλη απόκλιση από το ίχνος του πάνω στην ορθοφωτογραφία. Το φωτοσταθερό αυτό βρίσκεται στο παρακάτω τμήμα του μνημείου:

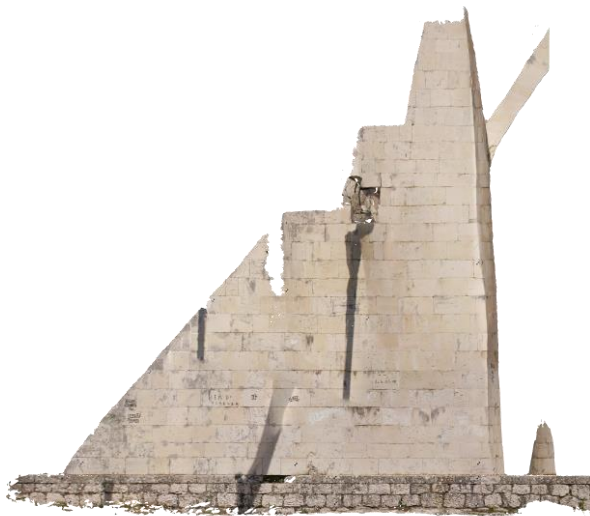


Εικόνα 4 - 94: Σφάλμα σε φωτοσταθερό στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επιπέδο Α'-Α''

Το τμήμα αυτό, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζει πρόβλημα στον προσανατολισμό, λόγω της έλλειψης εικόνων που να το απεικονίζουν.

Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν σημεία ελέγχου, τα οποία είναι τα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία έχουν εισαχθεί με τις συντεταγμένες τους. Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία ελέγχου συμπίπτουν σχεδόν απολύτως με τις αντίστοιχες θέσεις τους στην ορθοφωτογραφία, και οι διαφορές είναι λίγα χιλιοστά.

Επίπεδο Β''-Β':



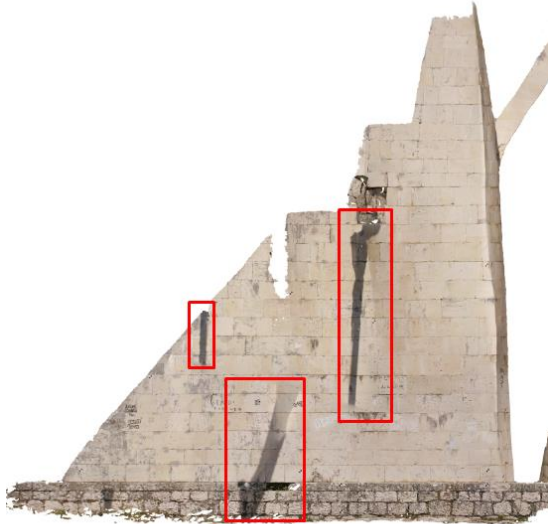
Εικόνα 4 - 95: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου Β''-Β'

Στην παραπάνω ορθοφωτογραφία, παρατηρείται ότι έχουν αποδοθεί σωστά όλες οι λεπτομέρειες του συγκεκριμένου τμήματος του μνημείου, εκτός από τις περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει καθόλου πληροφορία στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.



Εικόνα 4 - 96: Ελλείψεις στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου Β''-Β'

Επίσης, εντοπίζονται οι κατά τόπους σκιές που αποτυπώνονται στην ορθοφωτογραφία αυτή, θα διορθωθούν, στη συνέχεια, ραδιομετρικά στο περιβάλλον του Photoshop.



Εικόνα 4 - 97: Προβλήματα σκaiών στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου B''-B'

Επίσης, στα παρακάτω τμήματα του μνημείου, εντοπίζονται προβλήματα πιστότητας. Για να αποδοθούν σωστά τα συγκεκριμένα τμήματα έπρεπε να υπάρχουν περισσότερες και μετωπικές εικόνες.



Εικόνα 4 - 98: Προβλήματα πιστότητας στην ορθοφωτογραφία του επιπέδου B''-B'

Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία προσανατολισμού, συμπίπτουν στις αντίστοιχες θέσεις τους στην ορθοφωτογραφία:



Εικόνα 4 - 99: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο Β''-Β'

Στην ορθοφωτογραφία αυτή, τα σημεία ελέγχου συμπίπτουν με τις θέσεις τους με διαφορές ελάχιστων χιλιοστών.

Επίπεδο Β'-Β:



Εικόνα 4 - 100: Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου Β'-Β

Για τη δημιουργία του ορθοφωτομωσαϊκού του επιπέδου Β'-Β, έχουν επιλεγθεί οι παραπάνω ορθοεικόνες. Αποτελείται από πέντε ορθοεικόνες:

- ✓ μια που απεικονίζει τους κορμούς και των τριών μορφών. Έχει δημιουργηθεί από την συνολική επιφάνεια που παρήχθη στο Geomagis και από τις μακρινές εικόνες.
- ✓ μια που απεικονίζει μέρος του κεφαλιού της πρώτης μορφής και δημιουργήθηκε από την επιφάνεια που παρήχθη στο Metashape, για το συγκεκριμένο μέρος του μνημείου και χρησιμοποιώντας τις κοντινές εικόνες.
- ✓ άλλες δυο, οι οποίες απεικονίζουν τμήμα του πάνω μέρους του κεφαλιού της δεύτερης μορφής και το ψηλό μέρος του κορμού της. Κάθε μια από αυτές δημιουργήθηκε από την αντίστοιχη επιφάνεια που είχε παραχθεί στο Metashape και από τις αντίστοιχες κοντινές εικόνες.
- ✓ και τέλος μια ορθοφωτογραφία που απεικονίζει το πάνω τμήμα της τρίτης μορφής.

Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις φωτεινότητες των ορθοεικόνων, λόγω των σκaiών και του ήλιου κατά τη διάρκεια των φωτογραφικών λήψεων. Η ραδιομετρική διόρθωση θα πραγματοποιηθεί αργότερα στο λογισμικό Photoshop.

Όταν εισήχθησαν οι ορθοεικόνες στο Autocad, παρατηρήθηκε απόκλιση των ορθοεικόνων, που αφορούν στα κεφάλια των μορφών, με την συνολική ορθοφωτογραφία. Για αυτό το λόγο χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια μικρή μετατόπιση των ορθοφωτογραφιών αυτών, προκειμένου να ταυτιστούν με την ολική (δηλαδή με την ορθοφωτογραφία που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις μακρινές εικόνες). Και σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος με τα φωτοσταθερά, όπως και στο επίπεδο A-A', όπου πάλι δεν λήφθηκαν υπόψιν οι θέσεις των φωτοσταθερών, αφού και στις αντίστοιχες παλιές ορθοφωτογραφίες, εντοπίζεται αδυναμία ταύτισής τους με αυτά.

Για τον έλεγχο της ταύτισης πραγματοποιήθηκε γραμμική ψηφιοποίηση αρμών και χαρακτηριστικών σημείων στις ορθοφωτογραφίες που χρειαζόταν κάθε φορά. όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι αποκλίσεις πρέπει να είναι μικρότερες από το γραμμικό σφάλμα, το οποίο είναι ίσο με 1.25cm για την απαιτούμενη κλίμακα, 1:50. Όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από το γραμμικό σφάλμα. Οι περισσότερες διαφορές κυμαίνονται στα λίγα χιλιοστά, ενώ κάποιες αποκλίσεις έχουν τιμή το πολύ 1 cm. Ωστόσο, το μόνο τμήμα του σημείου που παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη απόκλιση (περίπου 1.3cm) είναι στο πάνω μέρος του κεφαλιού της δεύτερης μορφής, που παρόλα αυτά αποφασίστηκε να κρατηθεί προκειμένου να μην υπάρχει τρύπα στο εν λόγω σημείο.



Εικόνα 4 - 101: Προβλήματα στο ορθοφωτομωσαϊκό του επιπέδου B'-B

Παρατηρώντας την εικόνα 4-100 διακρίνεται ότι για τις δυο πρώτες μορφές, δεν χρησιμοποιήθηκαν ολόκληρες οι ορθοεικόνες, που παρήχθησαν από τις κοντινές εικόνες. Δεν ήταν δυνατό να υπάρχει ταύτιση ολόκληρων των ορθοεικόνων αυτών με την συνολική. Αυτό οφείλεται στον εσφαλμένο προσανατολισμό των εικόνων. Απαιτούνταν περισσότερες εικόνες και όσο το δυνατόν μετωπικές, χωρίς μεγάλες κλίσεις της κάμερας.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος χρησιμοποιώντας τα φωτοσταθερά, καθώς και ορισμένα σημεία ελέγχου.

Παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα, γίνεται αντιληπτό ότι τα φωτοσταθερά των κεφαλιών των μορφών δεν συμπίπτουν με τις θέσεις τους στις αντίστοιχες ορθοεικόνες, όπως ακριβώς συνέβη και στο επίπεδο A-A'. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα.



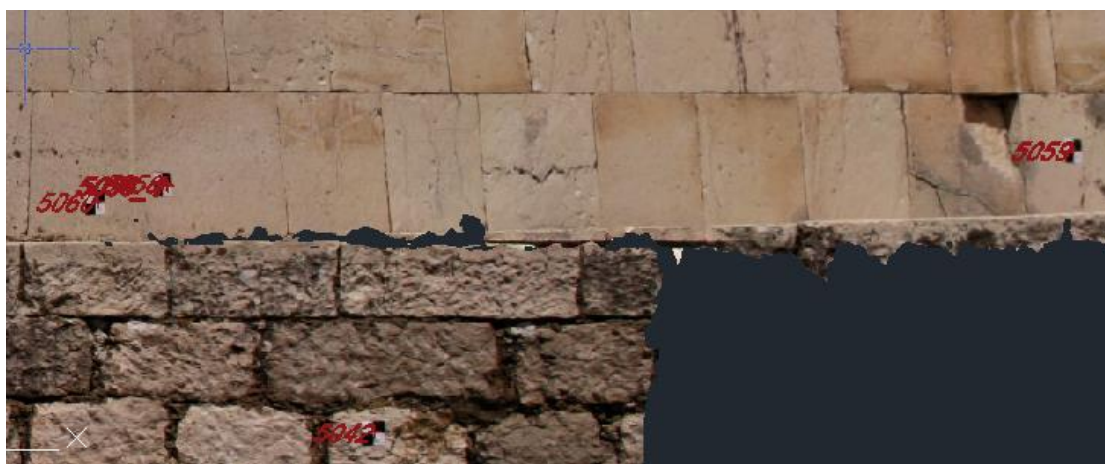
Εικόνα 4 - 102: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B



Εικόνα 4 - 103: Φωτοσταθερά στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επίπεδο B'-B

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρήθηκε ότι το πρόβλημα οφείλεται στη μέτρηση των φωτοσταθερών. Λόγω του ότι τα συγκεκριμένα τμήματα του μνημείου βρίσκονται σε μεγάλο ύψος, η μέτρηση των φωτοσταθερών αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, η οποία μπορεί να επιφέρει σημαντικά σφάλματα, όπως τα παραπάνω. Για την συνολική ορθοφωτογραφία, δηλαδή αυτή που έχει δημιουργηθεί από τις μακρινές εικόνες θα ελεγχθεί το κατά πόσο τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου, συμπίπτουν με τα αντίστοιχα ίχνη τους στην ορθοφωτογραφία.

Τα φωτοσταθερά που έχουν χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία των προσανατολισμών, φαίνεται να συμπίπτουν πλήρως με τις αντίστοιχες θέσεις τους στην ορθοφωτογραφία:



Εικόνα 4 - 104: Φωτοσταθερά στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επιπέδο Β'-Β

Τέλος, θα γίνει έλεγχος με τη χρήση των σημείων ελέγχου, δηλαδή σημείων με γνωστές συντεταγμένες, τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία των προσανατολισμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ελεγχθούν οι θέσεις των χαρακτηριστικών σημείων πάνω στις ορθοεικόνες. Όλες οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα σημεία ελέγχου με τα αντίστοιχα ίχνη τους στις ορθοεικόνες

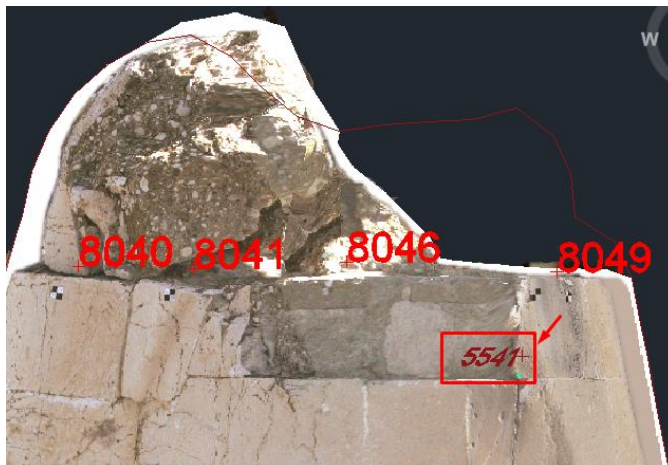
κυμαίνονται σε τιμές λίγων χιλιοστών έως 1cm, σε λίγες περιπτώσεις. Όλες οι διαφορές είναι μικρότερες από την γραφική ακρίβεια 1.25cm.

Εξαιρεση αποτελεί το παρακάτω σημείο:



Εικόνα 4 - 105: Πρόβλημα σε φωτοσταθερό στο νέο ορθοφωτομωσαϊκό στο επιπέδο Β'-Β

Στο συγκεκριμένο σημείο, η απόκλιση που εμφανίζεται ξεπερνά την ακρίβεια 1.25cm και πλησιάζει τα 3cm. Ωστόσο, αντίστοιχη απόκλιση με τιμή 3.5cm, παρουσιάζεται στο ίδιο σημείο στην παλιά ορθοφωτογραφία:



Εικόνα 4 - 106: Πρόβλημα σε φωτοσταθερό στο παλιό ορθοφωτομωσαϊκό στο επιπέδο Β'-Β

Αυτό το σφάλμα μπορεί να οφείλεται στον εσφαλμένο προσανατολισμό των εικόνων για τη συγκεκριμένη εικόνα, ή ακόμη και σε πιθανά σφάλματα του εν λόγω σημείου.

4.2.5 Ραδιομετρική επεξεργασία ορθοφωτομωσαϊκών στο λογισμικό Adobe Photoshop

Στο περιβάλλον του Photoshop πραγματοποιήθηκε ραδιομετρική εξομάλυνση των εικόνων με τη χρήση εργαλείων ραδιομετρικής επεξεργασίας, διότι οι εικόνες παρουσίαζαν έντονες χρωματικές διαφορές, λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των φωτογραμμετρικών λήψεων (ηλιοφάνεια, συννεφιά, σκιές).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, δεν είναι απαραίτητη η ραδιομετρική επεξεργασία όλων των ορθοφωτομωσαϊκών, λόγω του ότι τα παράγωγα χρησιμεύουν μόνο για συγκρίσεις και συμπεράσματα. Τα συγκεκριμένα σχέδια δημιουργήθηκαν για να διερευνηθεί εάν υπάρχει δυνατότητα μετρητικής αξιοποίησης ιστορικών εικόνων τεκμηρίωσης με σύγχρονες, αυτόματες ψηφιακές μεθόδους.

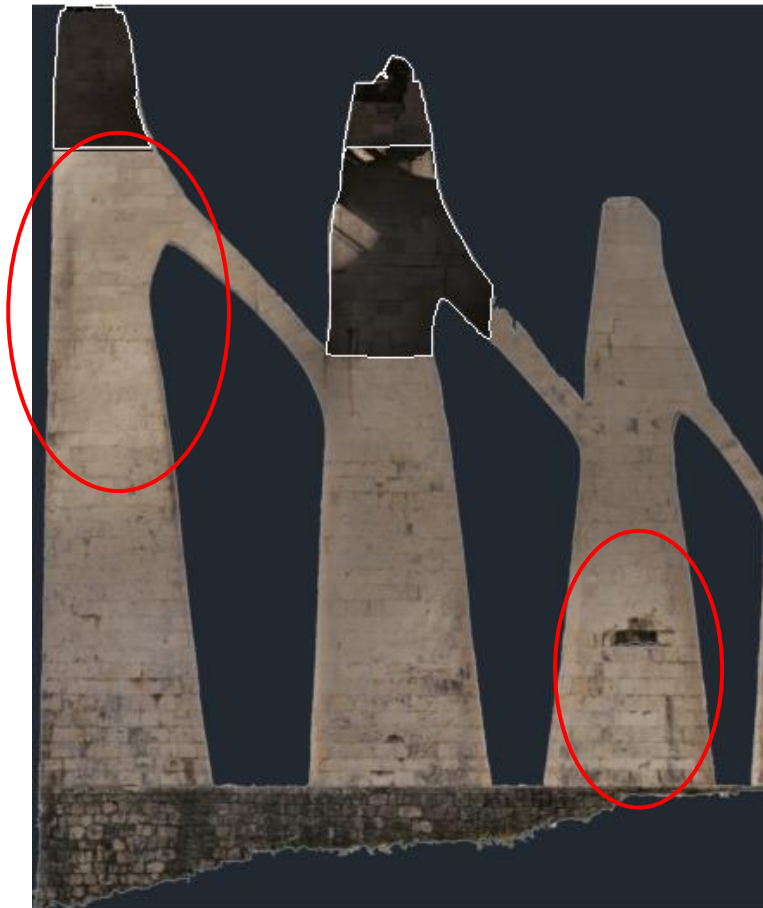
Ωστόσο, για εκπαιδευτικούς, κυρίως, λόγους πραγματοποιήθηκε ραδιομετρική επεξεργασία ενός ορθοφωτομωσαϊκού, και πιο συγκεκριμένα του επιπέδου προβολής A-A'.

Ορθοφωτομωσαϊκό Επιπέδου προβολής A-A' πριν την ραδιομετρική εξομάλυνση:



Εικόνα 4 - 107: Ορθοφωτομωσαϊκό A-A' πριν την ραδιομετρική επεξεργασία

Μεγάλες χρωματικές διαφορές εμφανίζονται μεταξύ των ορθοφωτογραφιών, που δημιουργήθηκαν από τις κοντινές εικόνες, με την ορθοφωτογραφία, που παρήχθη από τις μακρινές. Ωστόσο, ραδιομετρικές διαφορές παρουσιάζονται και μεταξύ τμημάτων της συνολικής ορθοφωτογραφίας (από μακρινές εικόνες). Πιο συγκεκριμένα, ορισμένα τμήματα του μνημείου παρουσιάζουν μεγαλύτερη φωτεινότητα και διαφορετικούς τόνους χρωμάτων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4 - 108: Ραδιομετρικές διαφορές στην συνολική ορθοφωτογραφία

Προκειμένου να διορθωθούν ραδιομετρικά όλα τα παραπάνω τμήματα του μνημείου και να δημιουργηθεί ένα τελικό ορθοφωτομωσαϊκό με ενιαίους χρωματισμούς και ενιαία φωτεινότητα, αξιοποιήθηκαν τα εργαλεία που παρέχει το λογισμικό Photoshop.

Το πρόγραμμα αυτό, παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας ή μεταβολής του ιστογράμματος, το οποίο είναι χρήσιμο κυρίως για τις ορθοφωτογραφίες των κεφαλιών, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στη φωτεινότητα σε σχέση με την συνολική ορθοφωτογραφία.

Επίσης, απαραίτητα εργαλεία είναι τα Selective color και Color Balance, τα οποία προσθέτουν και αφαιρούν τιμές χρωμάτων, παρέχοντας τα εξής επίπεδα χρωμάτων:

κυανό - κόκκινο, ματζέντα - πράσινο, κίτρινο - μπλε, μαύρο - άσπρο.

Επιπρόσθετα, χρήσιμα εργαλεία είναι και τα dodge και burn tool, τα οποία φωτίζουν ή σκουραίνουν αντίστοιχα, περιοχές της εικόνας χειροκίνητα.

Ειδικότερα, όσον αφορά στην ορθοφωτογραφία της δεύτερης μορφής, στο πάνω μέρος του κορμού της, σε ορισμένα τμήματά της (που παρουσιάζονται με κόκκινο κύκλο στην Εικόνα 4 - 109, παρατηρούνται σκιές και μεγάλες διαφορές στη φωτεινότητα σε σχέση με την υπόλοιπη ορθοφωτογραφία του συγκεκριμένου τμήματος.



Εικόνα 4 - 109: Ραδιομετρικά προβλήματα στην ορθοφωτογραφία της δεύτερης μορφής

Η διόρθωση των εν λόγω τμημάτων παρουσίαζε αρκετές δυσκολίες και για αυτό το λόγο κρίθηκε απαραίτητο να αφαιρεθούν τα συγκεκριμένα τμήματα από την ορθοφωτογραφία. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιήθηκε αφού, αρχικά, ελέγχθηκε το κατά πόσο οι απαραίτητες λεπτομέρειες των εν λόγω τμημάτων, παρέχονται από την ορθοφωτογραφία, που παρήχθη από τις μακρινές εικόνες.

Ορθοφωτομωσαϊκό επιπέδου προβολής A-A' ύστερα από τη ραδιομετρική επεξεργασία στο λογισμικό Photoshop:



Εικόνα 4 - 110: Ορθοφωτομωσαϊκό έπειτα από τη ραδιομετρική εξομάλυνση

5. Σύγκριση τελικών παραγώγων

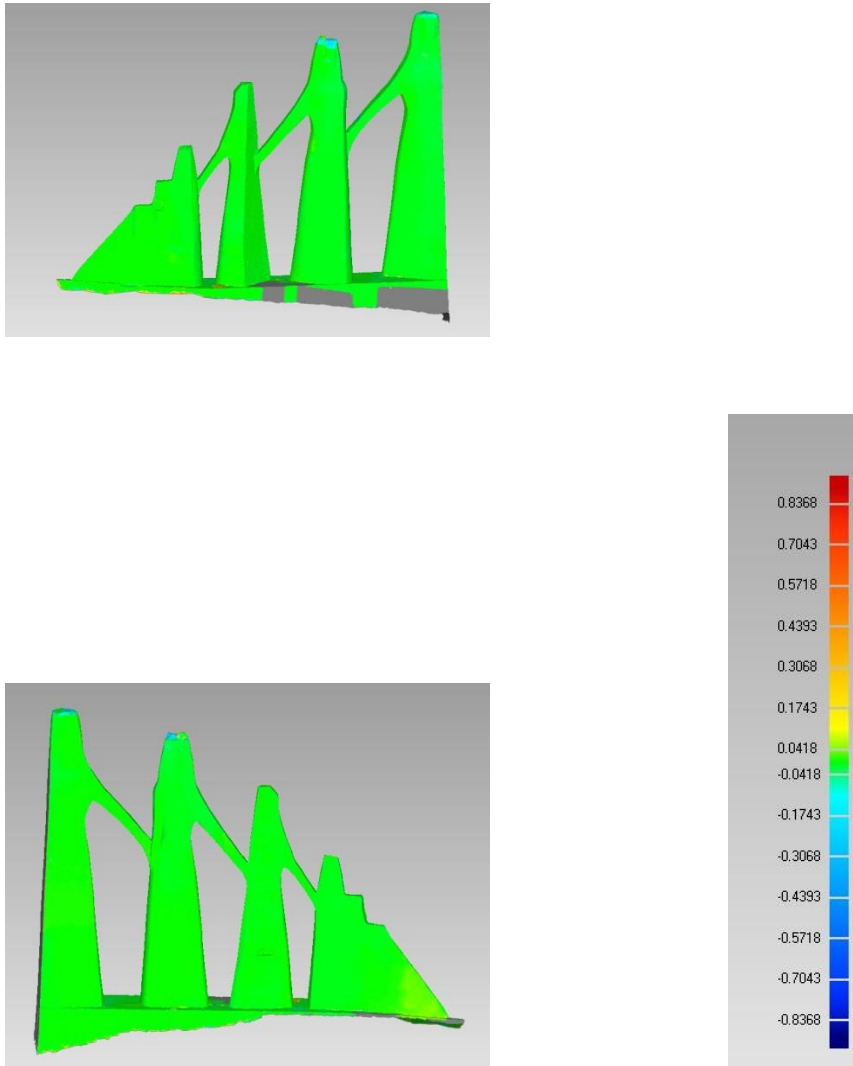
Έπειτα από την παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας και ορθοεικόνων με τις αυτόματες ψηφιακές μεθόδους, πραγματοποιείται η σύγκριση των εν λόγω παραγώγων με τα αντίστοιχα παράγωγα που είχαν προκύψει από την παλαιότερη διαδικασία. Συγκρίνονται οι δυο επιφάνειες και τα νέφη σημείων, όπως προέκυψαν από τη χρήση laser scanner (παλιά επεξεργασία, 2008-09) και από τις αυτοματοποιημένες, σύγχρονες διαδικασίες (επεξεργασία, 2019-20). Επίσης, σύγκριση θα γίνει και στις τελικές ορθοεικόνες του μνημείου, όπως αυτές δημιουργήθηκαν με τη χρήση παραδοσιακών φωτογραμμετρικών μεθόδων (μονοσκοπική και στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, 2008-9) και με τη χρήση αυτοματοποιημένων τεχνικών (SfM, MVS, 2019-20). Ύστερα από τη διαδικασία των συγκρίσεων, θα γίνει αντιληπτό το κατά πόσο ιστορικές εικόνες γεωμετρικής τεκμηρίωσης, είναι εφικτό και κάτω από ποιες προϋποθέσεις να προσαρμοστούν στις σημερινές, σύγχρονες μεθόδους, να υποστούν επεξεργασία και να αξιοποιηθούν μετρητικά, δίνοντας αποτελέσματα με ορθότητα, πληρότητα, πιστότητα και ικανοποιητική ακρίβεια.

5.1 Σύγκριση επιφανειών στο λογισμικό Geomagic Wrap

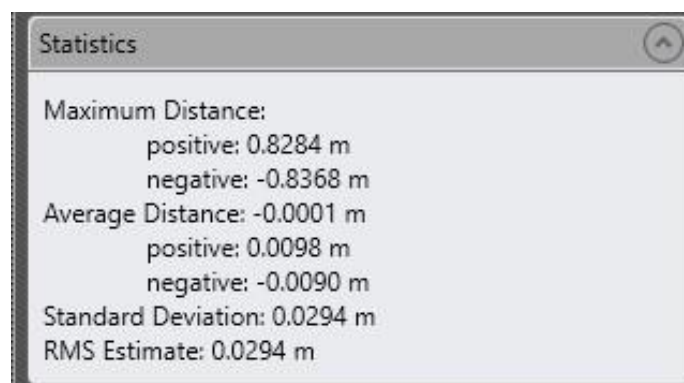
Για τον έλεγχο της ομοιότητας των τρισδιάστατων επιφανειών, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Geomagic Wrap. Στο πρόγραμμα αυτό, υπάρχει η σχετική εντολή (deviation), με την οποία δημιουργείται ένας χάρτης, στον οποίο παρουσιάζονται, με χρωματική διαβάθμιση, οι αποκλίσεις μεταξύ των επιφανειών των, προς σύγκριση, επιφανειών.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε η σύγκριση των δυο επιφανειών, της επιφάνειας που παρήχθη από τη σάρωση του μνημείου, και της επιφάνειας που δημιουργήθηκε από την επεξεργασία των εικόνων με αυτοματοποιημένες τεχνικές. Αρχικά, ορίστηκε ως επιφάνεια αναφοράς το 3D μοντέλο του σαρωτή laser scanner, αφού θεωρήθηκε πιο αξιόπιστο, αφενός λόγω της υψηλής ακρίβειας του σαρωτή, αφετέρου λόγω του ότι για την παραγωγή της άλλης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι και τεχνικές, για τις οποίες δεν υπήρχαν τα απαραίτητα-κατάλληλα αρχικά δεδομένα. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται αποδίδει με πράσινο χρώμα τα σημεία των επιφανειών υψηλής ταύτισης και με κόκκινο και μπλε αυτά της χαμηλής ταύτισης. Οι ενδιάμεσες αποχρώσεις παρουσιάζουν τα ενδιάμεσα επίπεδα.

Αφού εισαχθούν οι επιφάνειες στο πρόγραμμα, και εκτελεστεί η εντολή, παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

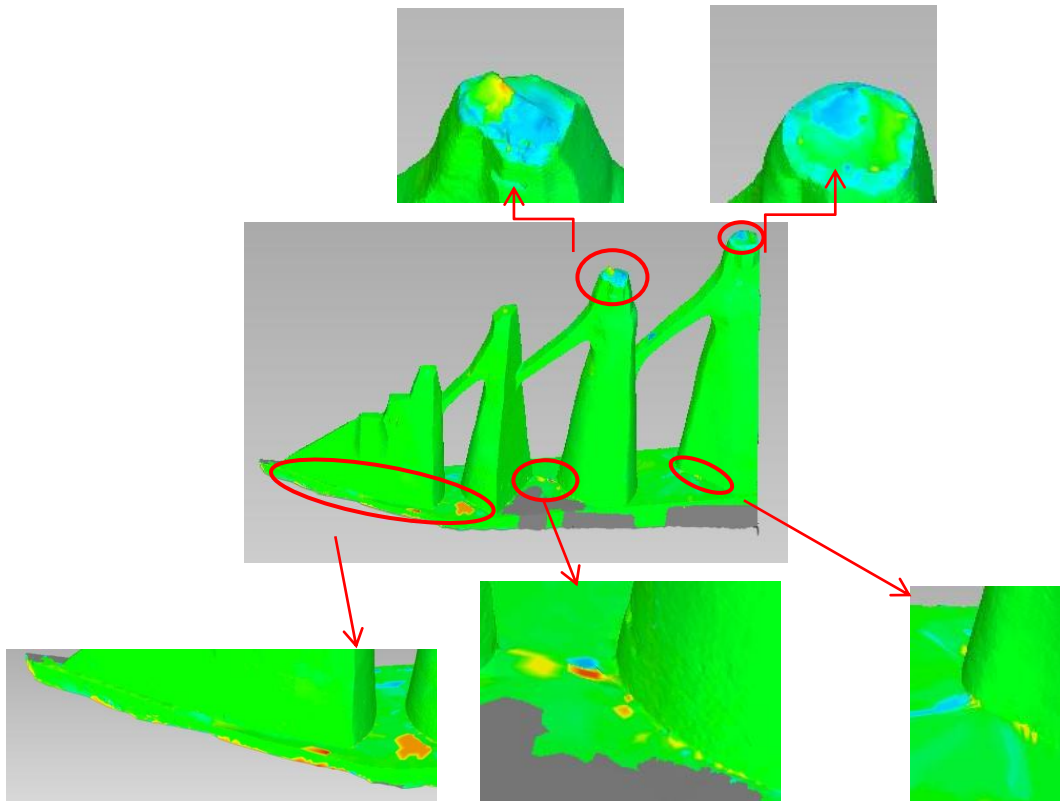


Εικόνα 5 - 1: Σύγκριση επιφανειών στο λογισμικό Geomagic



Εικόνα 5 - 2: Στατιστικά σύγκρισης επιφανειών στο λογισμικό Geomagic

Τα δυο συγκρινόμενα μοντέλα παρουσιάζουν μεταξύ τους μέση απόκλιση της τάξης του 0.01m (0.0098m). Η μεγαλύτερη απόκλιση που παρουσιάζεται έχει την τιμή 0.83m. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μεγαλύτερη αυτή απόκλιση, που παρουσιάζουν τα δυο μοντέλα, εμφανίζεται σε ελάχιστες περιοχές-τμήματα του μνημείου, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

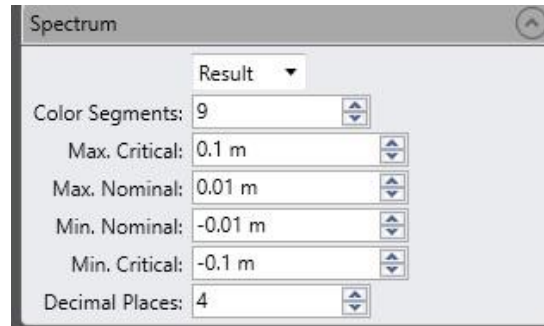


Εικόνα 5 - 3: Αποκλίσεις κατά την διαδικασία σύγκρισης επιφανειών

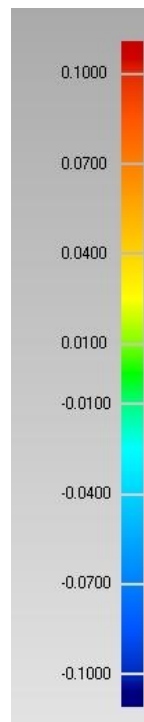
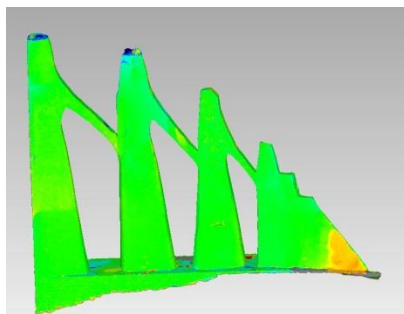
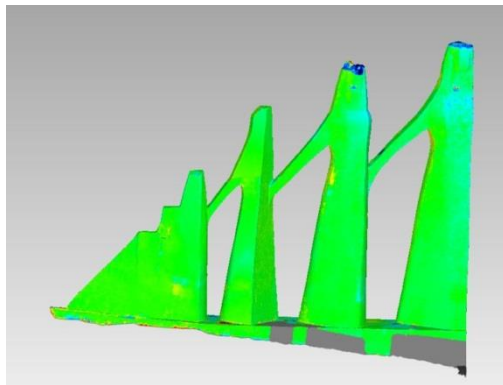
Οι μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζονται στα τμήματα του πάνω μέρους του βάθρου, οφείλονται στην έλλειψη πληροφορίας που υπάρχει στην επιφάνεια που δημιουργήθηκε με τις αυτοματοποιημένες μεθόδους. Για τον ίδιο λόγο, εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις και στο κεφάλι της πρώτης μορφής. Ωστόσο, όσον αφορά στο κεφάλι της δεύτερης, σ' αυτό παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση, λόγω του ότι η θέση σάρωσης ήταν χαμηλά και δεν αποτύπωσε σωστά πάνω μέρος της συγκεκριμένης μορφής.

Με βάση την *Εικόνα 5 - 1*, φαίνεται ότι τα υπόλοιπα μέρη του μνημείου παρουσιάζουν αποκλίσεις μικρότερες από 0.04-0.05 m.

Για αυτό το λόγο, κρίθηκε απαραίτητο να αλλάξουν οι διαβαθμίσεις και να παρουσιαστούν οι αποκλίσεις που υπάρχουν σε επίπεδο 0.01m έως και 0.1m.



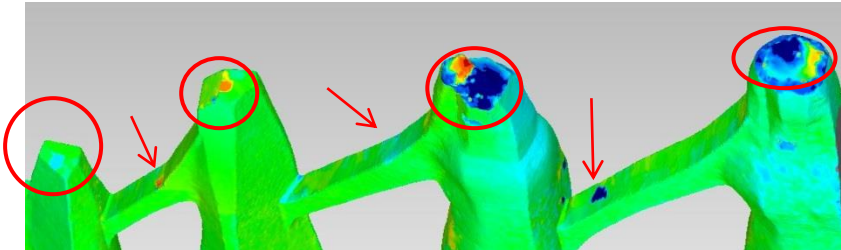
Εικόνα 5 - 4: Επιλογή κλίμακας διαβάθμισης για τη σύγκριση



Εικόνα 5 - 5: Σύγκριση επιφανειών με αποκλίσεις 0.01-0.1 m

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, διαπιστώνεται ότι οι τιμές των αποκλίσεων είναι χαμηλές στο μεγαλύτερο μέρος του μνημείου (κοντά στο 0.01m). Ωστόσο, μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται:

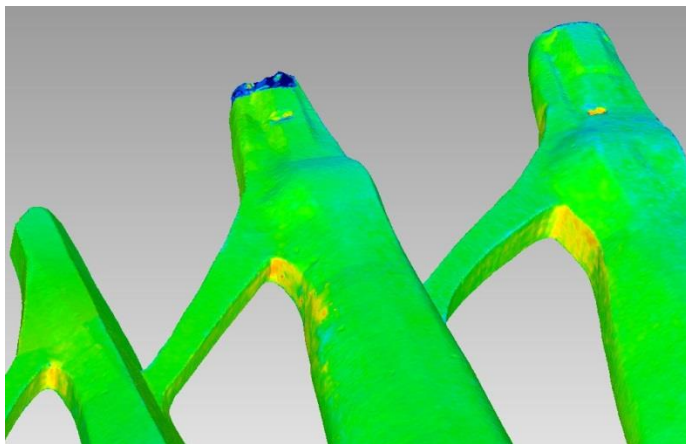
- ο στα κεφάλια των μορφών και σε σημεία στα πάνω μέρη των χεριών τους



Εικόνα 5 - 6: Αποκλίσεις επιφανειών στην περιοχή των κεφαλιών

Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι για τα εν λόγω τμήματα δεν υπάρχει σωστή και επαρκής πληροφορία στην τρισδιάστατη επιφάνεια που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.

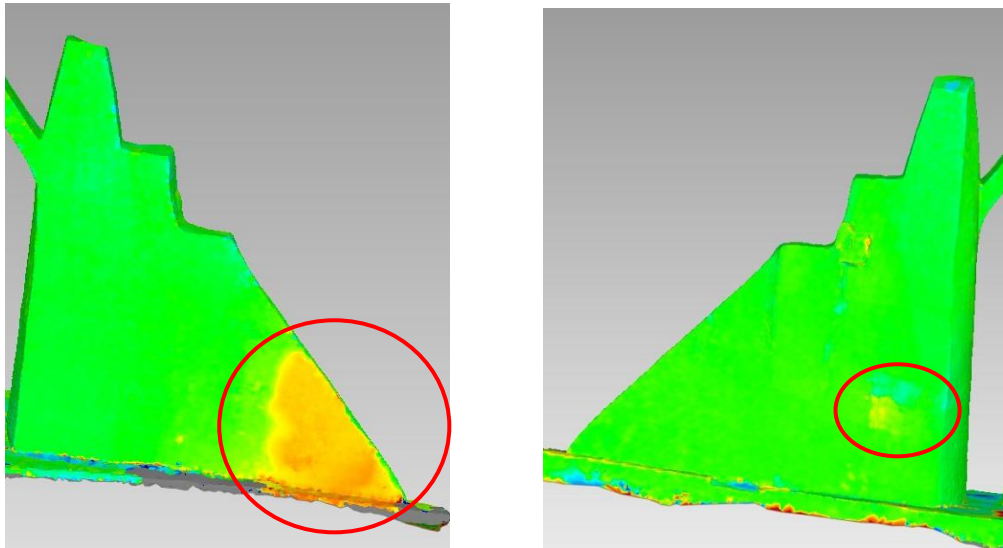
- ο στο κάτω μέρος των χεριών των μορφών



Εικόνα 5 - 7: Αποκλίσεις επιφανειών στο κάτω μέρος των χεριών

Αύξηση των αποκλίσεων εντοπίζεται και στο κάτω μέρος και των τριών χεριών των μορφών. Οι τιμές των αποκλίσεων αυτών (περίπου 0.04m), οφείλονται στο ότι η επιφάνεια που παρήχθη από το νέφος σημείων του Metashape, παρουσιάζει προβλήματα, κυρίως τραχύτητας, στις περιοχές αυτές, λόγω έλλειψης των απαραίτητων εικόνων που να τις απεικονίζουν.

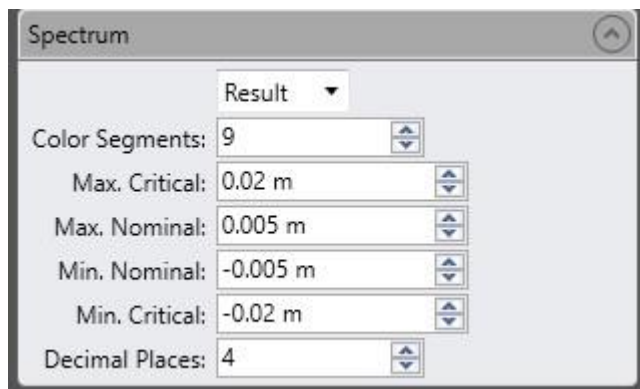
- ο στην ανατολική και δυτική όψη της τέταρτης μορφής του μνημείου



Εικόνα 5 - 8: Αποκλίσεις επιφανειών στην τέταρτη μορφή

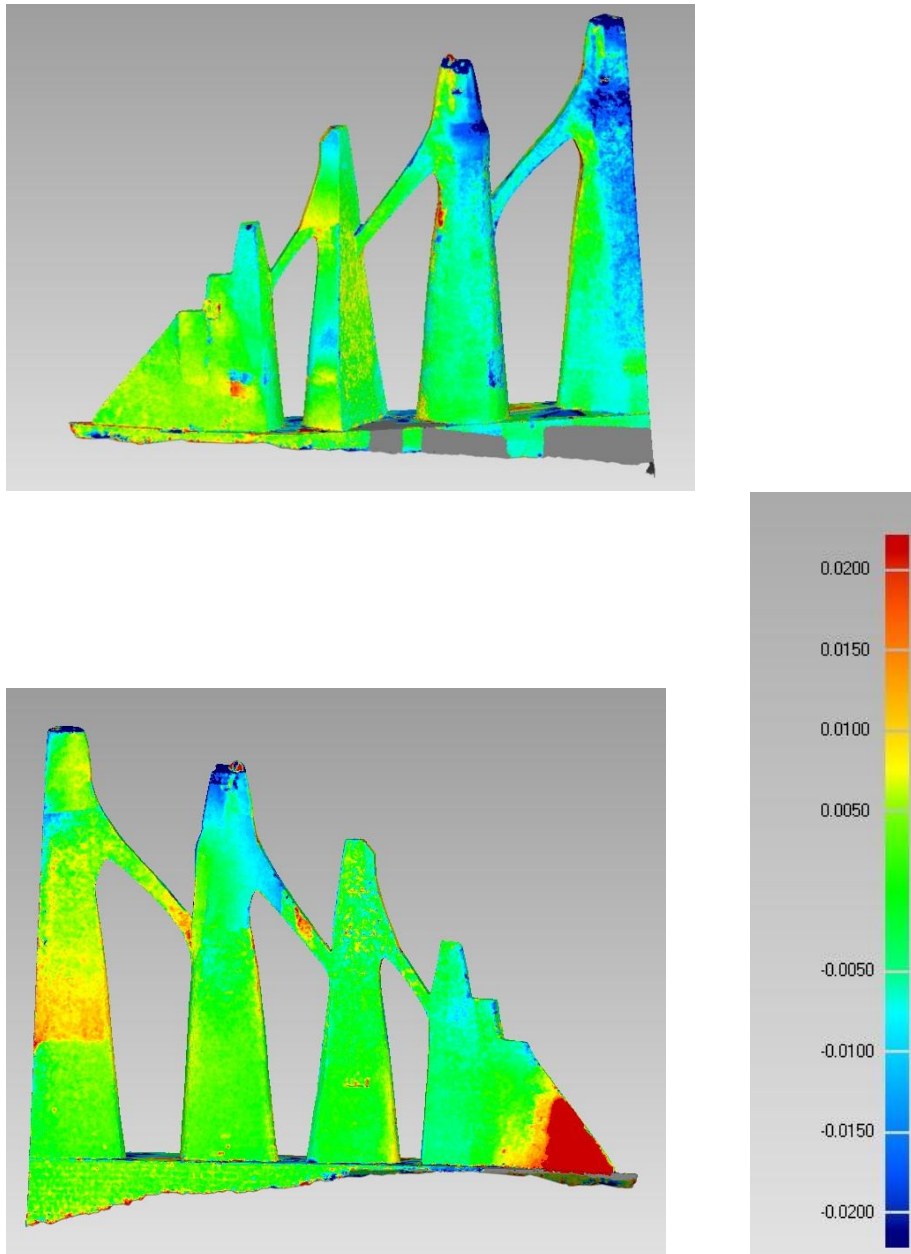
Μεγάλη απόκλιση παρουσιάζεται και σε ένα τμήμα της τελευταίας μορφής. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.2.2, τα τμήματα της επιφάνειας για την παραπάνω περιοχή είναι προβληματικά, λόγω των αρχικών δεδομένων. Για αυτό εντοπίζονται αυξημένες αποκλίσεις σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς.

Παρατηρώντας όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του μνημείου, εμφανίζει τιμές αποκλίσεων κοντά στα 0.01-0.02 m. Επομένως, για να ελεγχθούν τα τμήματα που έχουν ακρίβεια καλύτερη από αυτή, ακόμη και σε επίπεδο χιλιοστών, κρίθηκε σημαντικό να ξαναγίνει η σύγκριση με διαβαθμίσεις από 0.005 m έως 0.02m.



Εικόνα 5 - 9: Επιλογή κλίμακας διαβάθμισης για τη σύγκριση

Μέγιστη τιμή απόκλισης, θεωρήθηκε η τιμή 0.02m, ενώ ελάχιστη η τιμή των 0.005m.



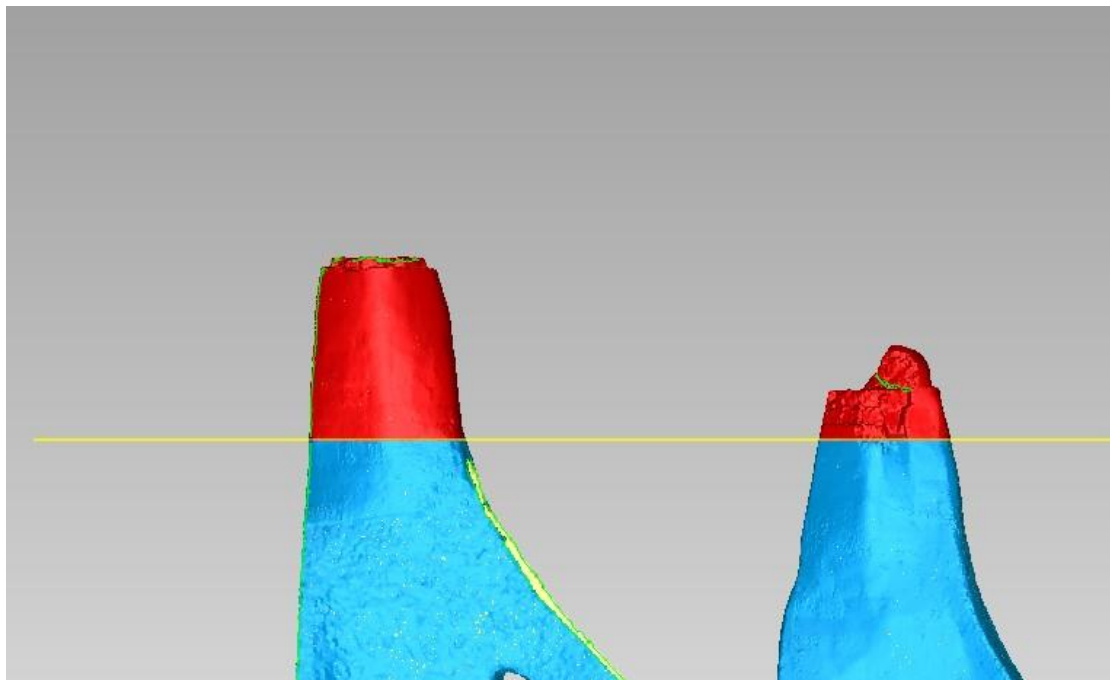
Εικόνα 5 - 10: Σύγκριση επιφανειών με αποκλίσεις 5mm-2cm

Διαπιστώνεται ότι οι μικρότερες αποκλίσεις, σε επίπεδο χιλιοστών, παρουσιάζονται στα πιο επίπεδα τμήματα του μνημείου, κυρίως στην ανατολική όψη.

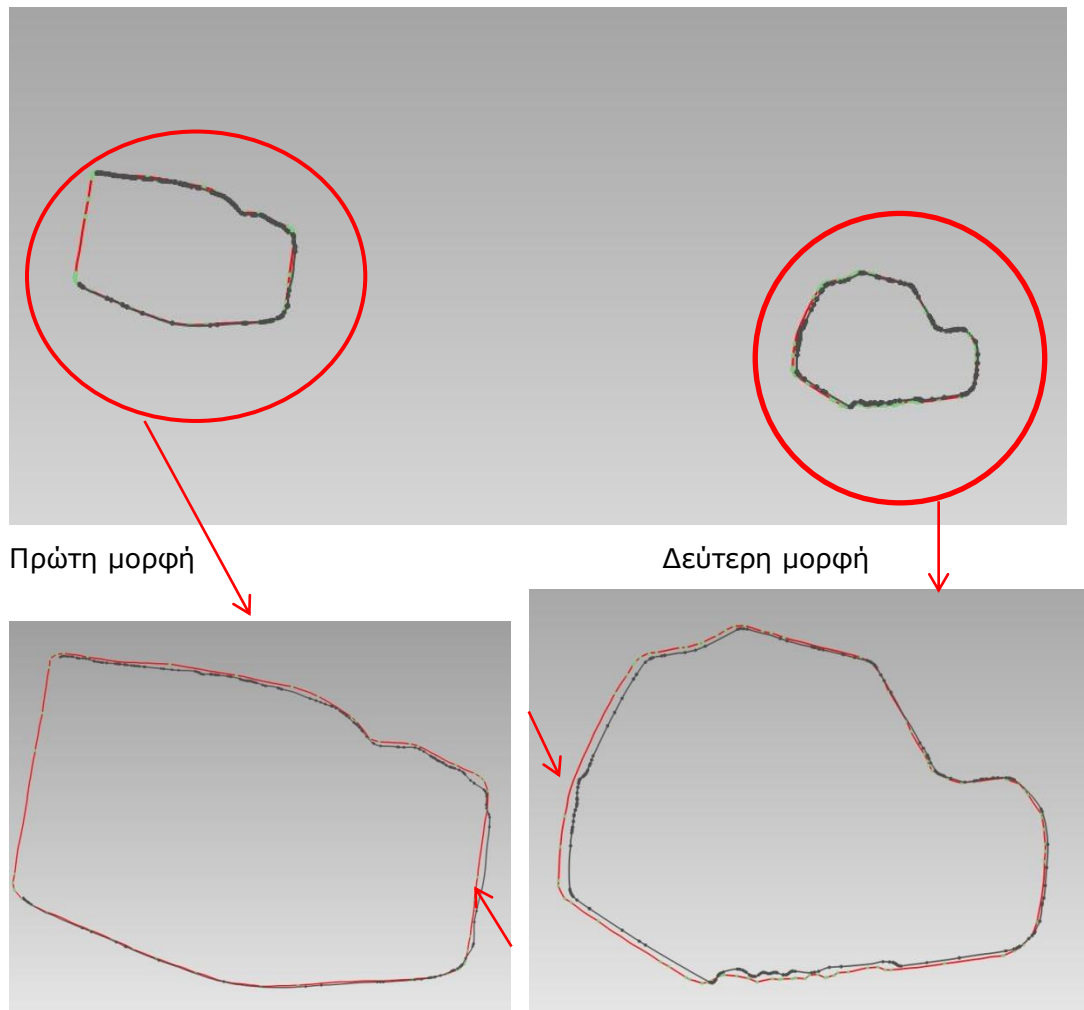
Στη συνέχεια, αποφασίστηκε να δημιουργηθούν οριζόντιες τομές των δύο επιφανειών και να γίνει η μεταξύ τους σύγκριση. Στο λογισμικό Geomagic Wrap, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει τη θέση από την οποία θα διέρχεται το επίπεδο που θα τμήσει κάθε αντικείμενο. Αφού οριστεί το οριζόντιο επίπεδο που θα τμήσει την κάθε επιφάνεια, δημιουργείται το ίχνος της τομής του επιπέδου με το αντικείμενο. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε είναι Trim with plane, ενώ το ίχνος αυτό απομονώνεται με την εντολή Create from boundary.

Κρίθηκε σημαντικό να δημιουργηθούν και να συγκριθούν 4 οριζόντιες τομές, στις οποίες απεικονίζονται τα εξωτερικά περιγράμματα των κεφαλιών των τεσσάρων μορφών και των κορμών τους.

1^η οριζόντια τομή, αφορά στα κεφάλια της πρώτης και δεύτερης μορφής:



Εικόνα 5 - 11: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιών των δυο πρώτων μορφών



Εικόνα 5 - 12: Σύγκριση τομών των κεφαλιών των δυο πρώτων μορφών

	Πρώτη μορφή	Δεύτερη μορφή
Μέγιστη απόκλιση	0,019μ (η μέγιστη απόκλιση που ξεπερνάει την ακρίβεια 0.0125μ, εντοπίζεται στο πλαϊνό μέρος (βλ. Κόκκινο βέλος))	0.021μ (η μέγιστη απόκλιση που ξεπερνάει την ακρίβεια 0.0125μ, εντοπίζεται στο πλαϊνό μέρος (βλ. Κόκκινο βέλος))
Ελάχιστη απόκλιση	0.001μ	0.001μ

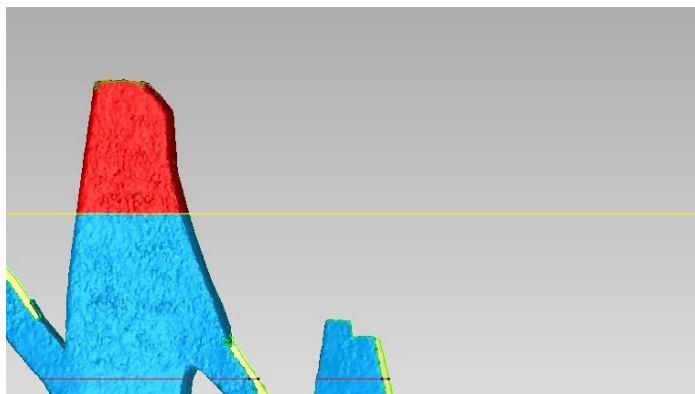
Πίνακας 5 - 1: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην πρώτη και δεύτερη μορφή

Με εξαίρεση τα παραπάνω σημεία που παρουσιάζουν μέγιστες αποκλίσεις (>0.0125μ), όλα τα υπόλοιπα τμήματα του μνημείου εμφανίζουν διαφορές μικρότερες από 0.01μ.

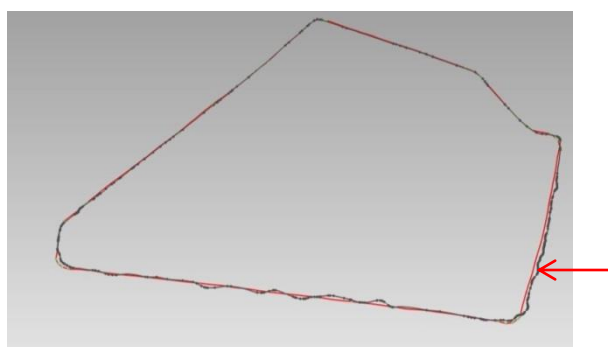
Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το εξωτερικό περίγραμμα της επιφάνειας που προέκυψε από τη σάρωση.

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν αποκλίσεις, κυρίως στη δυτική όψη της πρώτης μορφής, στο τμήμα δηλαδή που η νέα επιφάνεια, παρουσίαζε τραχύτητα (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 4.2.2). Επίσης, διαφορές εντοπίζονται και στην ανατολική όψη της δεύτερης μορφής. Αυτό οφείλεται στον εσφαλμένο προσανατολισμό των εικόνων στο συγκεκριμένο τμήμα του μνημείου.

2η οριζόντια τομή, αφορά στο κεφάλι της τρίτης μορφής:



Εικόνα 5 - 13: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιού τρίτης μορφής

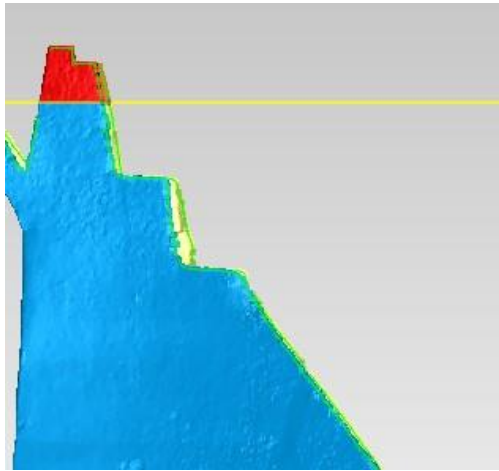


Εικόνα 5 - 14: Σύγκριση τομών κεφαλιού τρίτης μορφής

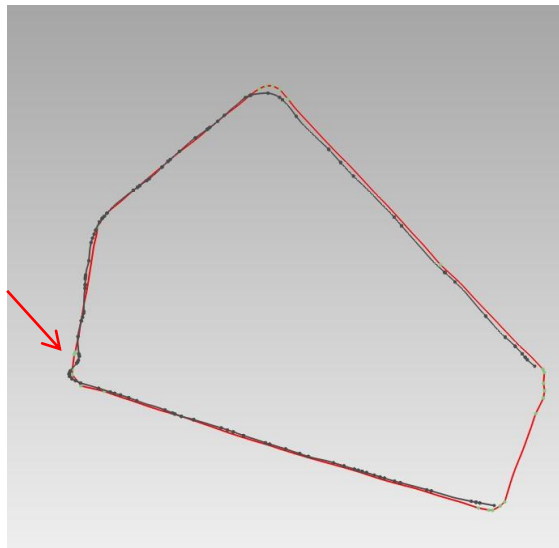
Μέγιστη απόκλιση	0.013μ (η μέγιστη απόκλιση που ξεπερνάει την ακρίβεια 0.0125μ, εντοπίζεται στο πλαϊνό μέρος (βλ. Κόκκινο βέλος))
Ελάχιστη απόκλιση	0.001μ

Πίνακας 5 - 2: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην τρίτη μορφή

Με βάση την παραπάνω εικόνα, διαφορές εντοπίζονται στην ανατολική όψη του κεφαλιού της τρίτης μορφής, λόγω της τραχύτητας που εμφανίζεται στη νέα επιφάνεια στο συγκεκριμένο τμήμα. Επίσης, Με εξαίρεση τα παραπάνω σημεία (βλ. Κόκκινο βέλος) που παρουσιάζουν μέγιστη απόκλιση 0.013μ, όλα τα υπόλοιπα τμήματα του μνημείου εμφανίζουν διαφορές μικρότερες από 0.01μ.

3^η οριζόντια τομή, αφορά στο κεφάλι της τέταρτης μορφής:

Εικόνα 5 - 15: Ίχνος επιπέδου τομής κεφαλιού τέταρτης μορφής



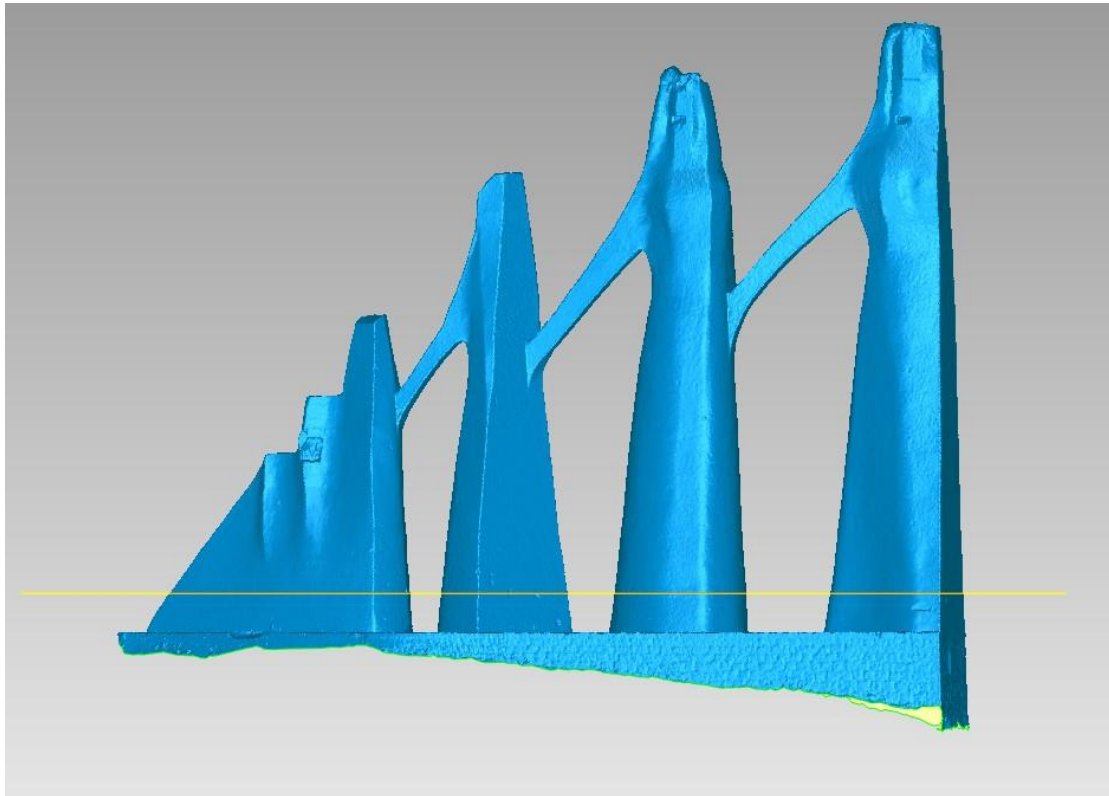
Εικόνα 5 - 16: Σύγκριση τομών κεφαλιού τέταρτης μορφής

Μέγιστη απόκλιση	0.009μ (η μέγιστη απόκλιση εντοπίζεται στο πλαϊνό μέρος (βλ. Κόκκινο βέλος)
Ελάχιστη απόκλιση	0.001μ

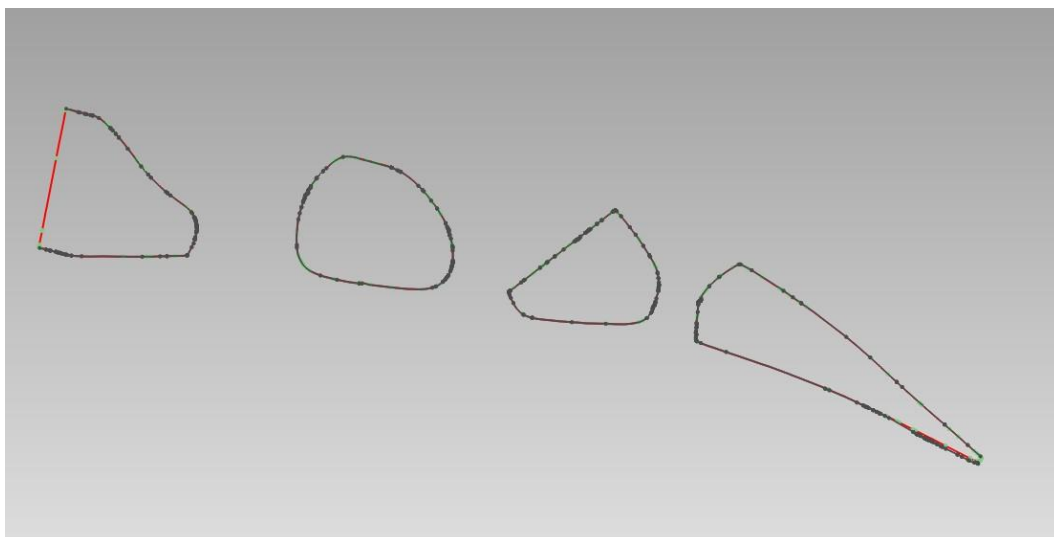
Πίνακας 5 - 3: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις στην τρίτη μορφή

Επίσης, σύμφωνα με την εικόνα, μικρές αποκλίσεις παρουσιάζονται στη δυτική όψη του κεφαλιού της τέταρτης μορφής. Ωστόσο, όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από 0.01μ.

4^η οριζόντια τομή, αφορά στους κορμούς των μορφών:

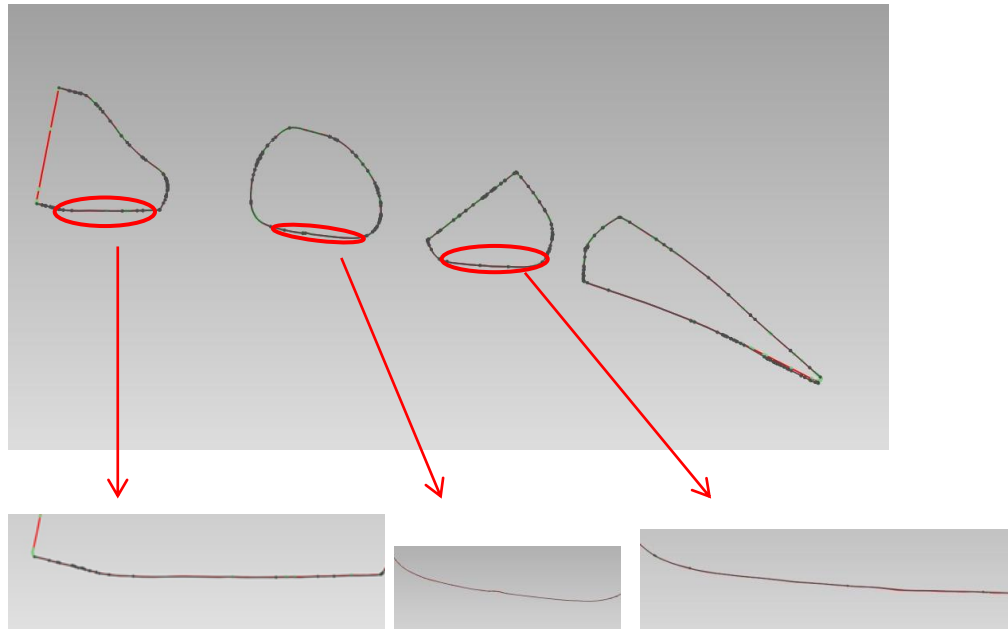


Εικόνα 5 - 17: Ίχνος επιπέδου τομής των κορμών των τεσσάρων μορφών



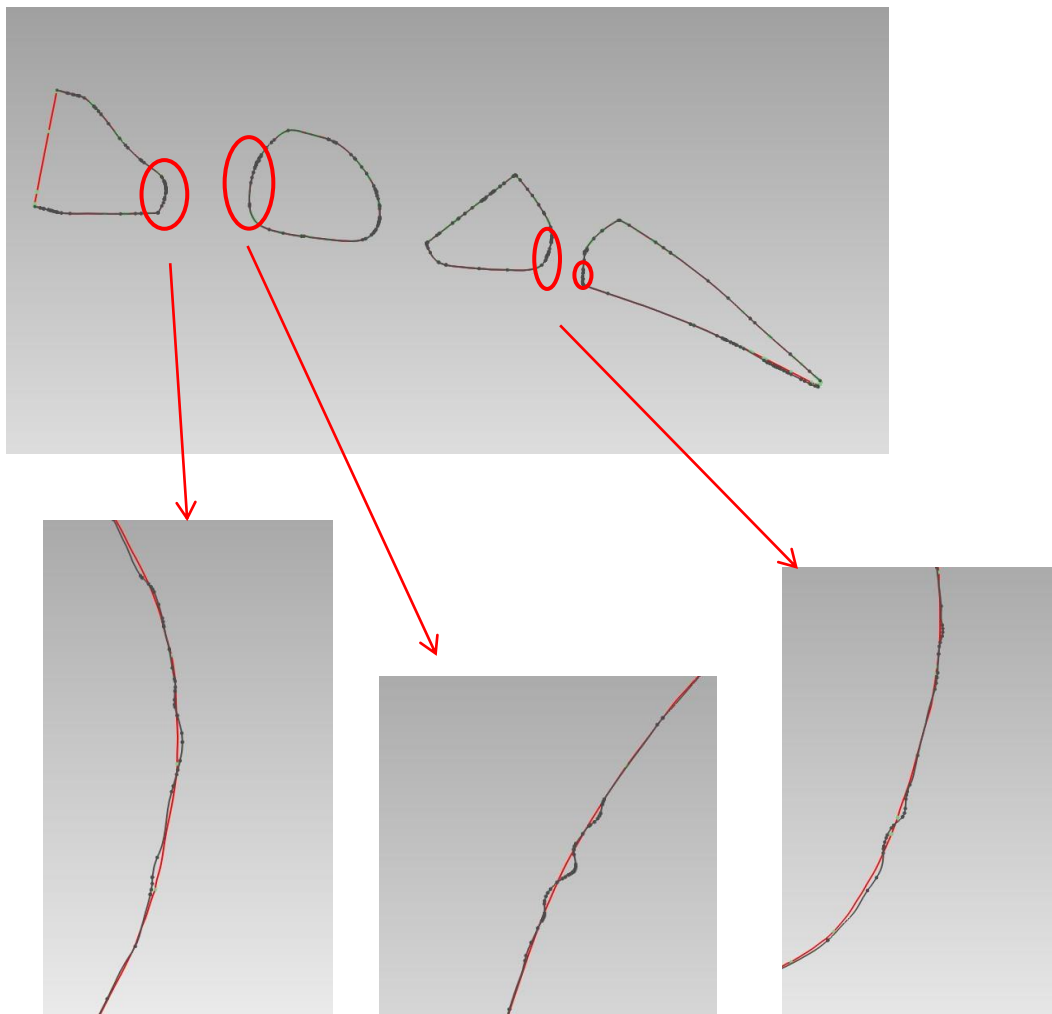
Εικόνα 5 - 18: Σύγκριση τομών των κορμών των τεσσάρων μορφών

Παρατηρώντας αυτή την τομή, εντοπίζεται υψηλή ταύτιση των επιφανειών των κορμών όλων των μορφών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5 - 19: Υψηλή ταύτιση των τομών των κορμών

Ωστόσο, μικρές αποκλίσεις εμφανίζονται κυρίως στα πλαϊνά μέρη, όπου η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από το νέφος σημείων του Metashape, είναι τραχιά.



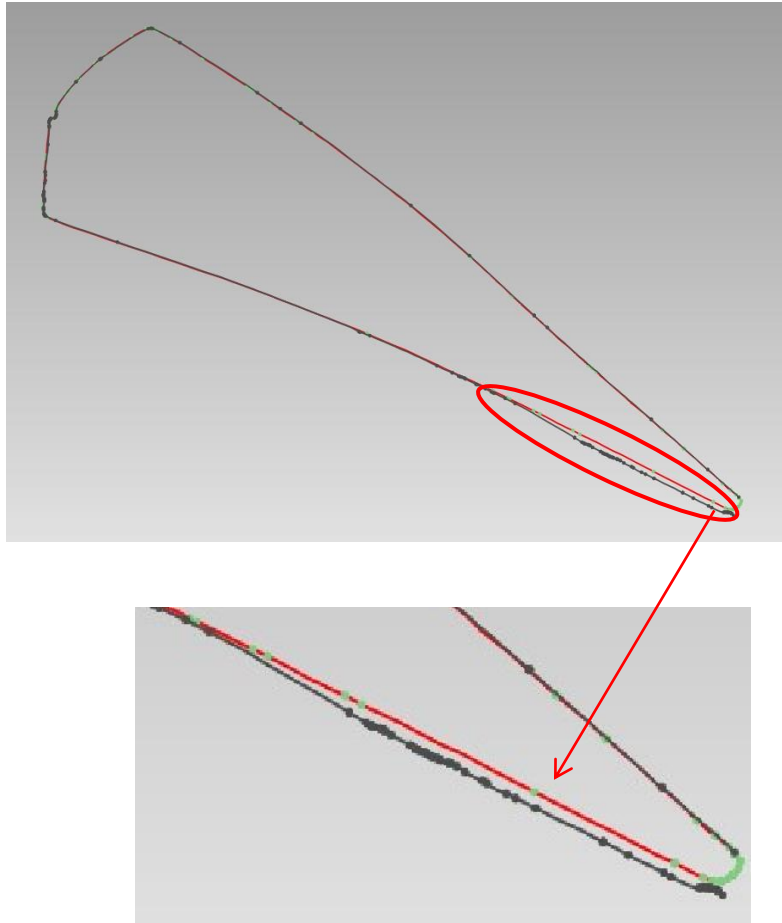
Εικόνα 5 - 20: Παρουσίαση αποκλίσεων μεταξύ των τομών των κορμών

	Πρώτη μορφή	Δεύτερη μορφή	Τρίτη μορφή	Τέταρτη μορφή
Μέγιστη απόκλιση	0.006μ	0.01μ	0.009μ	0.01μ
Ελάχιστη απόκλιση	0.001μ	0.001μ	0.001μ	0.001μ

Πίνακας 5 - 4: Μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις σε όλες τις μορφές

Οι μέγιστες αποκλίσεις που εμφανίζονται και στις τρεις μορφές είναι μικρότερες από την απαιτούμενη ακρίβεια 0.0125μ και αφορούν τα πλαϊνά τμήματά τους, όπως αντίστοιχα συνέβη και με τα κεφάλια τους.

Επιπρόσθετα, οι επιφάνειες της τέταρτης μορφής εμφανίζουν υψηλή ταύτιση, με εξαίρεση το τμήμα της ανατολική όψης, που εμφανίζει μια μικρή μετατόπιση (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 4.2.2).



Εικόνα 5 - 21: Παρουσίαση αποκλίσεων μεταξύ των τομών του κορμού της 4ης μορφής

Μέγιστη απόκλιση	0.03μ
Ελάχιστη απόκλιση	0.001μ

Πίνακας 5 - 5: Μέγιστη και ελάχιστη απόκλιση στην τέταρτη μορφή

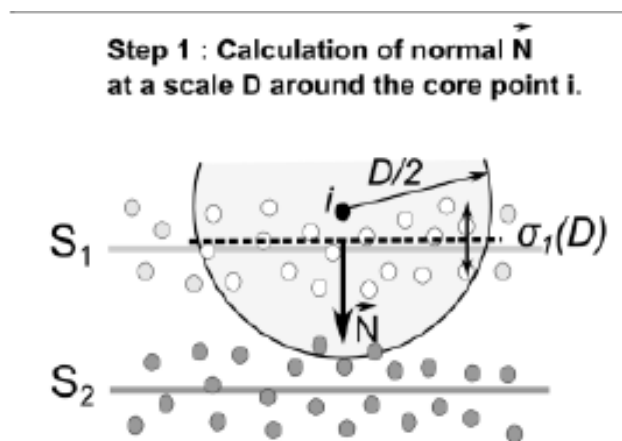
Η παραπάνω μετατόπιση είναι της τάξης των 0.03μ. Αυτό σημαίνει ότι ξεπερνά αρκετά την ακρίβεια, και συνεπώς το συγκεκριμένο τμήμα δεν είναι δυνατό να επιφέρει αξιόπιστη και ακριβή πληροφορία.

5.2 Σύγκριση νεφών σημείων στο λογισμικό Cloud Compare

Η σύγκριση των νεφών σημείων έγινε με τη βοήθεια ενός plugin, το οποίο παρέχεται μέσα από το πρόγραμμα επεξεργασίας Cloud Compare. Εισήχθησαν στο πρόγραμμα οι προς σύγκριση επιφάνειες και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε νέφη σημείων χρησιμοποιώντας την εντολή Sample points. Το plugin-αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται M3C2 και αποτελεί τον πιο αξιόπιστο τρόπο εύρεσης απόστασης μεταξύ δυο τρισδιάστατων νεφών σημείων. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του πώς λειτουργεί ο αλγόριθμος M3C2 για να μετρήσει τις αποστάσεις μεταξύ δυο νεφών σημείων.

Αφού τα δυο νέφη έχουν προκύψει από διαφορετικό τρόπο επεξεργασίας, ο αλγόριθμος ορίζει το ένα νέφος ως νέφος αναφοράς και το άλλο ως νέφος σύγκρισης.

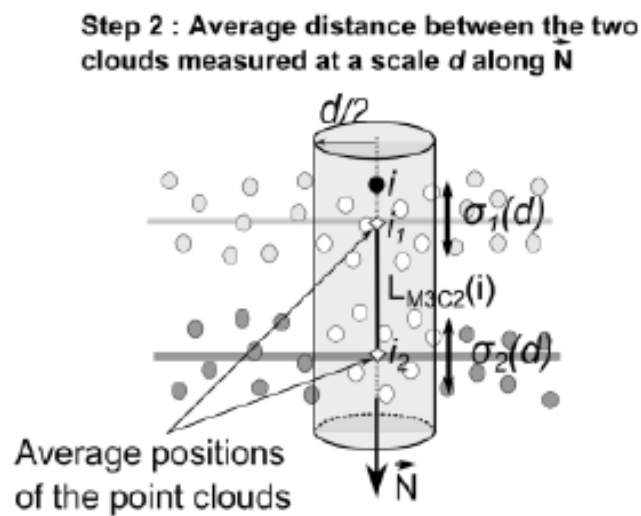
Αρχικά, δημιουργεί core points, δηλαδή σημεία στα οποία θα στηρίξει τις επόμενες μαθηματικές πράξεις μεταξύ των νεφών. Αυτά τα σημεία είναι είτε ένα υποσύνολο, είτε ολόκληρο το νέφος, το οποίο θεωρεί νέφος αναφοράς. Για κάθε core point ο αλγόριθμος υπολογίζει ένα διάνυσμα N (normal vector) σε μια κλίμακα D (normal scale), όπου D είναι η διάμετρος της σφαιρικής γειτονιάς, που εξάγεται γύρω από κάθε core point για τον υπολογισμό του διανύσματος N . Η απόκλιση της απόστασης των γειτονικών NN_i από το επίπεδο που έχει οριστεί με ακτίνα $D/2$, καταγράφεται ως η μέτρηση της τραχύτητας του νέφους $\sigma_i(D)$ στην κλίμακα D (Lague et al. 2013).



Εικόνα 5 - 22: Λογική του αλγορίθμου M3C2

Πηγή: (Lague et al. 2013).

Έπειτα, δημιουργούνται δυο υποσύνολα νεφών από την τομή του νέφους αναφοράς και του συγκρινόμενου με έναν κύλινδρο με διάμετρο d (κλίμακα προβολής) και άξονες (i, N) . Κάθε ένα από αυτά τα υποσύνολα νεφών, προβάλλεται στον κύλινδρο, που δίνει μια κατανομή αποστάσεων κατά μήκος της κατεύθυνσης των διανυσμάτων N . Αυτά γίνονται για τον καθορισμό της μέσης θέσης του κάθε νέφους σημείων. Τέλος, πραγματοποιείται η μέτρηση μεταξύ των δυο αυτών νεφών (Lague et al. 2013).

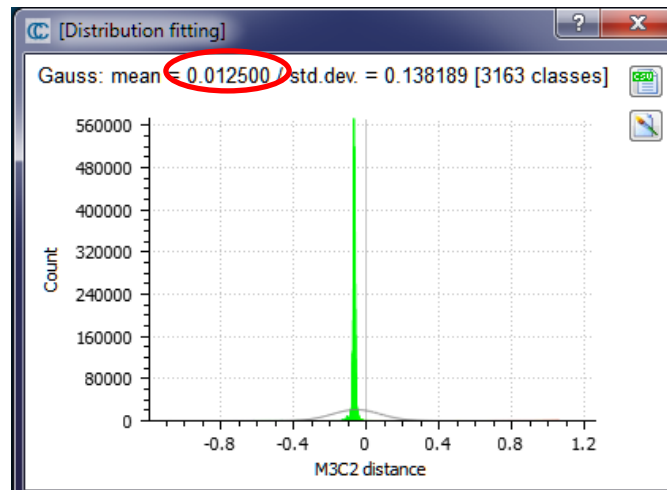


Εικόνα 5 - 23: Λογική του αλγορίθμου M3C2

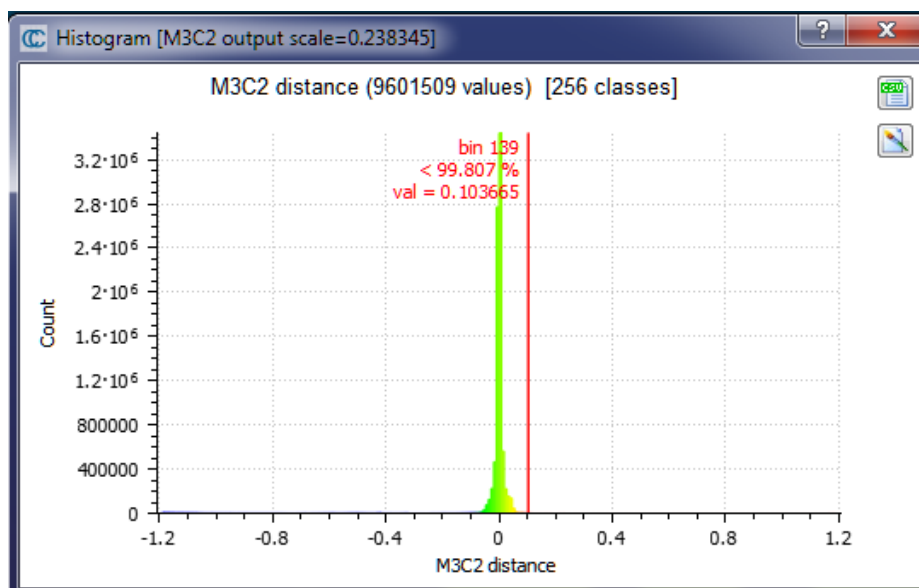
Πηγή: (Lague et al. 2013).

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική έγινε σύγκριση του νέφους σημείων που προέκυψε από το laser scanner, το οποίο θεωρήθηκε νέφος αναφοράς, με το νέφος σημείων που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή αυτοματοποιημένων φωτογραμμετρικών διαδικασιών με τις ιστορικές εικόνες και το οποίο θεωρήθηκε το συγκρινόμενο νέφος.

Αφού έτρεξε ο αλγόριθμος M3C2, ελέγχθηκε το ιστόγραμμα που δημιουργήθηκε. Με βάση το παρακάτω ιστόγραμμα παρατηρείται ότι η μέση απόκλιση των νεφών σημείων είναι της τάξης του 1,25cm.

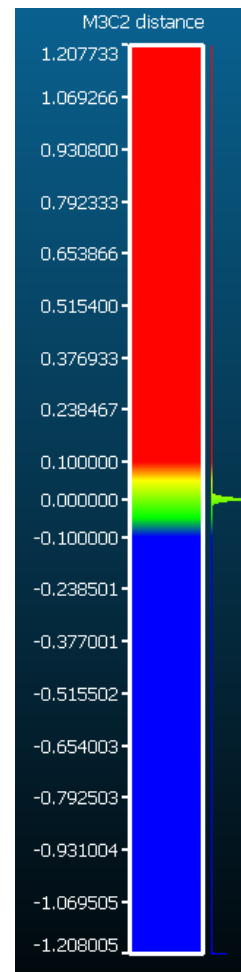
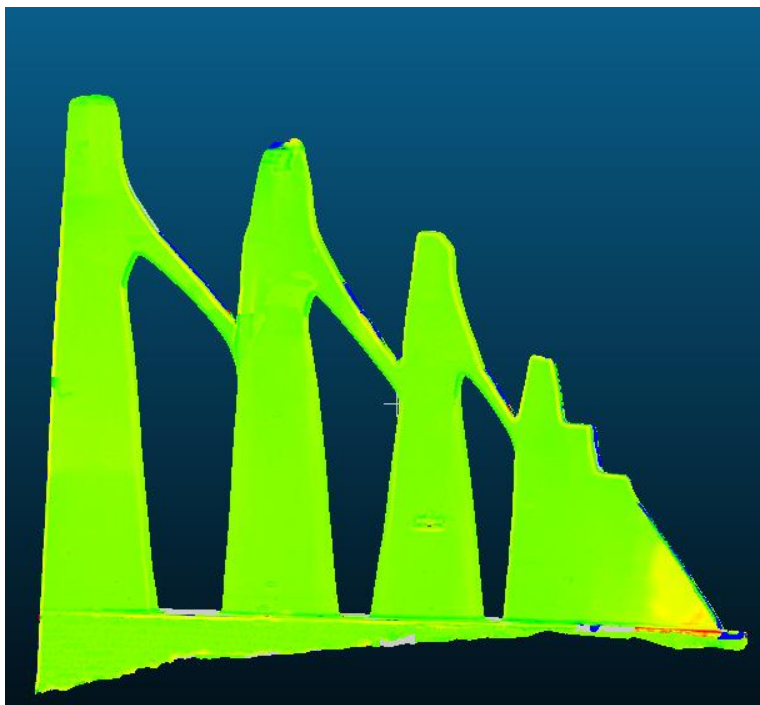
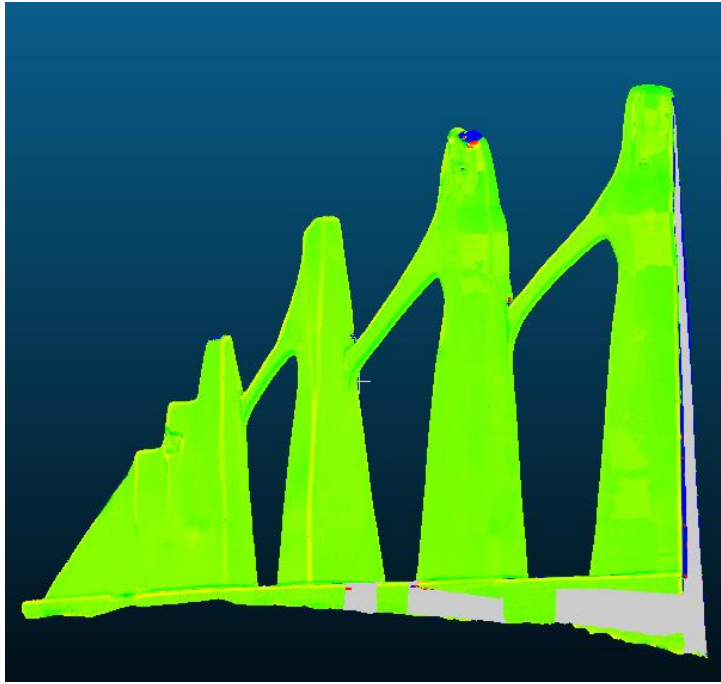


Εικόνα 5 - 24: Ιστόγραμμα μέσης απόστασης των νεφών σημείων _ M3C2



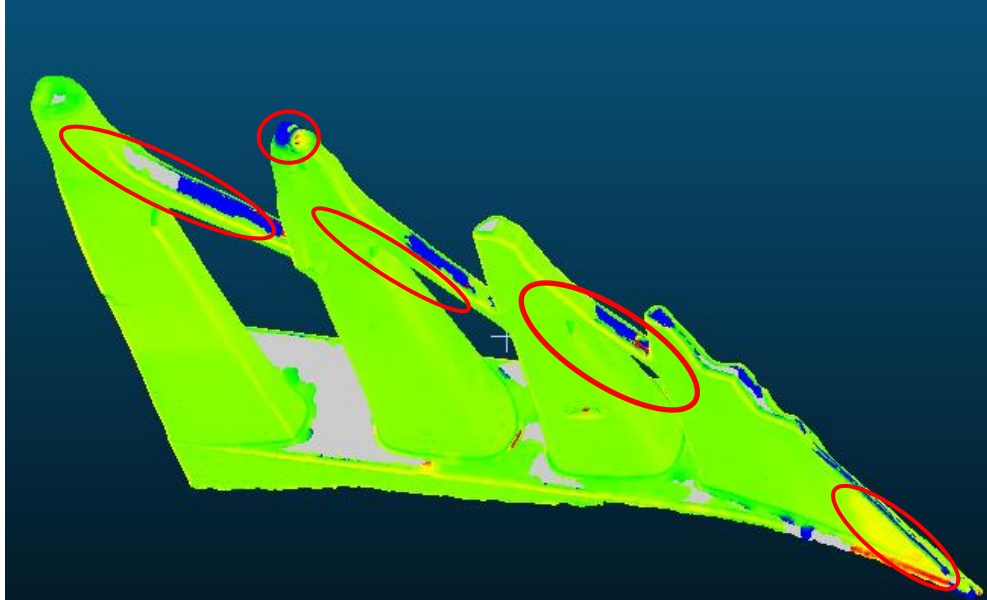
Εικόνα 5 - 25: Ιστόγραμμα απόστασης των νεφών σημείων-M3C2

Στο παραπάνω ιστόγραμμα παρατηρείται η απόσταση των δυο νεφών που υπολογίστηκαν μέσω του αλγορίθμου M3C2. Σύμφωνα με αυτό, το 99.807% των σημείων έχουν μικρότερη απόσταση από 10cm. Για αυτό το λόγο, ο πρώτος χάρτης με χρωματική διαβάθμιση, αποφασίστηκε να έχει αποκλίσεις 5 έως 10 cm.



Εικόνα 5 - 26: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 5-10 cm – M3C2

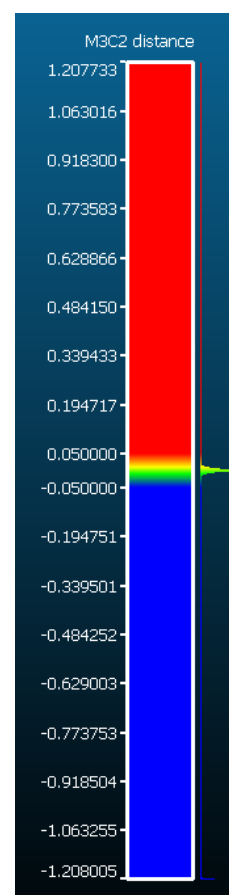
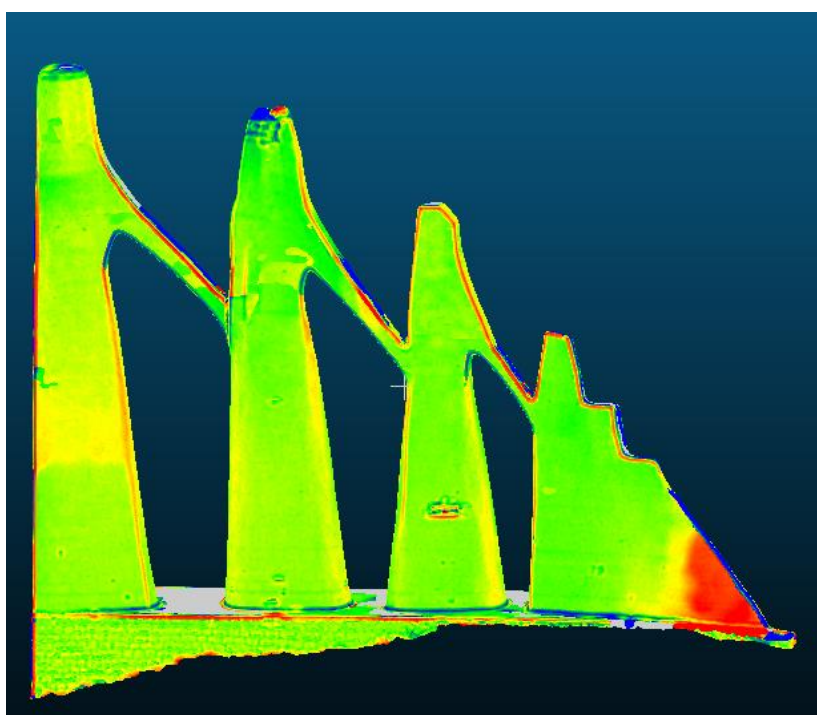
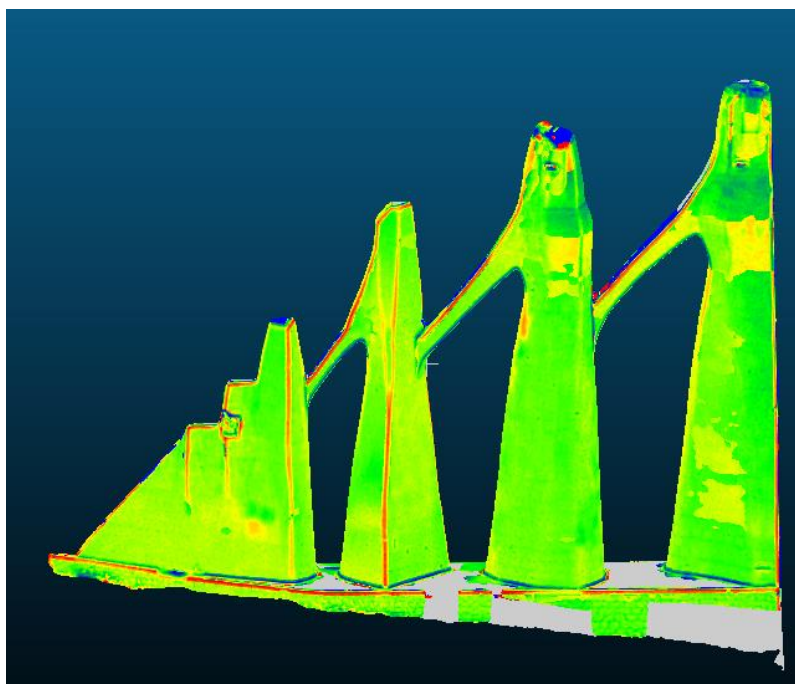
Εντοπίζεται ότι οι αποκλίσεις του μεγαλύτερου μέρους του μνημείου είναι μικρότερες από 5cm. Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στα παρακάτω τμήματα:



Εικόνα 5 - 27: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2

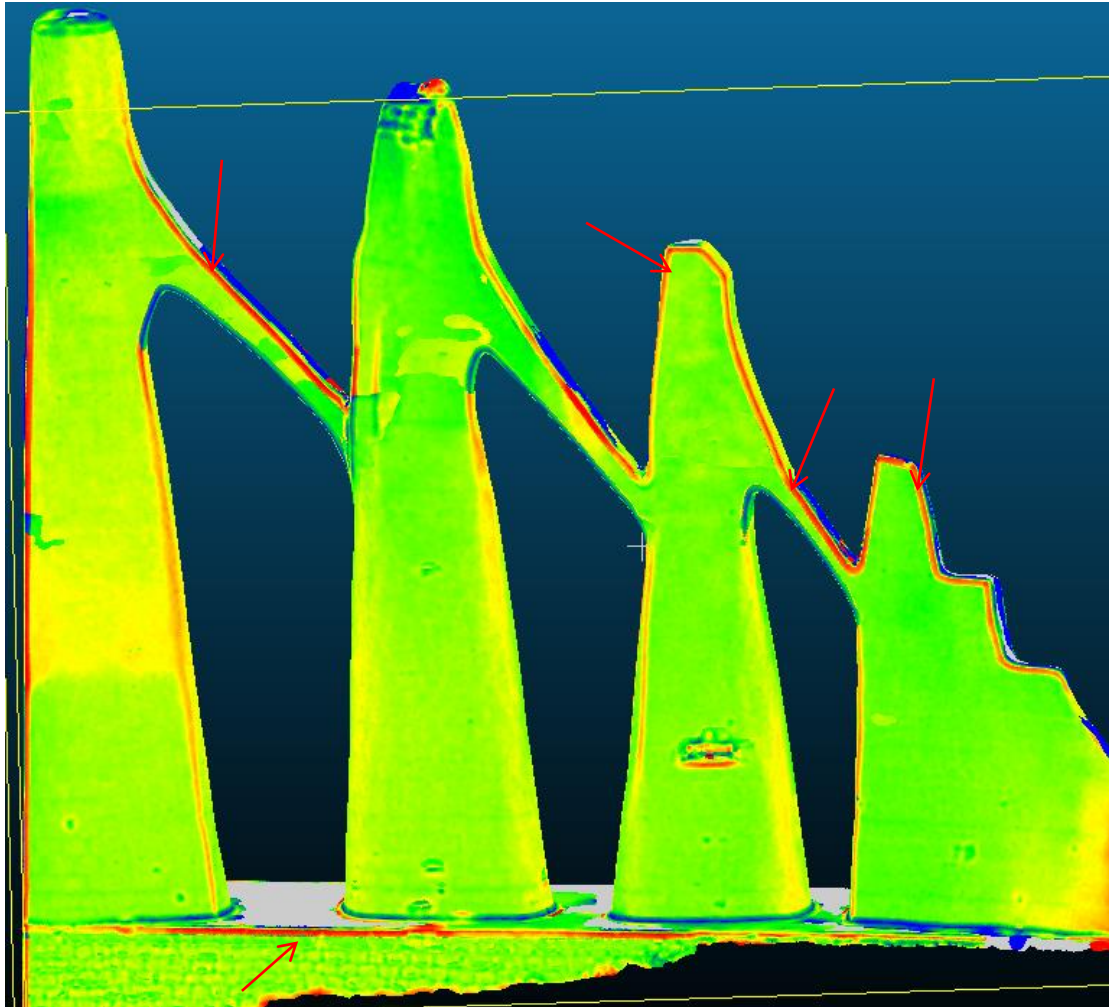
Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό σχετίζονται κυρίως με την έλλειψη ακριβούς και επαρκούς πληροφορίας. (αναλυτικότερα βλ. Κεφάλαιο 5.1)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας ακόμη χάρτης με τέτοια χρωματική διαβάθμιση, ώστε να φανούν τα τμήματα του μνημείου που παρουσιάζουν χαμηλότερη απόκλιση μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, να αναδειχθούν τα μέρη του μνημείου που έχουν απόσταση της τάξης του 1cm και αυτά που έχουν μεγαλύτερη από 5cm.

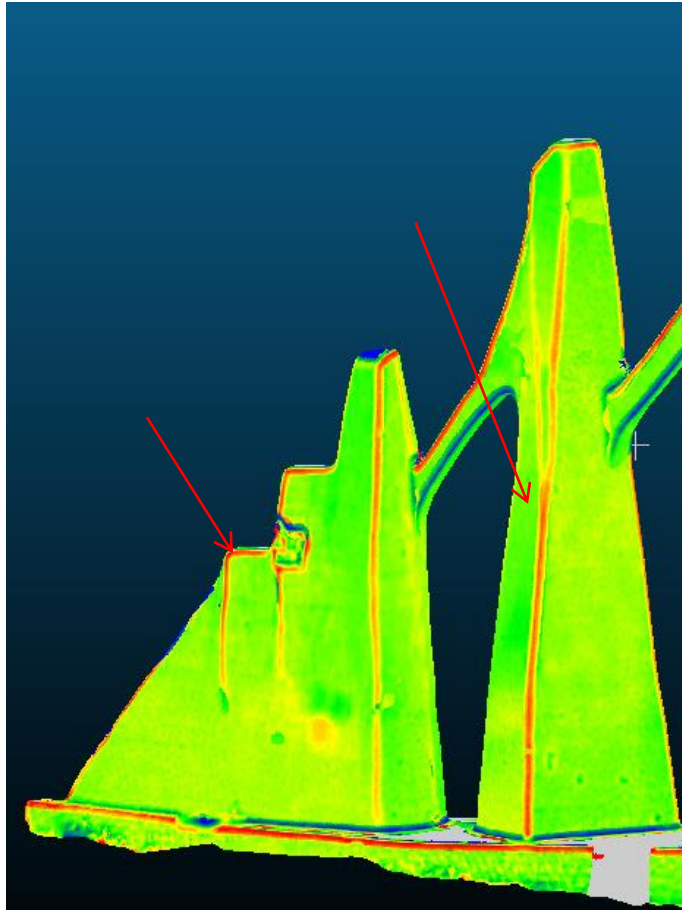


Εικόνα 5 - 28: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 1-5cm – M3C2

Παρατηρώντας τον παραπάνω χάρτη, γίνεται αντιληπτό ότι στο μεγαλύτερο τμήμα του μνημείου οι αποκλίσεις κυμαίνονται στο 1cm. Εξαιρέσεις, αποτελούν τα τμήματα που αναφέρθηκαν και προηγουμένως, καθώς επίσης διαφορές λίγο μεγαλύτερες του 1cm εμφανίζονται και στις ακμές των μορφών.

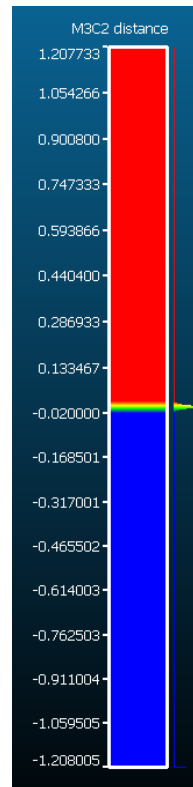
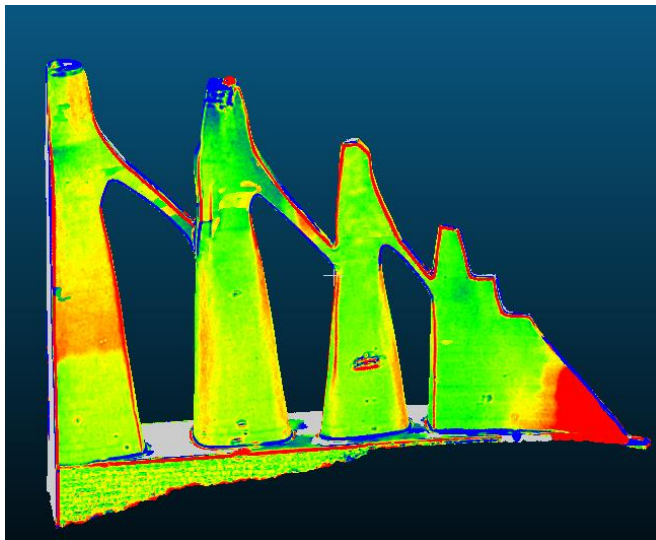
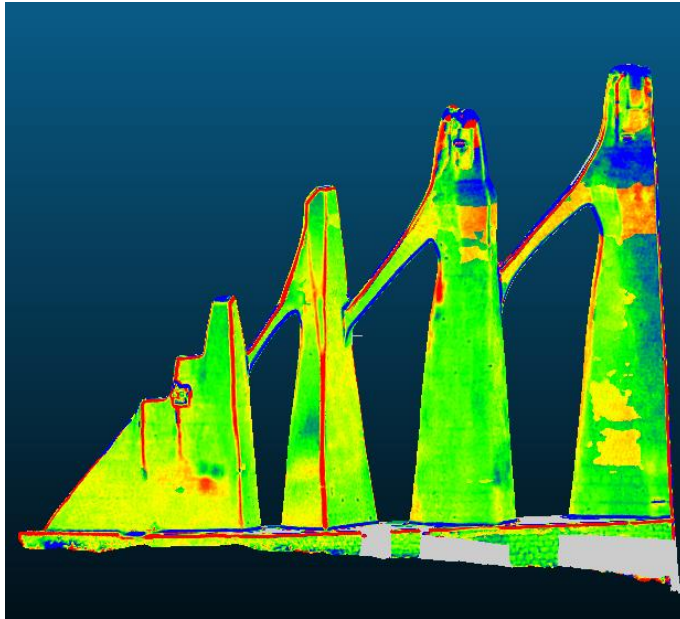


Εικόνα 5 - 29: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2



Εικόνα 5 - 30: Αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σύμφωνα με τον αλγόριθμο M3C2

Τέλος, κρίθηκε σημαντικό να φανούν οι αποκλίσεις των δυο νεφών σημείων σε επίπεδο χιλιοστών. Παρακάτω απεικονίζονται με πράσινο και κίτρινο χρώμα τα τμήματα του μνημείου που παρουσιάζουν αποκλίσεις μικρότερες των 0.5cm, ενώ με μπλε και κόκκινο αυτά που παρουσιάζουν αποκλίσεις κοντά στα 2 cm ή και παραπάνω.



Εικόνα 5 - 31: Χάρτης χρωματικής διαβάθμισης 0.5-2cm – M3C2

Διαπιστώνεται ότι τα μέρη του μνημείου που έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους είναι κυρίως, τα επίπεδα τμήματά του. Στις περιοχές όπου εμφανίζεται καμπυλότητα, οι διαφορές είναι μεγαλύτερες, και δεν περιορίζονται σε επίπεδα χιλιοστών.

❖ Συμπέρασμα συγκρίσεων των δυο επιφανειών και νεφών σημείων:

Με βάση τις παραπάνω συγκρίσεις, γίνεται αντιληπτό ότι οι επιφάνειες, εμφανίζουν υψηλή ταύτιση με αποκλίσεις μερικών χιλιοστών στα τμήματα του μνημείου που είναι επίπεδα. Αντιθέτως, στις περιοχές που εμφανίζεται καμπυλότητα, καθώς και σε αυτές που υπάρχουν ακμές, οι αποκλίσεις εγγίζουν τις τιμές των 1-2 cm. Ωστόσο, ακόμα μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται στα μέρη του μνημείου, που δεν υπήρχε ακριβής και επαρκής πληροφορία για τη δημιουργία επιφάνειας με τη χρήση αυτοματοποιημένων τεχνικών.

5.3 Σύγκριση ορθοφωτομωσαϊκών

Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφεί η σύγκριση των νέων ορθοφωτομωσαϊκών, δηλαδή αυτών που δημιουργήθηκαν με τις νέες αυτόματες ψηφιακές μεθόδους, με τα παλιά ορθοφωτομωσαϊκά, που είχαν δημιουργηθεί με τις κλασσικές φωτογραμμετρικές μεθόδους. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις ορισμένων αποστάσεων στις παλιές και στις νέες ορθοφωτογραφίες και θα αξιολογηθούν οι διαφορές τους.

Για κάθε επίπεδο προβολής, πραγματοποιούνται μετρήσεις αποστάσεων τόσο στην παλιά ορθοφωτογραφία (S_i) όσο και στη νέα ορθοφωτογραφία (S'_i), ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές τους. Έπειτα, υπολογίζεται αλγεβρικά ο μέσος όρος αυτών των διαφορών (M.O.), καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS), δηλαδή η εκτίμηση των αποχών-σφαλμάτων του πληθυσμού, από τον οποίο προέρχεται το κάθε δείγμα, που παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες.

Επίπεδο A-A' :

S_i	S'_i	ΔS
0,176	0,176	0
0,156	0,156	0
0,329	0,330	-0,001
0,438	0,438	0
10,369	10,366	0,003
2,350	2,350	0
5,761	5,755	0,006
10,108	10,112	-0,004
6,985	6,975	0,010
1,400	1,402	-0,002
8,210	8,202	0,008
9,628	9,618	0,010
13,591	13,596	-0,005
12,040	12,037	0,003
1,581	1,594	-0,013
4,551	4,531	0,020
8,518	8,516	0,002

Πίνακας 5 - 6: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο A-A'

$$M.O. = \Delta S/N = 0.002m$$

$$RMS = \sqrt{(\Sigma \Delta S^2 / (N-1))} = 0.008m$$

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5 - 6, γίνεται σαφές ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο ορθοφωτομωσαϊκών κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Οι αποκλίσεις μπορεί να είναι μηδενικές, λίγα χιλιοστά, ορισμένες φορές κοντά στο 0.010m, ενώ σε κάποια σημεία φαίνεται να ξεπερνάται και η τιμή της απαιτούμενης ακρίβειας (0.0125m), καθώς εμφανίζονται τιμές κοντά στα 0.020m.

Έπειτα από πολλές μετρήσεις αποστάσεων σε αυτές τις ορθοφωτογραφίες, συμπεραίνεται ότι :

- Οι πολύ κοντινές αποστάσεις δε διαφέρουν μεταξύ τους στις δύο ορθοφωτογραφίες (τόσο όσον αφορά στα τμήματα των ορθοφωτογραφιών που δημιουργήθηκαν από τις μακρινές εικόνες όσο και σε αυτά που δημιουργήθηκαν από τις κοντινές).
- Οι πιο μεγάλες αποστάσεις διαφέρουν μερικά χιλιοστά έως 0.010m, όταν σε αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται οι ορθοφωτογραφίες που έχουν παραχθεί από τις κοντινές εικόνες.
- σε ορισμένες περιπτώσεις, που αφορούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις που συμπεριλαμβάνονται τμήματα κοντινών εικόνων, οι αποκλίσεις πλησιάζουν τα 0.015-0.020m. Στις περιπτώσεις αυτές, οι μεγάλες διαφορές μπορεί να οφείλονται στις μετατοπίσεις που υπέστησαν οι ορθοφωτογραφίες, που προήλθαν από τις κοντινές εικόνες (βλ. Κεφάλαιο 4.2.4), καθώς και στην αβεβαιότητα των φωτοσταθερών στα ψηλά τμήματα, δηλαδή των φωτοσταθερών των κοντινών εικόνων. Συνεπώς, αφού οι συγκεκριμένες ορθοφωτογραφίες χρειάστηκαν μετατοπίσεις, και επίσης, δεν ήταν δυνατή η ταύτισή τους με τα αντίστοιχα φωτοσταθερά τους, όπως ακριβώς συνέβη και με τις παλιές αντίστοιχες ορθοφωτογραφίες, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στα εν λόγω τμήματα του μνημείου προφανώς θα έχουν μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με το υπόλοιπο μνημείο.

Επίπεδο Α'-Α'' :

S_i	S'_i	ΔS
0.252	0.252	0
1.170	1.170	0
2.005	2.004	0.001
3.038	3.038	0
3.877	3.876	0.001
3.616	3.610	0.006
3.484	3.476	0.008
4.404	4.388	0.016
3.483	3.476	0.007
1.949	1.949	0
4.388	4.376	0.012
5.951	5.934	0.017
4.410	4.398	0.012
2.972	2.962	0.01
2.271	2.270	0.001
1.472	1.472	0
0.964	0.935	0.029

Πίνακας 5 - 7: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο Α'-Α''

$$M.O. = \Delta S/N = 0.007m$$

$$RMS = \sqrt{(\Sigma \Delta S^2)/(N-1)} = 0.010m$$

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5 - 7, διαπιστώνεται μια συστηματικότητα στα σφάλματα. Όλες οι αποστάσεις (κοντινές και μακρινές) που έχουν μετρηθεί στην παλιά ορθοφωτογραφία, είναι μεγαλύτερες από τις αποστάσεις που μετρώνται στην νέα ορθοφωτογραφία.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, γίνεται αντιληπτό ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο ορθοφωτογραφιών κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών.

Μηδενικές αποκλίσεις εμφανίζονται στις κοντινές αποστάσεις, ενώ σε πιο μεγάλες αποστάσεις οι αποχές κυμαίνονται από λίγα χιλιοστά έως 0.010m.

Εξαιρέσεις αποτελούν οι μεγάλες αποστάσεις στις οποίες συμπεριλαμβάνονται σημεία του κεφαλιού της μορφής. Οι διαφορές των αποστάσεων αυτών ξεπερνούν το 0.010m και πλησιάζουν τα 0.017-0.020m.

Τέλος, αποκλίσεις, που ξεπερνούν το όριο της γραφικής ακρίβειας (0.0125m), παρουσιάζονται και στο τμήμα της τέταρτης μορφής Εικόνα 5 - 32:



Εικόνα 5 - 32: Μεγάλες αποχές στην τέταρτη μορφή της ανατολικής όψης

Σε αυτό το μέρος του μνημείου, οι αποχές των αποστάσεων κυμαίνονται από 0.010 έως 0.030m. (αναλυτικές πληροφορίες για το εν λόγω τμήμα αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.2.2).

Συνεπώς, οι μετρήσεις που αφορούν στο συγκεκριμένο τμήμα του μνημείου θα έχουν μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με το υπόλοιπο, αφού δεν καλύπτεται η απαιτούμενη ακρίβεια.

Επίπεδο Β''-Β' :

S_i	S'_i	ΔS
0,253	0,253	0
0,405	0,405	0
1,702	1,705	-0,003
2,968	2,964	0,004
3,109	3,109	0
2,774	8,771	0,003
3,355	3,361	-0,006
3,880	3,873	0,007
5,486	5,495	-0,009
5,234	5,232	0,002
1,409	1,412	-0,003
5,482	5,481	0,001
6,134	6,140	-0,006
6,594	6,613	-0,019
4,327	4,310	0,017
2,196	2,200	-0,004
6,136	6,139	-0,003
4,455	4,445	0,01

Πίνακας 5 - 8: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο Β''-Β'

$$M.O. = \Delta S/N = 0.0005m$$

$$RMS = \sqrt{(\Sigma \Delta S^2 / (N-1))} = 0.008m$$

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5 - 8, γίνεται αντιληπτό ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο ορθοφωτογραφιών κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Μπορεί οι διαφορές να είναι μηδενικές ή λίγα χιλιοστά. Ωστόσο, ορισμένες φορές οι αποχές κυμαίνονται κοντά στο 0.010m, ενώ σε κάποια σημεία φαίνεται να ξεπερνάται και η τιμή της απαιτούμενης ακρίβειας (0.0125m), καθώς παρουσιάζονται αποκλίσεις με τιμές κοντά στα 0.020m.

Ύστερα από πολλές μετρήσεις αποστάσεων σε αυτές τις ορθοφωτογραφίες, συμπεραίνεται ότι :

- Οι πολύ κοντινές αποστάσεις δε διαφέρουν μεταξύ τους στις δύο ορθοφωτογραφίες
- Οι πιο μεγάλες αποστάσεις, που δεν συμπεριλαμβάνουν σημεία του κεφαλιού της μορφής, διαφέρουν μερικά χιλιοστά έως 0.010m
- Οι μεγάλες και διαγώνιες αποστάσεις, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται τμήματα του κεφαλιού της μορφής, παρουσιάζουν αποκλίσεις που ξεπερνούν το 0.010m και ορισμένες φορές ξεπερνούν και την ακρίβεια, με τις αποκλίσεις να λαμβάνουν τιμές κοντά στα 0.020m.

Επίπεδο Β'-Β :

S_i	S'_i	ΔS
0,245	0,246	-0,001
0,523	0,523	0
1,164	1,163	0,001
0,325	0,327	-0,002
1,844	1,845	-0,001
0,688	0,686	0,002
6,320	6,330	-0,010
7,787	7,779	0,008
0,190	0,194	-0,004
9,113	9,115	-0,002
9,541	9,554	-0,013
11,013	11,013	0
14,052	14,047	0,005
8,112	8,113	-0,001
9,527	9,517	0,010
10,311	10,307	0,004
10,740	10,756	-0,016

Πίνακας 5 - 9: Αποκλίσεις αποστάσεων στο επίπεδο Β'-Β

$$M.O. = \Delta S/N = 0.001m$$

$$RMS = \sqrt{(\sum \Delta S^2 / (N-1))} = 0.007m$$

Μελετώντας τον Πίνακα 5 - 9, παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο ορθοφωτομωσαϊκών κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος τιμών. Οι αποκλίσεις μπορεί να είναι μηδενικές, λίγα χιλιοστά, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις να ξεπερνούν το 0.010m.

Έπειτα από πολλές μετρήσεις αποστάσεων και σε αυτές τις ορθοφωτογραφίες συμπεραίνεται ότι :

- Οι πολύ κοντινές αποστάσεις δε διαφέρουν μεταξύ τους στις δύο ορθοφωτογραφίες (τόσο όσον αφορά στα τμήματα των ορθοφωτογραφιών που δημιουργήθηκαν από τις μακρινές εικόνες όσο και σε αυτά των κοντινών)
- Οι πιο μεγάλες αποστάσεις διαφέρουν μερικά χιλιοστά έως 0.010m, όταν σε αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται οι κοντινές εικόνες
- Οι μεγάλες αποστάσεις, στις οποίες υπάγονται τμήματα του κεφαλιού της μορφής, παρουσιάζουν αποκλίσεις που ξεπερνούν το 0.010m, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν και την ακρίβεια, με τιμές αποκλίσεων 0.015-0.020m. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και στο επίπεδο A-A', στην αβεβαιότητα των φωτοσταθερών των κοντινών εικόνων, καθώς και στις μετατοπίσεις που είχαν υποστεί οι ορθοφωτογραφίες για τη δημιουργία του τελικού ορθοφωτομωσαϊκού.

Επίσης, πραγματοποιούνται συγκρίσεις που αφορούν στην πιστότητα των ορθοφωτογραφιών, δηλαδή στο κατά πόσο τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Για το σκοπό αυτό, έγινε έλεγχος εάν τα φωτοσταθερά και τα χαρακτηριστικά σημεία συμπίπτουν στις αντίστοιχες θέσεις τους στην ορθοφωτογραφία, και συνεπώς σε ποια ορθοφωτογραφία (παλιά ή νέα) υπάρχει μεγαλύτερη ταύτιση. Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένα μόνο παραδείγματα που παρουσιάζουν αποκλίσεις στις θέσεις των φωτοσταθερών. Επιπρόσθετα, ορίστηκαν και σχεδιάστηκαν οριζόντιες γραμμές, παράλληλες στον άξονα x, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι αρμοί που έχουν αποτυπωθεί στις ορθοφωτογραφίες προσεγγίζουν μία ευθεία, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Επίπεδο Α-Α΄:



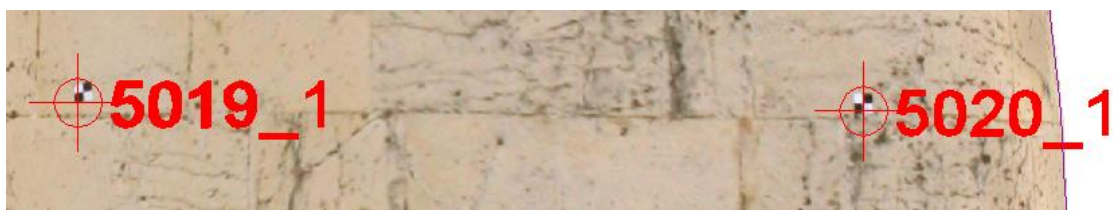
Εικόνα 5 - 33: Νέα ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



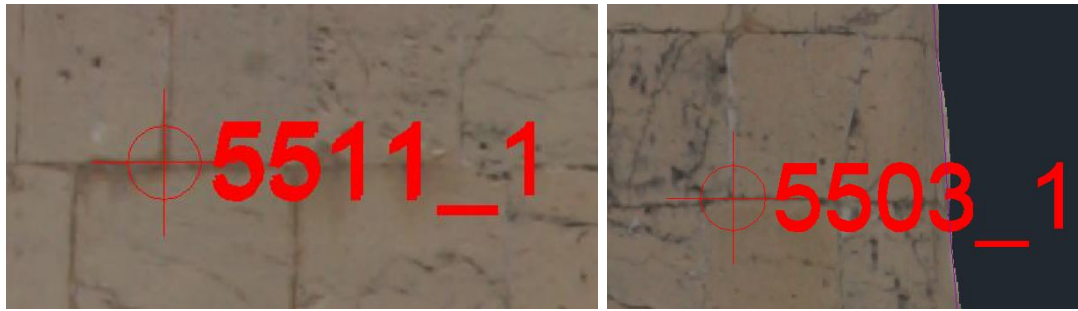
Εικόνα 5 - 34: Παλιά ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



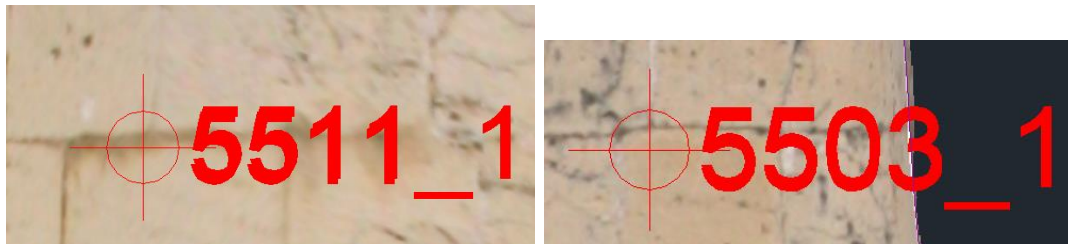
Εικόνα 5 - 35: Νέα ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



Εικόνα 5 - 36: Παλιά ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



Εικόνα 5 - 37: Νέα ορθοφωτογραφία – χαρακτηριστικά σημεία



Εικόνα 5 - 38: Παλιά ορθοφωτογραφία – χαρακτηριστικά σημεία



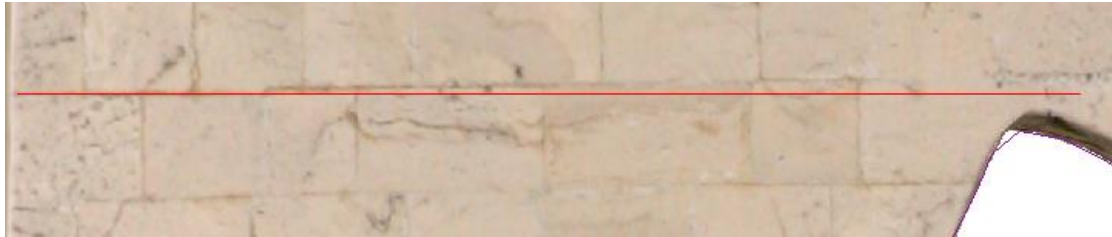
Εικόνα 5 - 39: Νέα ορθοφωτογραφία – έλεγχος αρμών



Εικόνα 5 - 40: Παλιά ορθοφωτογραφία – έλεγχος αρμών



Εικόνα 5 - 41: Νέα ορθοφωτογραφία - έλεγχος αρμών



Εικόνα 5 - 42: Παλιά ορθοφωτογραφία - έλεγχος αρμών

Επίπεδο Α'-Α'':

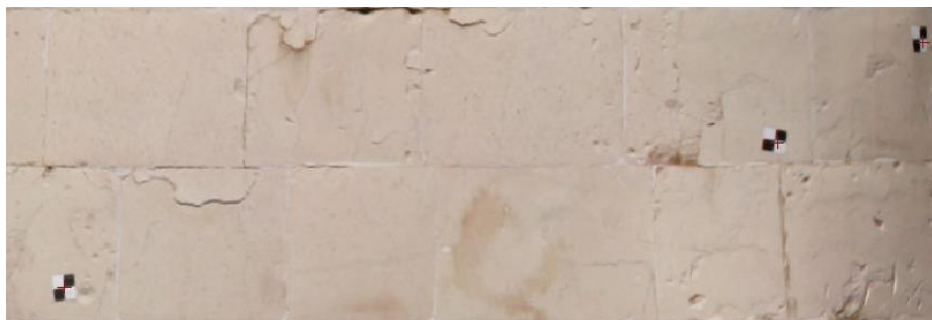


Εικόνα 5 - 43: Νέα ορθοφωτογραφία - έλεγχος

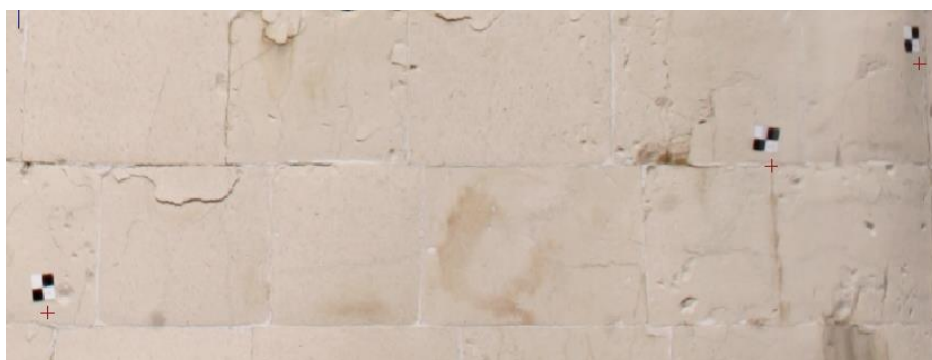


Εικόνα 5 - 44: Παλιά ορθοφωτογραφία - έλεγχος

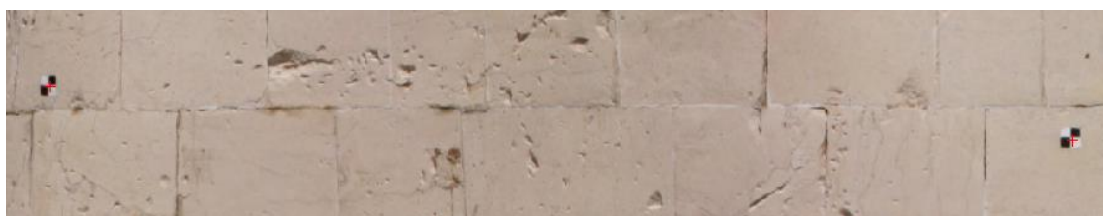
Επίπεδο Β'-Β:



Εικόνα 5 - 45: Νέα ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



Εικόνα 5 - 46: Παλιά ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



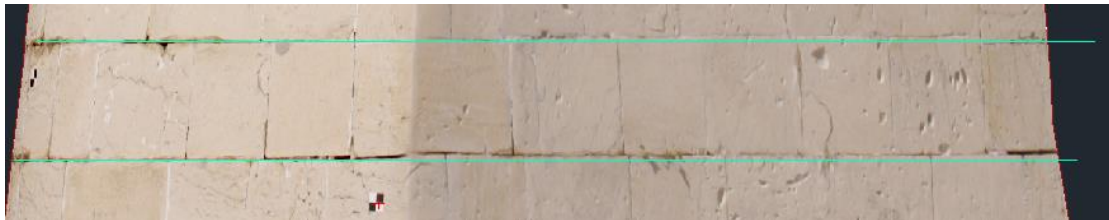
Εικόνα 5 - 47: Νέα ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



Εικόνα 5 - 48: Παλιά ορθοφωτογραφία - φωτοσταθερά



Εικόνα 5 - 49: Νέα ορθοφωτογραφία – έλεγχος αρμών



Εικόνα 5 - 50: Παλιά ορθοφωτογραφία – έλεγχος αρμών

Παρατηρώντας όλες τις παραπάνω εικόνες και ύστερα και από περαιτέρω μελέτη στα τελικά παράγωγα, συμπεραίνεται ότι, τα τμήματα του μνημείου τα οποία δεν παρουσίαζαν κάποιο πρόβλημα, όπως για παράδειγμα οι ορθοφωτογραφίες των κεφαλιών και τμήμα της ανατολικής όψης του επιπέδου A'-A'', έχουν αποδοθεί με καλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις σύγχρονες αυτόματες μεθόδους, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις τα νέα παράγωγα προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι ο χρήστης με τις συγκεκριμένες μεθόδους έχει μεγαλύτερο έλεγχο των δεδομένων, αφού πραγματοποιείται ενιαία συνόρθωση, όλων των εικόνων μαζί.

6 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας το σύνολο των εργασιών και την παραγωγή τελικών προϊόντων, εξετάζεται σε ποιό βαθμό επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης ιστορικών εικόνων τεκμηρίωσης με σύγχρονες, αυτόματες ψηφιακές μεθόδους.

Σύμφωνα με τη μελέτη και διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, συμπεραίνεται ότι οι αυτοματοποιημένες ψηφιακές μέθοδοι είναι δυνατό να αποδώσουν αξιόπιστα τελικά παράγωγα χρησιμοποιώντας ιστορικές εικόνες γεωμετρικής τεκμηρίωσης, οι οποίες είχαν ληφθεί στο παρελθόν με διαφορετικό σκεπτικό, προκειμένου να υποστούν φωτογραμμετρική επεξεργασία με κλασσικές μεθόδους μονοσκοπικής και στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας.

Οι σύγχρονες, αυτόματες μέθοδοι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και να επιφέρουν αποτελέσματα με ακρίβεια, πληρότητα και πιστότητα υπό ορισμένες, όμως, προϋποθέσεις:

- Να υπάρχουν οι απαραίτητες εικόνες και επικαλύψεις. Αυτό αφορά κυρίως στα τμήματα της νότιας όψης του μνημείου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ως δεδομένα δόθηκαν από μία εικόνα για κάθε τμήμα της νότιας όψης, χωρίς να υπάρχουν επικαλύψεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αδυναμία του σύγχρονου λογισμικού Metashape να αποδώσει εικονιστικά τα εν λόγω τμήματα, με συνέπεια να μην παραχθεί κανένα τελικό προϊόν για την όψη αυτή. Επίσης, ελλιπής πληροφορία εντοπίζεται και σε τμήματα του τρισδιάστατου μοντέλου, που αφορούν, κυρίως, στο πάνω μέρος των χεριών και κεφαλιών, σε ορισμένα μέρη του βάθρου, καθώς και σε άλλα σημεία του μνημείου (αναλυτικότερα βλ. 4.2.2). Επιπρόσθετα, η ανυπαρξία αρκετών και, κυρίως, μετωπικών εικόνων οδήγησε σε διάφορα προβλήματα κατά τη δημιουργία της τρισδιάστατης επιφάνειας, όπως εσφαλμένο τρισδιάστατο μοντέλο σε τμήμα της τέταρτης μορφής στην ανατολική όψη, καθώς και τραχύτητα επιφάνειας σε ορισμένα σημεία, κυρίως στα πλαϊνά τμήματα των μορφών. Ωστόσο, η αντιμετώπιση των προβλημάτων τραχύτητας σε περιπτώσεις που αφορούν επαρκώς επίπεδα αντικείμενα, είναι εφικτή με τη βοήθεια σύγχρονων προγραμμάτων επεξεργασίας (αναλυτικότερα βλ. 4.2.2).
- Να υπάρχουν πιο αξιόπιστες μετρήσεις φωτοσταθερών. Παρατηρώντας και τις παλιές ορθοφωτογραφίες, παρουσιάζεται ένα γενικό πρόβλημα που αφορά στα φωτοσταθερά των κοντινών εικόνων. Οι μετρήσεις των φωτοσταθερών των κεφαλιών, έχουν πραγματοποιηθεί από το έδαφος, από

πολύ μεγάλη απόσταση (οριζόντια και κατακόρυφη). Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να δημιουργεί μεγάλη αβεβαιότητα στις συντεταγμένες τους. Αυτή η αβεβαιότητα φαίνεται να έχει επηρεάσει την ακρίβεια των τελικών παραγώγων που σχετίζονται με τα κεφάλια των μορφών. Για αυτό το λόγο, παρουσιάζεται μικρότερη ακρίβεια στις μετρήσεις που συμπεριλαμβάνονται και τα παράγωγα των εν λόγω τμημάτων.

Τα τελικά παράγωγα που δημιουργήθηκαν, καλύπτουν στα περισσότερα τμήματά τους την απαιτούμενη ακρίβεια για την κλίμακα 1:50. Ωστόσο, στις περιπτώσεις που δεν τηρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν, η ακρίβεια είναι μικρότερη της απαιτούμενης, με σφάλματα που πλησιάζουν τα 1.5cm, ενώ σε ελάχιστα τμήματα υπάρχει ακόμα μικρότερη ακρίβεια, με σφάλματα 2-3cm.

Ωστόσο, τα τμήματα του μνημείου τα οποία δεν παρουσίαζαν κάποιο πρόβλημα, όπως για παράδειγμα οι ορθοφωτογραφίες των κεφαλιών και τμήμα της ανατολικής όψης του επιπέδου Α'-Α'', έχουν αποδοθεί με καλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις σύγχρονες αυτόματες μεθόδους, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις τα νέα παράγωγα προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα.

Επομένως, οι αυτόματες μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν ιστορικές εικόνες, ακατάλληλες βάσει των αρχικών προδιαγραφών τους, και εάν παράλληλα τηρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις μπορεί να επιφέρουν αποτελέσματα με ενιαία ακρίβεια, πληρότητα και πιστότητα.

Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ανάγκη γεωμετρικής τεκμηρίωσης ενός αντικειμένου/μνημείου, για το οποίο υπάρχουν παλιά δεδομένα, αυτά είναι δυνατό να αξιοποιηθούν με τις σύγχρονες ψηφιακές μεθόδους και συνεπώς να δημιουργηθούν αξιόπιστα τελικά παράγωγα. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που για τα ιστορικά δεδομένα δεν τηρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν, θα ήταν χρήσιμο για την παραγωγή τελικών προϊόντων με ενιαία ακρίβεια, πιστότητα και πληρότητα, να πραγματοποιηθούν συμπληρωματικές εργασίες (λήψεις εικόνων, μετρήσεις φωτοσταθερών).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- cloudcompare. (n.d.). *M3C2 (plugin)*. Retrieved 28, 2020, from cloudcompare.org:
[https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=M3C2_\(plugin\)&fbclid=IwAR1urZU7w0n_1L0DhecCxE5z2JraHCMCjdmJETIKLOBfMNa6-r3XozL7cmQ](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=M3C2_(plugin)&fbclid=IwAR1urZU7w0n_1L0DhecCxE5z2JraHCMCjdmJETIKLOBfMNa6-r3XozL7cmQ)
- mapio.net. (n.d.). *Ζάλογγο*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from <https://mapio.net/pic/p-4092830/>
- paramythia. (2016). *Σουλιώτικη Συμπολιτεία*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from paramythia: <http://www.paramythia-online.gr/13626/souliotiki-simpolitia/prevezabest>.
- prevezabest. (n.d.). *Το μνημείο Ζαλόγγου*. Retrieved 29 2, 2020, from Πρέβεζα: https://prevezabest.blogspot.com/2020/02/blog-post_955.html
- sansimera. (n.d.). *ο Χορός του Ζαλόγγου*. Retrieved 28, 2020, from sansimera: <https://www.sansimera.gr/articles/861>
- tripadvisor. (n.d.). *Monument of Zalongo*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from tripadvisor: https://www.tripadvisor.es/Attraction_Review-g3236217-d7031226-Reviews-Monument_of_Zalongo-Kamarina_Preveza_Region_Epirus.html
- Wikipedia. (2011). *Σουλιώτες*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from el.wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%BF%CF%85%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CF%84%CE%B5%CF%82>
- Wikipedia. (n.d.). *Μνημείο Ζαλόγγου*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from el.wikipedia: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%BD%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF_%CE%96%CE%B1%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B3%CE%BF%CF%85
- Wikipedia. (n.d.). *Χάρτης της Βενετίας*. Retrieved Φεβρουάριος 16, 2020, from el.wikipedia: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7%CF%82_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CE%92%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%84%CE%AF%CE%B1%CF%82
- Βενετίας, Χ. Τ. (1964).
- Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σ. (2009). *Γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου των Σουλιωτισσών*.
- Μάστορα. (2010). *Η ιστορία του Σουλίου*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from <http://users.sch.gr/ellmastora/index.php/topika/soyli/22-souliistoria.html>
- Μηχανή του Χρόνου. (n.d.). *Ζάλογγο*. Retrieved 28, 2020, from mixanitouxronou: <https://www.mixanitouxronou.gr/echete-gia-vrisoules->

longi-vouna-rachoules-i-aftoktonia-ton-ginekon-sto-zalongo-gia-na-min-
odigithoun-sta-skalovopazara-ton-tourkon-ti-apantane-i-istoriki-stin-
amfisvitsi-tou-chorou/

Μωρέτης. (n.d.). *Το μνημείο Ζαλόγγου*. Retrieved Ιανουάριος 6, 2020, from
zsgiannina: <https://zsgiannina.gr/%CF%84%CE%BF-%CE%BC%CE%BD%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%BF-%CE%B6%CE%B1%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B3%CE%BF%CF%85/>

Πολυδώρου. (2014). *25 Μαρτίου: Αλήθειες και μύθοι*. Retrieved 2 28, 2020, from
thetoc: <https://www.thetoc.gr/koinwnia/article/25i-martiou-alitheies-kai-muthoi/>

Natan Micheletti, Jim H Chandler, Stuart N Lane. « Structure from Motion (SfM) Photogrammetry» *British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques, (2015)*

Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ. «Γεωμετρική τεκμηρίωση πολιτιστικών αγαθών» *Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ Συνέδριο προσωπικού του Τμήματος Αναδασμού, (2008)*

Georgopoulos A. and Ioannidis C. « Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments Andreas, Greece» *FIG Working Week, (2004)*

E. Agosto, P. Ardisson, L. Bornaz «THE CASTLE OF GRAINES: DIFFERENT SURVEY METHODOLOGIES FOR THE DOCUMENTATION OF HISTORICAL BUILDINGS» *CIPA 2005 XX International Symposium, (2005)*

Γεωργόπουλος Α. «Ορθοφωτογραφία(Μέρος Ι)» *Μάθημα Φωτογραμμετρίας ΙΙ,(2017)*

Kritharas, Kritsotaki, Bakali, Papakosta, Georgopoulos, Balodimos. «Γεωμετρική τεκμηρίωση και τρισδιάστατη φωτορεαλιστική απεικόνιση του πέτρινου τοξωτού γεφυριού του Κοκκόρου ή Νούτσου στο Δήμο Κεντρικού Ζαγορίου» (1999)

Γιαννακόπουλος Β. «ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ.» (2016)

Ioannidis C. & Georgopoulos A. «Innovative Techniques for the Acquisition and Processing of Multisource Data for the Geometric Documentation of Monuments» (2007)

Λιανός Ν. «Η χρήση της τρισδιάστατης ψηφιακής μεθοδολογίας, στη μελέτη, προστασία και ανάδειξη μνημείων και ιστορικών συνόλων.» (2017)

Lague, Brodu, Leroux «Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner» (2013)

Daniel Girardeau-Montaut «CloudCompare Point Cloud Processing Workshop» *PCP* (2019)

Mancini, Dubbini, Gattelli, Stecchi, Fabbri, Gabbianelli. «Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments» (2013)

Ο ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΒΕΝΕΤΙΑΣ «Διεθνής Χάρτης για την Αποκατάσταση και Συντήρηση Μνημείων και Μνημειακών Συνόλων» (1964) *Δεύτερο Διεθνές Συνέδριο Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων, Βενετία 1964, ψηφισμένος από το ICOMOS το 1965*

Συμεωνίδης Π. «Σαρωτές Laser.Τεχνολογία, τεχνικές και εφαρμογές» *Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, (2007)*

Snaveley, Seitz, Szeliski «Modeling the World from Internet Photo Collections» (2007)

GALILEO SISCAM TECHNOLOGY - Fotogrammetria Digitale - Archis «*Raddrizzamento, mosaico e restituzione di immagini digitali. Versione "Professional".*»

GALILEO SISCAM TECHNOLOGY - Fotogrammetria Digitale - D.I.M.S. «Sistema completo per la Fotogrammetria Digitale»

Ioannidis C., Potsiou C. «DETAILED RESTITUTION AND REPRESENTATION OF THE SEAWARD CASTLE OF CHIOS» (1999)

Georgopoulos, Makris, Dermentzopoulos, «AN ALTERNATIVE METHOD FOR LARGE SCALE ORTHOPHOTO PRODUCTION» *CIPA XX International Symposium(2005)*

Mavromati, Petsa, Karras, «THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF ARCHAEOLOGICAL ORTHOIMAGING» *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing (2002)*

Karras, Patias, Petsa, «DIGITAL MONOPLOTTING AND PHOTO-UNWRAPPING OF DEVELOPABLE SURFACES IN ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY» *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing (1996)*

Πατιάς Π. «ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ» (2007)

Valanis A., Tapinaki S., Georgopoulos A., Ioannidis C., «HIGH RESOLUTION TEXTURED MODELS FOR ENGINEERING APPLICATIONS» *22nd CIPA Symposium (2009)*

Λογισμικό Ψηφιακής Αναγωγής RDF – RDF didattica

Fayad «Η Φωτογραμμετρική διαδικασία, χρησιμοποιώντας το Agisoft Metashape/MetaShape» (2019)

Agisoft Metashape ProUserManual, (2016)

TOPCON Image Master_Manual (2007)

TOPCON Image Master Calib_Manual (2007)

Γεωργόπουλος Α. «Περί φωτογραμμετρίας» *Διαφάνειες μαθήματος Αποτυπώσεων μνημείων (2016)*

Πέτσα «Θεμελιώδεις έννοιες και θεμελιώδη προβλήματα της Φωτογραμμετρίας» (2000)

Ιωαννίδης Χ. «Η χρήση των UAV στη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων - Εξοπλισμός, Λογισμικό, Προϊόντα» *Μη επανδρωμένα Εναέρια Συστήματα (UAS) και Χαρτογράφηση' Αθήνα, (2016)*

Γεωργόπουλος Α. «3D Scanners» *Διαφάνειες μαθήματος Αποτυπώσεων μνημείων (2016)*

Γεωργόπουλος Α. «Εισαγωγή – Πολιτιστική κληρονομιά» *Διαφάνειες μαθήματος Αποτυπώσεων μνημείων (2019)*

Καρράς *Διαφάνειες Φωτογραμμερία III (2017)*

Chiabrandò, Donadio, Rinaudo «SfM FOR ORTHOPHOTO GENERATION: A WINNING APPROACH FOR CULTURAL HERITAGE KNOWLEDGE» *25th International CIPA Symposium (2015)*